Diseño conceptual de un sistema de mezclado en línea para la carga directa de crudo a la unidad U-2100 de la Gerencia Refinería Barrancabermeja

Enildo Nery González Carvallido y Miguel Roberto Osma Duarte

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de procesos de refinación y petroquímica

Director:

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Tutor:

Rosangela Pacheco Acosta

Ingeniera de Procesos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería de Procesos de Refinación y Petroquímica

Bucaramanga

2022

Contenido

Pág.

Introducción 10

1. Objetivos 11

1.1 Objetivo General 11

1.2 Objetivos Específicos 11

2. Marco de referencia 12

2.1 Marco Teórico 12

2.1.1 Carga de crudos en la GRB 12

2.1.2 Balance de masa 14

2.1.3 Balance de energía mecánica 14

2.1.4 Mezcladores estáticos en línea 15

2.2 Estado del arte 19

3. Metodológica 20

3.1 Recolección de datos históricos de la operación de cargue actual 21

3.2 Análisis de los históricos 21

3.3 Validación por simulación. 21

3.4 Diseño de la alternativa de cargue directo 22

3.5 Proposición de un lazo de control 22

3.6 Simulación del esquema de control 22

4. Análisis de resultados 23

4.1 Históricos de Carga 23

4.2 Alternativa de Cargue Directo 29

4.2.1 Diseño del mezclador estático en línea 29

4.2.2 Disposición de líneas, accesorios y mezclador en línea 31

4.3 Simulación Alternativa de Cargue Directo 38

5. Conclusiones 46

6. Recomendaciones 47

Referencias Bibliográficas 48

Apeéndices 50

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Representación de la carga de crudo a las unidades de destilación en la GRB. 13

Figura 2. Corte transversal de un mezclador estático tipo Kenics (KMS). 16

Figura 3. Homogeneidad de mezcla para flujo turbulento en mezcladores estáticos tipo SVM y KVM, con adición de 1%vol de aditivo..... 18

Figura 4. Dispersión flujo de carga y presión de succión a la unidad U-2100 entre diciembre 2021 y mayo 2022..... 23

Figura 5. Dispersión flujo de carga vs presión de succión a la unidad U-2100 entre diciembre 2021 y mayo 2022..... 25

Figura 6. Diagrama de flujo de proceso (PFD) del cargue por tanque a la U-2100, codificado en Aspen Hysys v10 26

Figura 7. Sección Properties con los assays de los crudos definidos en Aspen Hysys v10. 27

Figura 8. Variación de la altura del tanque K-822 en el periodo entre diciembre 2021 y mayo 2022..... 27

Figura 9. Gráfico de paridad que compara los históricos de la presión de succión de la P-2101 con la obtenida por simulación con el PFD codificado en Aspen Hysys v10. 28

Figura 10. Variación de la relación coeficiente de variación a grado de mezcla inicial (eje izquierdo) y la caída de presión en el mezclador (eje derecho), con respecto a la longitud del mezclador estático tipo KMS, según la Ec. 10. 31

Figura 11. Propuesta de configuración sistema de cargue directo a la U-2100. 32

Figura 12. Curva de la bomba P-3851. 33

Figura 13. Distancia definida por Google Maps® para la sección desde la salida del mezclador S-3853 al manifold de Casa Bombas 2; aplicación consultada el día 25 de mayo de 2022. 35

Figura 14. Ventana de Pipe Segment codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo. 37

Figura 15. Ventanas de los controladores PID y on/off codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo. 40

Figura 16. PFD codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo. 42

Figura 17. Simulación dinámica con el PFD codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo. 42

Figura 18. Respuesta del sistema al inicio de la simulación dinámica, con activación del PID en automático (K=0.5 %/%, Ti=5 min). 43

Figura 19. Respuesta del sistema ante una disminución a 40% en la apertura de la VLV-104 (K=1%, Ti=5 min). 43

Figura 20. Activación del cargue por gravedad (control on/off) ante falla en el suministro de crudo por la línea de cargue directo a la U-2100. 45

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Estadísticos para el flujo de carga y la presión de succión a la U-2100 entre diciembre 2021 y mayo de 2022 24

Tabla 2. Propiedades y características de la línea de flujo del mezclador estático para U-2100.. 30

Tabla 3. Dimensiones y caída de presión en el mezclador estático KMS para U-2100 31

Tabla 4. Líneas de tuberías de la alternativa de cargue directo a la U-2100. 36

Lista de Apéndices

Pág.

Apéndice A. Figuras y Tablas 50

Apéndice B. Código desarrollado en Matlab 53

Resumen

Título: Diseño conceptual de un sistema de mezclado en línea para la carga directa de crudo a la unidad U-2100 de la Gerencia Refineria Barrancabermeja[*]

Autores. Enildo Nery González Carvallido y Miguel Roberto Osma Duarte[**]

Palabras Claves: mezclado, mezclador estático, presión, simulación, Hysys, lazo de control

Descripción

La Gerencia Refinería de Barrancabermeja, GRB, presenta oportunidades en la disminución de inventarios de crudos en los tanques de alimentación a las unidades de destilación de crudos; el uso de estos inventarios incrementaría el margen de refinación y disminuiría impuestos anuales. Una alternativa para la eliminación de estos inventarios corresponde a la implementación de un esquema de carga directa a estas unidades. Sin embargo, la carga directa implica el diseño de líneas de conducción de crudo y de un mezclador estático en línea, así como la verificación del cumplimiento de la presión de succión mínima para la bomba de carga a las unidades. En este documento se expone un análisis conceptual que envuelve el diseño de la línea de carga directa, el cálculo de las caídas de presión y la simulación en Aspen Hysys de la alternativa de alimentación directa a la unidad de destilación U-2100. Para lo anterior, los datos históricos de carga con tanque de alimentación fueron recolectados y analizados; asimismo, una simulación en Aspen Hysys validó los resultados de los históricos. El diseño de la línea fue realizado según los valores máximos reportados por los históricos y por la aplicación de balances de masa, de energía mecánica y de ecuaciones semiempíricas para el mezclador estático. También, el diseño conceptual envolvió la proposición de dos lazos de control para la estabilidad de la alimentación por carga directa. Según los resultados, el mezclador estático para el sistema tipo KMS de 10” de diámetro nominal, debe tener una longitud de 100”. La alternativa de cargue directo a la U-2100 conlleva a que la presión de succión de la bomba P-2101, se encuentre por encima de los valores reportados en los datos históricos. Igualmente, los lazos de control propuestos conducen a que la simulación reporte estabilidad ante diferentes perturbaciones.

[*] Proyecto de grado

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Escuela de Ingeniería de procesos de refinación y petroquímica Director: Dr. Giovanni Morales Medina Tutor:Rosangela Pacheco Acosta Ingeniera de Procesos

Abstract

Title: Conceptual design of an online mixing system for the direct loading of crude oil to the U-2100 unit of the Gerencia Refinería Barrancabermeja[*]

Authors. Enildo Nery González Carvallido y Miguel Roberto Osma Duarte[**]

Keywords: mixing, static mixer, pressure, simulation, Hysys, control loop.

Description

The Barrancabermeja Refinery Management, GRB, presents opportunities in the reduction of crude oil inventories in the feed tanks for the crude oil distillation units; the use of these inventories would increase the refining margin and reduce annual taxes. An alternative for the elimination of these inventories corresponds to the implementation of a direct loading scheme for these units. However, direct loading implies the design of crude oil pipelines and an in-line static mixer, as well as verification of compliance with the minimum suction pressure for the unit loading pump. This document presents a conceptual analysis that involves the design of the direct loading line, the calculation of pressure drops and the simulation in Aspen Hysys of the direct feeding alternative to the U-2100 distillation unit. For the above, the historical data of loading with feed tank were collected and analyzed; likewise, a simulation in Aspen Hysys validated the results of the historical ones. The design of the line was carried out according to the maximum values reported by the historical ones and by the application of balances of mass, mechanical energy and semi-empirical equations for the static mixer. Also, the conceptual design involved the proposal of two control loops for the stability of the direct load feeding. According to the results, the static mixer for the KMS type system with a nominal diameter of 10" must have a length of 100". The direct loading alternative to the U-2100 leads to the suction pressure of the P-2101 pump being above the values reported in the historical data. Likewise, the proposed control loops lead to the simulation reporting stability in the face of different disturbances.

[*] Proyecto de grado

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Escuela de Ingeniería de procesos de refinación y petroquímica Director: Dr. Giovanni Morales Medina Tutor: Rosangela Pacheco Acosta Ingeniera de Procesos

Introducción

La Gerencia Refinería Barrancabermeja (GRB) realiza el cargue a la unidad de destilación U-2100 por medio de tanques de mezcla ubicados en la sección Casa Bombas 2 (CB2). Estos tanques deben contener un mínimo de 50 mil barriles, lo cual mantiene un valor de cabeza neta de succión que evita la cavitación en la bomba de carga. A pesar, de que este inventario mínimo en los tanques es necesario para la operación, reduce la disponibilidad de crudo procesado y por lo tanto, limita un incremento en la carga a la unidad, limitando también un incremento en la cantidad de productos comerciales generados en la GRB. Adicionalmente, la GRB debe pagar impuesto por inventarios de crudo que posea a 31 de diciembre; con el precio actual del crudo referencia Brent ($ 101,8 USD por barril a julio 25 de 2022), el activo sin procesar asciende a aproximadamente 5.0 MMUSD por tanque. Con lo anterior, la liberación de este inventario conduciría a la elevación del margen de refinación del negocio.

Una alternativa de eliminación de este crudo sin procesar corresponde al reemplazo de los tanques por mezcladores estáticos en línea. Estos equipos en línea conducen los crudos, mientras van efectuando el correspondiente mezclado; desde luego, su operación requiere de la verificación de la potencia disponible en las bombas y de nuevas líneas de tubería, accesorios y válvulas. El presente documento de proyecto de grado se centra en el diseño conceptual del sistema de mezclado estático en línea para la U-2100, que podría reemplazar al tanque con inventario de crudo; el diseño abarca la definición de los tamaños de las tuberías, junto con sus accesorios y válvulas, así como, el tamaño del mezclador en línea. Asimismo, dos lazos de control, uno

feedback y otro *on/off*, fueron propuestos y simulados en Aspen Hysys, verificando la respuesta del sistema diseñado, ante posibles perturbaciones en la alternativa de cargue directo a la U-2100.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un diseño conceptual de un sistema de mezclado en línea para la carga directa de crudo a la unidad U-2100 de la Gerencia Refinería Barrancabermeja.

1.2 Objetivos Específicos.

Analizar por simulación una base de datos de la estrategia de cargue actual a la U-2100, validando los resultados de simulación y estableciendo los valores de diseño para la alternativa de cargue directo.

Diseñar la alternativa de cargue directo con mezclador estático en línea, por medio de las ecuaciones de balance de masa, balance de energía mecánica y ecuaciones semiempíricas, definiendo los tamaños de los equipos y las pérdidas de presión respectivas.

Validar por simulación una estrategia de control para la alternativa de cargue directo, definiendo los parámetros de los controladores que permitan la consecución de una condición operacional estable.

2. Marco de referencia

2.1 Marco Teórico

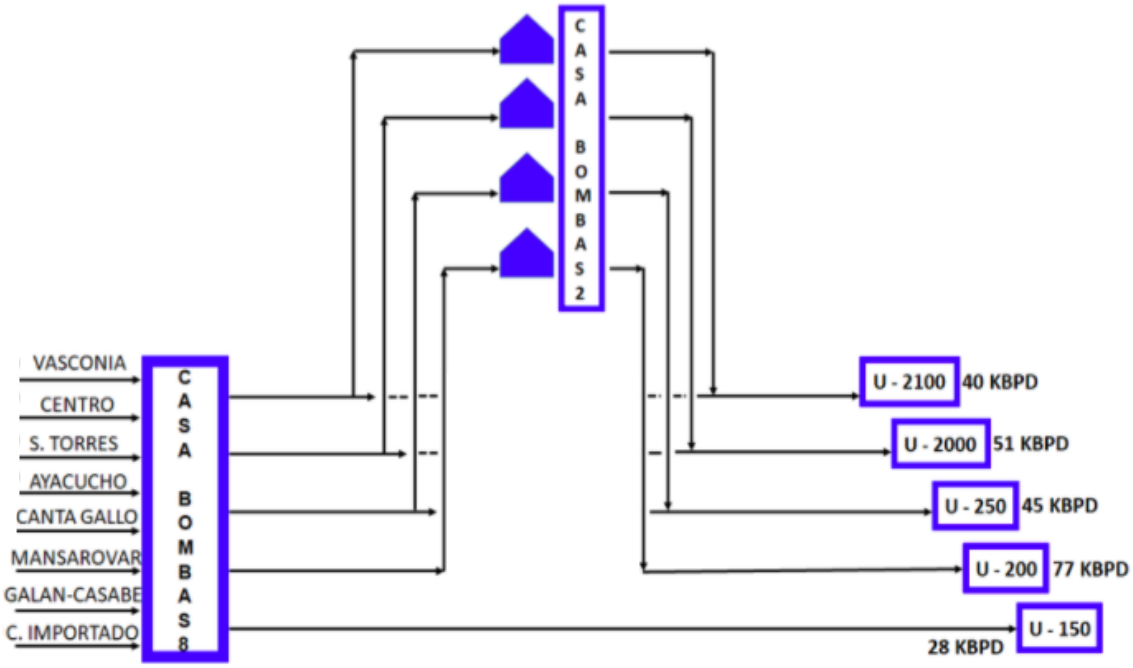
2.1.1 Carga de crudos en la GRB.

La mezcla o *blending* de crudos en las refinerías se efectúa para obtener los flujos de alimentación programadas como carga a las unidades de destilación de crudos (CDU). Estas mezclas se realizan en proporciones volumétricas de los diferentes crudos, alcanzando las propiedades deseadas como °API, %evaporados y viscosidad. Cada CDU considera límites para las propiedades, que deben ser seguidas para obtener los rendimientos según diseño y mantener la integridad de la operación. El *blending* de crudos en la GRB se efectúa en la sección denominada Casa Bombas 8 (CB8), la cual recibe los crudos enviados desde los campos del país. Los crudos mezcla generados (mezcla pesada, mezcla liviana, mezcla Cusiana y mezcla parafínica) son enviados a 4 tanques de alimentación de crudos (K-801, K-802, K-803, K-822) localizados en la sección CB2. De estos tanques, los crudos de mezcla son cargados por gravedad a las respectivas CDU; la unidad U2100, recibe crudo liviano. La Figura 1 representa las líneas y las secciones implicadas en la carga actual de crudos a las CDU en la GRB. El esquema de carga mostrado en la Figura 1 exhibe que el único cargue que no implica tanque de mezcla (inventario) corresponde al cargue a la U-150. Los tanques de mezcla de CB2 dirigen el crudo por gravedad a las CDU U-200, U-250, U-2000 y U-2100. Las facilidades de tubería permiten que los anteriores tanques alimenten varias CDU simultáneamente, con una restricción de tasas de vaciado (por presión

mínima de salida). Con lo anterior, los tanques de mezcla de CB2 mantienen un inventario de crudo que establece un valor de cabeza neta de presión de succión (NPSH) de las bombas de carga a las CDU. Para asegurar la cabeza mínima en la succión de las bombas de carga de las unidades de refinación se requiere mantener un inventario mínimo para una sola unidad de alrededor de 50 kbbl en cada tanque. Este NPSH se obtiene a expensas de un inventario que no se aprovecha y, además, implica gastos, ya que se debe cancelar impuestos anuales.

Figura 1.

Representación de la carga de crudo a las unidades de destilación en la GRB.



Nota. Tomado de: GRB.

2.1.2 Balance de masa.

Los flujos de crudo que se recibirán en el sistema de mezclado en línea deben satisfacer la ecuación de continuidad. La ecuación de continuidad es una representación del principio de conservación de la masa (Çengel & Cimbala, 2006); esta ecuación puede ser representada por,

$$\sum \rho_i \vartheta_i A_i = \rho_m \vartheta_m A_m \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde, ρ_i, u_i, A_i corresponden a la densidad, la velocidad y al área transversal del flujo transportado por la línea *i*; el subíndice *m* hace referencia al flujo mezcla. La ecuación 1 establece una restricción de los valores de velocidad y área transversal de flujo.

2.1.3 Balance de energía mecánica

La energía mecánica o externa (cinética + potencial + presión + trabajo de ejes) se deriva de la aplicación de la primera ley de la termodinámica en un sistema cerrado, que puede intercambiar energía mediante transferencia de trabajo (Çengel & Cimbala, 2006). El balance de energía mecánica considera la pérdida de energía mecánica por irreversibilidades debidas a la fricción y a cambios bruscos de áreas transversales. La expresión de este balance aplicado al proceso de mezclado corresponde a (Bird y colaboradores, 2006),

$$\sum \dot{m}_i \left(\frac{P_i}{\rho_i} + \alpha_i \frac{{v_i}^2}{2} + g z_i \right) + \dot{w}_{eje} = \dot{m}_m \left(\frac{P_m}{\rho_m} + \alpha_m \frac{{v_m}^2}{2} + g z_m \right) + \dot{E}_{pér} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Donde P_i, z_i corresponden a la presión y la altura del flujo en la posición i. $\dot{w}_{eje}$, $\dot{E}_{per}$ corresponden al trabajo de eje de entrada al sistema y a la energía perdida por las irreversibilidades, respectivamente. La pérdida de energía depende de la longitud y diámetro de la tubería, del tipo

de accesorio y del tamaño y la constitución interna de los equipos. Usualmente, estas pérdidas son expresadas en términos de las proporciones del sistema (tubería, accesorios y equipos) y del número adimensional Reynolds (Re), el cual relaciona las fuerzas viscosas o de fricción y las fuerzas inerciales que afectan el régimen de movimiento del fluido (Bird y colaboradores, 2006). En turno, Re se encuentra en términos del factor de fricción (f), que en tuberías, puede ser calculado por medio de correlaciones no lineales como la propuesta por McKeon et al., 2005, según,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.93 log_{10}\left(Re\sqrt{f}\right) - 0.53$$

En accesorios, el factor de fricción pasa a denominarse coeficiente de pérdida; los valores del coeficiente de pérdida se encuentran tabulados en términos de las proporciones del accesorio (Çengel & Cimbala, 2006). En lo referente a equipos, cada casa constructora proporciona las correspondientes pérdidas.

De igual manera, la cabeza neta de succión positiva (NPSH) puede ser calculada con el valor de la presión a la succión de la bomba y la presión de vapor del fluido transportado (Çengel & Cimbala, 2006); la presión de succión es estimada con la ecuación 2, mientras que la presión de vapor puede ser obtenida de los procedimientos descritos por Riazi (Riazi, 2005).

2.1.4 Mezcladores estáticos en línea

Los mezcladores estáticos corresponden a equipos, sin movimiento de rotores, puestos en una línea de flujo, que por medio de obstáculos, proporcionan homogeneidad al respectivo flujo, tanto en composición como en temperatura (Paul *et al*. 2004). La Figura 2 ilustra un mezclador estático tipo Kenics de cintas dobladas; también se tienen mezcladores estáticos tipo empaque y

otros tipos, los cuales son ilustrados en la Figura S1 del Anexo. Debido a los obstáculos del mezclador, el factor de fricción en este equipo es superior al que presenta una tubería vacía. Este incremento en el factor de fricción conlleva a una mejora en la mezcla del respectivo flujo (Etchells y Short, 1988). En estos mezcladores, la pérdida mayoritaria de fricción se debe al rozamiento con la superficie de los obstáculos y una pérdida minoritaria se debe al cambio de dirección del flujo (Paul *et al*. 2004). Por su parte, la selección y el diseño del tipo de mezclador estático dependen de la aplicación. La Figura S2 presenta una guía para la designación del tipo de mezclador según la respectiva aplicación.

Figura 2.

Corte transversal de un mezclador estático tipo Kenics (KMS).

Nota. Tomado de: Paul *et al.* 2004.

La caída de presión en un mezclador estático puede ser calculada con el parámetro, K, el cual es definido como la relación entre la caída de presión en el mezclador y la caída de presión en una tubería vacía, los dos de las mismas dimensiones, según (Paul *et al*. 2004),

$$K = \frac{\Delta P_M}{\Delta P_{Tv}} \qquad \text{(Ec. 4)}$$

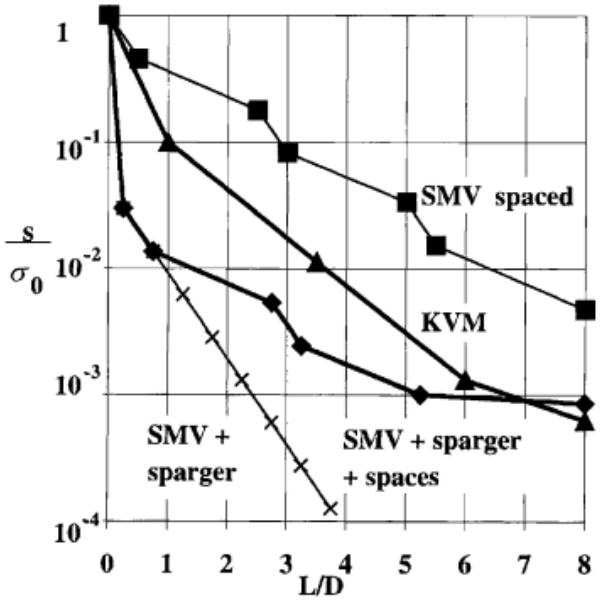
Donde, ΔP_M y ΔP_{Tv} son la caída de presión en el mezclador y en la tubería vacía. Los valores del parámetro K dependen del tipo de mezclador y del régimen de flujo; estos valores pueden ser consultados en la Figura S3. Por su parte, la caída de presión del fluido en la tubería vacía puede ser calculada con, (Ec. 5)

$$\Delta P_{Tv} = 4f\frac{L}{D}\rho\frac{v^2}{2}$$

Donde, f es el factor de fricción (dependiente de *Re* como se muestra en la Ec. 3), *L* y *D* son la longitud y el diámetro de la tubería, ρ es la densidad del fluido y v es la velocidad del flujo. Proveedores de mezcladores estáticos, así como investigadores han propuesto diferentes ecuaciones para el cálculo de la caída de presión (ver Ghanem *et al*. 2014 y Hosseini *et al*. 2018). Por otra parte, respecto al tamaño del mezclador estático, la relación entre longitud a diámetro estático puede ser disminuida con la adición de un aditivo de mezclado, como se ilustra en La Figura 3; en esta figura, la relación entre el coeficiente de variación (S) y el grado de mezcla inicial (σ_0) presenta una tendencia decreciente con el aumento en la longitud del mezclador para un volumen de aditivo del 1%, en dos tipos de mezcladores, KVM y SMV.

Figura 3.

Homogeneidad de mezcla para flujo turbulento en mezcladores estáticos tipo SVM y KVM, con adición de 1%vol de aditivo.



Nota. Tomado de: Paul *et al.* 2004.

El grado de mezcla inicial (σ_0) se encuentra en términos de la concentración inicial del aditivo (Cv), según (Paul *et al*. 2004),

$$\sigma_0 = \left(\frac{1 - Cv}{Cv}\right)^{0.5} \quad \text{(Ec. 6)}$$

Con esta relación inversa, a menor concentración del aditivo, mayor longitud del mezclador estático. Una longitud suficiente de determinado tipo de mezclador conducirá a una mayor mezcla, lo cual está expresado matemáticamente por valores bajos de la relación S/σ_0. Las curvas de la Figura 3 son expresadas de manera aproximada por la relación,

$$\frac{S}{\sigma_0} = \frac{K_i^{\frac{L}{D}}}{\sigma_0} \qquad \text{(Ec. 7)}$$

Donde los valores de K_i para diferentes mezcladores son presentados en la Figura S3. Con los datos del coeficiente K_i, la Ec. 7 puede ser utilizada en el cálculo de la longitud del mezclador. El coeficiente de variación (S) representa el grado de mezcla a la salida del mezclador estático; a menor valor de este parámetro, mayor la calidad de la mezcla resultante. Un valor de $S = 0{,}001$ significa que el 99,9% de las muestras tomadas a la salida del mezclador reportarán una concentración entre el ±0,2% del promedio matemático esperado (Paglianti, 2008; Statiflo, 2015). Una revisión de los parámetros que influyen en la caída de presión y en el desempeño y en la longitud de los mezcladores estáticos en línea puede ser consultada en los trabajos de Paul *et al*. (2004), Paglianti (2008), Meijer *et al*. (2012), Ghanem *et al*. (2014) y Hosseini *et al*. (2018).

2.2 Estado del arte

La búsqueda de literatura se enfocó en tópicos relacionados con líneas de transporte de crudos y derivados. Las siguientes referencias fueron encontradas en esta búsqueda:

- Tarifa y colaboradores, 2007, analizaron una red de transporte de gas del petróleo, utilizando el programa Hysys. Los autores compararon los resultados de Hysys con cálculos manuales, reportando que los resultados fueron similares, con la ventaja en Hysys de que las iteraciones manuales son evitadas. Los autores concluyeron, basados en Hysys, que la red en análisis se encontró en su máxima capacidad de operación.

- Akintola & Giwa, 2009, describieron una metodología para la estimación del diámetro óptimo de tubería, considerando régimen de flujo turbulento. La metodología consideró los costos

de instalación y mantenimiento del sistema de tubería. Los autores programaron la metodología en el lenguaje Visual C, validando sus resultados con un caso de estudio hipotético.

- Nekhoogadirli y colaboradores, 2014, presentaron un modelo para el diseño de líneas de distribución de crudos. Los autores consideraron un modelo de optimización para los costos totales de distribución, restringidos mediante los balances de masa y de los rendimientos de operación. Los autores aplicaron el modelo en el análisis de una refinería con opciones de crudo, 12 unidades de procesamiento y 12 productos de distribución; según los autores, el modelo reportó rutas con bajos costos de operación.

- Morrison y colaboradores, 2018, propusieron un modelo de distribución de crudos basado en reglas de priorización y costos de bombeo. Los autores expusieron una estrategia de priorización de rutas.

De las referencias anteriores se tiene que la mayoría de los análisis fueron realizadas con base en las ecuaciones de continuidad y energía mecánica. En algunas referencias aplicaron las ecuaciones por medio de Aspen Hysys. Los análisis también consideraron la aplicación de las estrategias de minimización de las pérdidas de energía mecánica. Es importante mencionar que no se encontraron referencias en la literatura abierta, resolviendo el problema del cargue directo de crudos a unidades de destilación.

3. Metodológica

Las actividades propuestas para el cumplimiento de los objetivos del este documento son:

3.1 Recolección de datos históricos de la operación de cargue actual.

Los datos de flujo y presión del sistema de carga actual a la U-2100 serán recopilados del sistema de administración de datos de la GRB, denominado *PI Data Link*. Estos datos serán depurados, descartando las muestras con valores vacíos o alfanuméricos.

3.2 Análisis de los históricos

Los datos históricos serán analizados con estadística para definir los intervalos de variación. La desviación estándar de los datos será utilizada para descartar valores de flujo y presión de carácter atípico; estos valores pueden provenir de sensores con falta de calibración o errores en las mediciones manuales o de operación con fallas.

3.3 Validación por simulación.

Una simulación en Aspen Hysys fue desarrollada, considerando la estrategia actual de cargue por gravedad a la U-2100. La simulación fue validada con los datos históricos de la actividad anterior.

3.4 Diseño de la alternativa de cargue directo

El sistema de cargue directo fue diseñado, considerando las ecuaciones de la sección 2.1. El mezclador estático en línea y la tubería con sus accesorios fueron diseñados para el sistema de cargue directo a la U-2100.

3.5 Proposición de un lazo de control

Un lazo de control por realimentación o *feedback* fue propuesto para la alternativa de cargue directo, con el objetivo de mantener la presión de succión en la condición de diseño. Asimismo, un lazo de control *on/off* fue propuesto para la activación del cargue por gravedad, ante suspensión del flujo en la línea de cargue directo.

3.6 Simulación del esquema de control

La alternativa de cargue directo, con los dos lazos de control fueron codificados en Aspen Hysys; el PFD de la alternativa fue construido con base en la simulación del sistema actual (actividad 3.3).

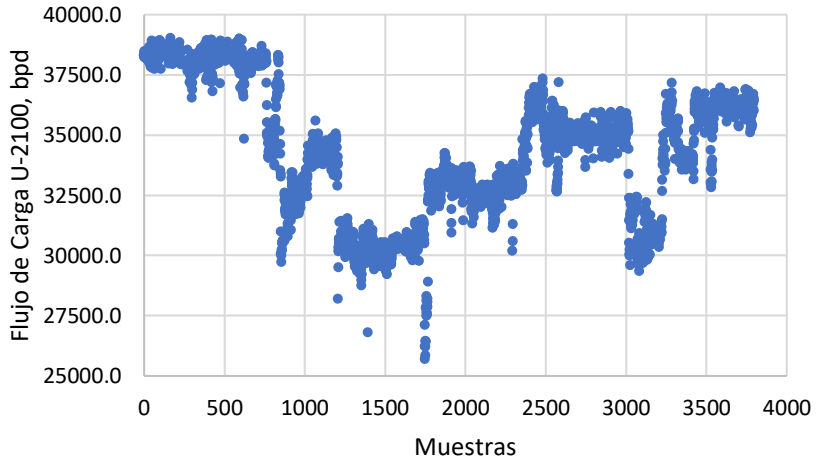
4. Análisis de resultados

4.1 Históricos de Carga

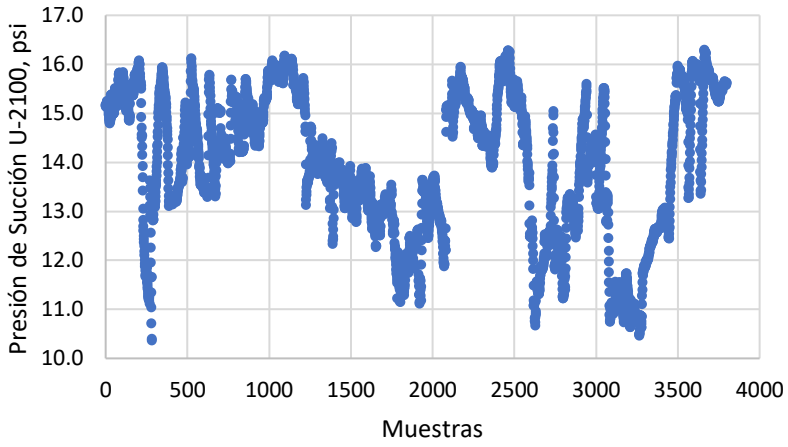
Los históricos de carga a la U-2100 correspondieron a flujos y presiones de succión de la carga a la U-2100, en el periodo comprendido entre diciembre 2021 y mayo 2022, medidos cada hora (3794 muestras). La Figura 4 presenta las dispersiones de las variables flujo de carga y presión de succión, según históricos. Los estadísticos descriptivos para estas variables son mostrados en la Tabla 1.

Figura 4.

Dispersión flujo de carga y presión de succión a la unidad U-2100 entre diciembre 2021 y mayo 2022.



(a) Flujo de Carga a U-2100



(b) Presión de Succión a U-2100

Tabla 1.

Estadísticos para el flujo de carga y la presión de succión a la U-2100 entre diciembre 2021 y mayo de 2022

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Error Típico
Flujo Carga U-2100, bpd	25687	39928	34344	2740	44
Presión Succión, psi	10.40	16.30	14.00	1.46	0.02

Según las Figuras 4a,b y la Tabla 1, la unidad presentó continuidad en la operación en la ventana de tiempo de las muestras, mostrando rangos de carga entre 25687 y 39002 bpd y 10.40 y 16.3 psi. Los valores máximos fueron asumidos en el diseño del sistema de cargue directo. De otro lado, la Figura 5 muestra que no existe correlación estadística entre la presión de succión a la U-2100 y el flujo de carga a la U-2100. Esto puede deberse a diversas condiciones operacionales en la GRB y en los equipos que se encuentran desde el tanque de carga a la bomba de carga a la U-2100, que ocasionan pérdidas y aumentos de presión. En especial, las proporciones de crudos de alimentación, la altura de crudo en el tanque de carga y las aperturas en las válvulas de regulación

en la sección de carga a la unidad presentan fluctuaciones constantes, debido a los eventos diarios operativos (sensores con errores o descalibrados, desvío de flujos de crudo, aumento en los inventarios de otros tanques, cambios en la temperatura del crudo en el tanque, incrementos en los flujos de crudo de alimentación a la GRB, perturbaciones en el suministro de energía y variaciones en los desempeños de los equipos de separación, entre otros).

Debido a lo anterior, los datos de presiones, flujos y alturas en tanques recolectados de los sensores de la sección de mezcla de crudos (Casa Bombas) para el cargue a la U-2100 fueron validados por medio de una simulación codificada en el programa Aspen Hysys v10. La Figura 6 presenta el diagrama de flujo de procesos o PFD codificado en Aspen Hysys. En el PFD se consideran los tanques de premezclas Única (K-961), LCT (K-3852) y Ácida (K-800), así como las dimensiones de las tuberías y los accesorios, los equipos de bombeo y las divisiones y mezclas de corrientes para la formación de la mezcla Nafténica y la carga de alimentación a la U-2100.

Figura 5.

Dispersión flujo de carga vs presión de succión a la unidad U-2100 entre diciembre 2021 y mayo 2022.

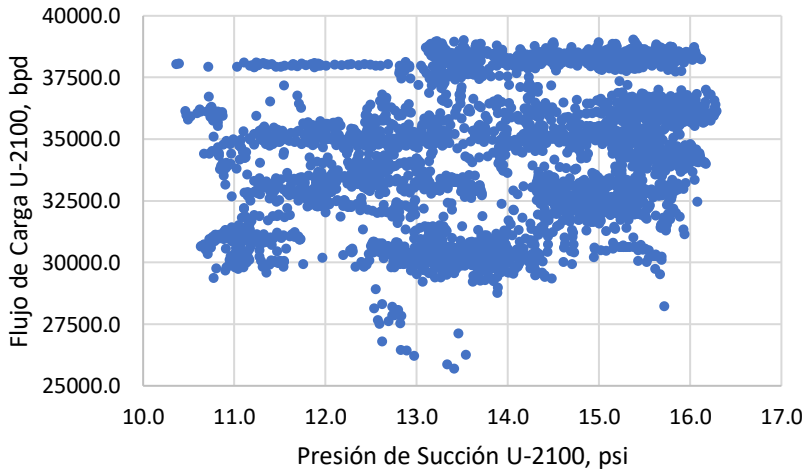
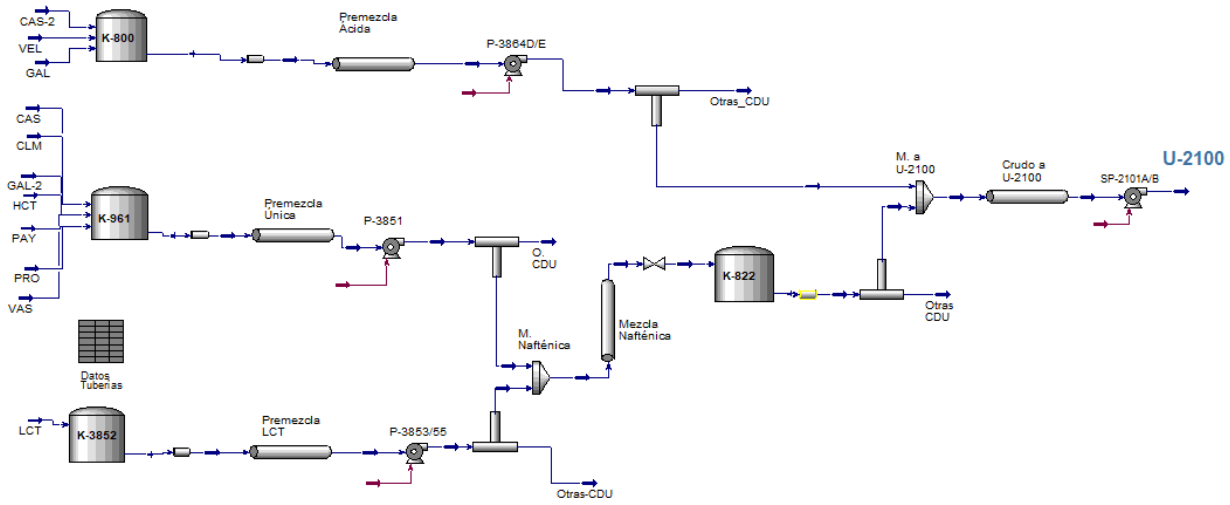


Figura 6.

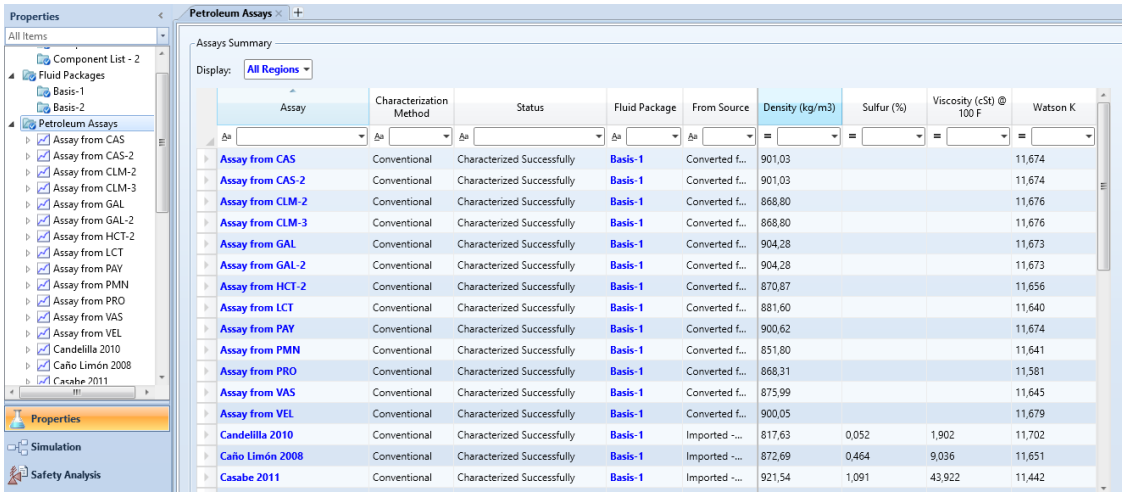
Diagrama de flujo de proceso (PFD) del cargue por tanque a la U-2100, codificado en Aspen Hysys v10



Los *assays* de los crudos que se cargan en la GRB fueron codificados en la sección *Properties* de Aspen Hysys; estos *assays* fueron suministrados por el Departamento de Planeación de la GRB; la Figura 7 presenta la sección *Properties* con los *assays* codificados. El paquete de fluidos Peng-Robinson fue seleccionado para la simulación de las propiedades de los crudos y sus mezclas. Los históricos de alturas en tanques y flujos fueron utilizados como datos de entrada (Figura 8); las simulaciones fueron ejecutadas por medio de un código desarrollado en Matlab (ver Anexo). La Figura 7 presenta el gráfico de paridad que compara los históricos de la presión de succión de la P-2101, con la presión predicha por la simulación.

Figura 7.

Sección Properties con los assays de los crudos definidos en Aspen Hysys v10.



Assay	Characterization Method	Status	Fluid Package	From Source	Density (kg/m3)	Sulfur (%)	Viscosity (cSt) @ 100 F	Watson K
Assay from CAS	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	901,03			11,674
Assay from CAS-2	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	901,03			11,674
Assay from CLM-2	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	868,80			11,676
Assay from CLM-3	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	868,80			11,676
Assay from GAL	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	904,28			11,673
Assay from GAL-2	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	904,28			11,673
Assay from HCT-2	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	870,87			11,656
Assay from LCT	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	881,60			11,640
Assay from PAY	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	900,62			11,674
Assay from PMN	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	851,80			11,641
Assay from PRO	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	868,31			11,581
Assay from VAS	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	875,99			11,645
Assay from VEL	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Converted f...	900,05			11,679
Candelilla 2010	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Imported -...	817,63	0,052	1,902	11,702
Caño Limón 2008	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Imported -...	872,69	0,464	9,036	11,651
Casabe 2011	Conventional	Characterized Successfully	Basis-1	Imported -...	921,54	1,091	43,922	11,442

Figura 8.

Variación de la altura del tanque K-822 en el periodo entre diciembre 2021 y mayo 2022.

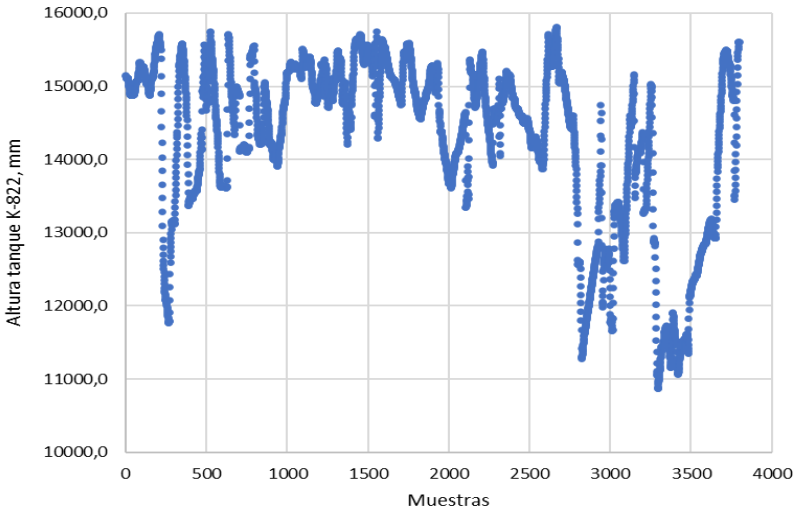
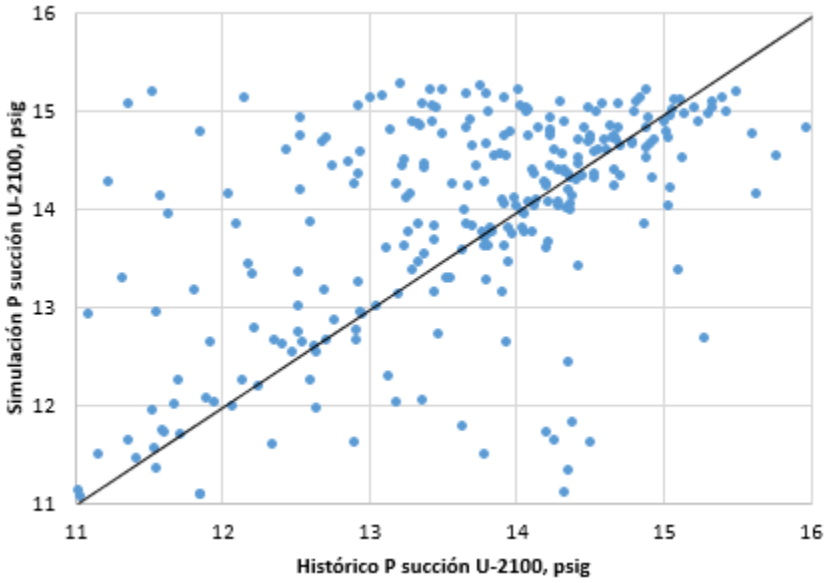


Figura 9.

Gráfico de paridad que compara los históricos de la presión de succión de la P-2101 con la obtenida por simulación con el PFD codificado en Aspen Hysys v10.



Según la Figura 9, los puntos de la distribución presión de succión simulación vs presión de succión históricos se distribuyen de manera aleatoria en los valores entre 11 y 16 psig. La concentración de los puntos se encuentra cercana a la línea de 45°. La distribución de puntos fue comparada utilizando los estadísticos χ^2 y el error relativo promedio; el estadístico χ^2 se encuentra definido según la expresión (Rebba *et al.*, 2006; Pham *et al*., 2017),

$$\chi^2 = \sum \frac{(y_i^H - y_i^M)^2}{y_i^M} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

Donde, los términos y_i^H, y_i^S hacen referencia a los valores de la variable de salida según históricos y según simulación, respectivamente. El valor calculado para χ^2 con la Ec. 4 es comparado con la *pdf* (función de densidad de probabilidad) $\chi^2_{\alpha,df}$, al 95% de confianza (α) y

grados de libertad $df = n - 1$, con n igual al número de muestras. Por su parte, el error relativo promedio es definido como,

$$error = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|y_i^H - y_i^M\right|}{y_i^H} * 100 \qquad \text{(Ec. 9)}$$

Según los valores de α y *df*, el valor límite de la función de densidad de probabilidad es $\chi^2_{\alpha,df} = 409.5$, mientras que la Ec. 4 reporta χ^2 = 98.45. Por su parte, el error relativo reporta el valor de 10%, siendo el límite de aceptación el 5%. El menor valor del estadístico χ^2 respecto de la *pdf* $\chi^2_{\alpha,df}$ y el incumplimiento del límite superior del error relativo sugieren que la simulación reproduce los valores históricos a nivel semicuantitavo. Con lo anterior, la simulación desarrollada reproduce las tendencias de la operación de carga de crudos para la U-2100.

4.2 Alternativa de Cargue Directo

4.2.1 Diseño del mezclador estático en línea

El diámetro para la tubería de la línea de mezclado de crudos fue definido como los diámetros actuales de las tuberías; con esto, el diámetro del mezclador estático corresponde a 10". El flujo que pasa por la línea corresponde a 40 kbpd de crudos con bajo índice de mezcla (premezclas Ácida, Única y Nafténica), con propiedades promedio reportadas en la siguiente tabla.

Tabla 2.

Propiedades y características de la línea de flujo del mezclador estático para U-2100

API	Densidad, g/mL	Viscosidad, cP	Diámetro, in	Flujo, kbpd	Re
25	0.904	50 cP @ 100 °F	10	40	6760

Asumiendo una concentración de aditivo de $Cv = 0{,}1$, la Ec. 6 reporta un valor de $\sigma_0 = 3$. El mezclador tipo KMS fue seleccionado debido a su bajo valor de coeficiente de mezcla $K_i T = 0.5$ (K_i para condición turbulenta, Figura S3) y su difundida aplicación industrial (ref.). Con esto, la Ec. 7 se expresa como,

$$\frac{S}{\sigma_0} = \frac{0.5^{L/10}}{3} \qquad \text{(Ec. 10)}$$

La Ec. 10 define la variación del coeficiente de variación (S) y el grado de mezcla inicial (σ_0) con la longitud del mezclador estático. La Figura 10 presenta la variación de la relación S/σ_0 con la longitud; según esta figura, para una longitud de 50", la tendencia de S/σ_0 muestra un cambio de pendiente, disminuyendo la caída en su valor. Para un valor de 100" en la longitud, el coeficiente S presenta un valor cercano a 0,001, el cual se considera como un valor adecuado para la mezcla turbulenta en mezcladores estáticos (Paul *et al*. 2004). Con esta longitud para el mezclador estático, la caída de presión en el mismo, calculado por las Ec. 4 y 5, corresponde a 7,2 psi (Figura 10); la Tabla 3 resume las dimensiones y la caída de presión del mezclador estático.

Figura 10.

Variación de la relación coeficiente de variación a grado de mezcla inicial (eje izquierdo) y la caída de presión en el mezclador (eje derecho), con respecto a la longitud del mezclador estático tipo KMS, según la Ec. 10.

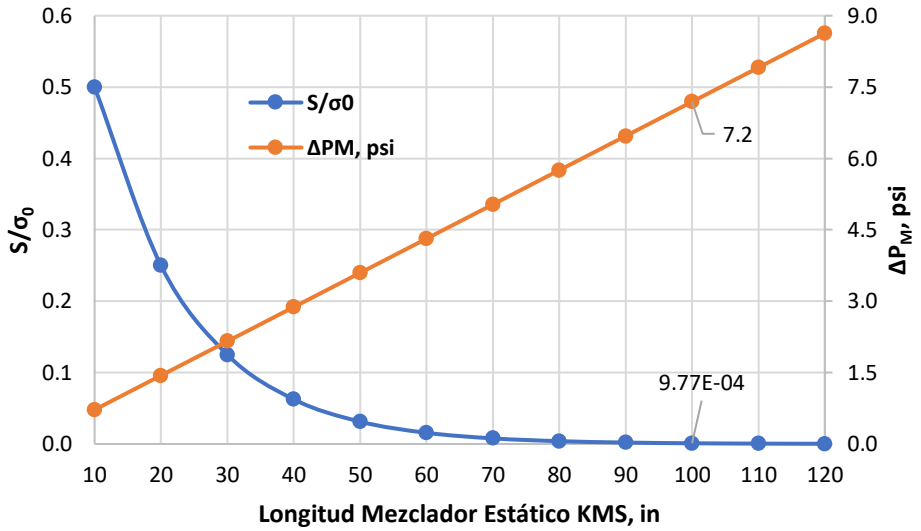


Tabla 3.

Dimensiones y caída de presión en el mezclador estático KMS para U-2100

Diámetro, in	Longitud, in	Re	f	ΔP_{Tv}, psi	K_T	ΔP_M, psi
10	100	6760	0,0087	0,048	150	7,2

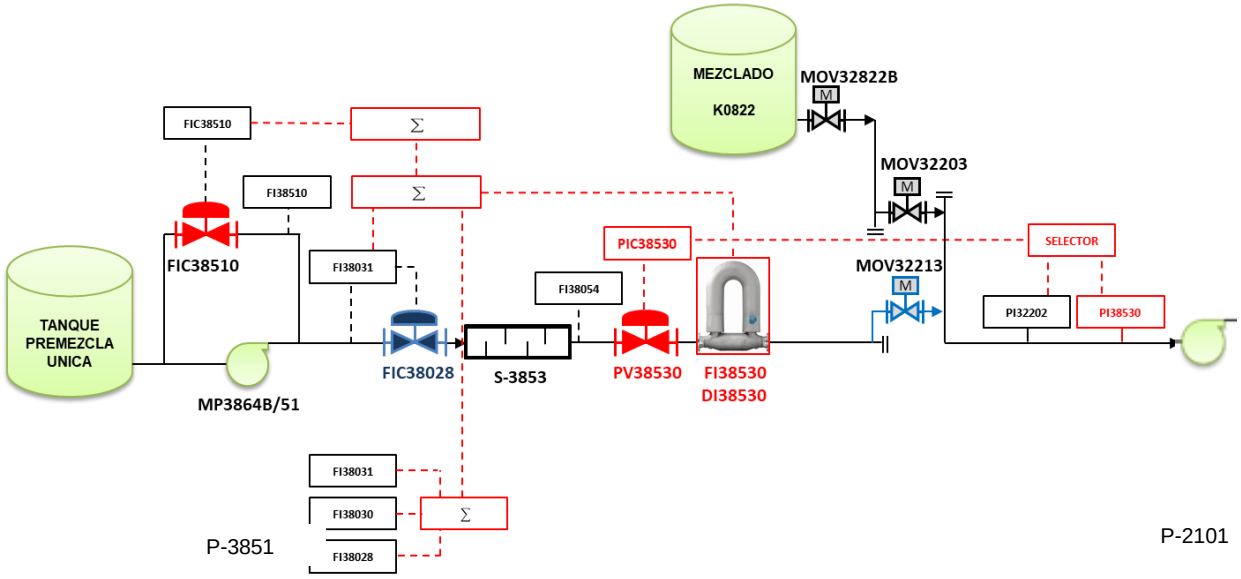
4.2.2 Disposición de líneas, accesorios y mezclador en línea

La Figura 11 ilustra la configuración propuesta para el cargue directo desde CB1, tanque de Mezcla Única, a la U-2100. En esta figura, se consideran las bombas P-3851 y P-2101 para la carga directa a la U2100; estas bombas son utilizadas actualmente para el cargue por tanque a la U-2100, siendo la primera utilizada en el envío de crudo del tanque de Premezcla Única (PMU) al

tanque de carga K-0822, mientras la P-2101 es utilizada para la carga de crudo a la torre atmosférica T-2101. En la configuración propuesta se mantienen las ubicaciones de las dos bombas, P-3851 (salida del tanque de PMU) y P-2101 (carga T-2101). En la Figura 11 se muestra que la línea de salida de la P-3851 recibirá los flujos de los tanques de Premezcla LCT y Premezcla Ácida, para dirigirlos al mezclador en línea con nomenclatura S-3853, y de este a la U-2100. El tanque K-822 y su línea de alimentación son mostrados en la configuración, como opción operacional de cargue a la U-2100.

Figura 11.

Propuesta de configuración sistema de cargue directo a la U-2100.



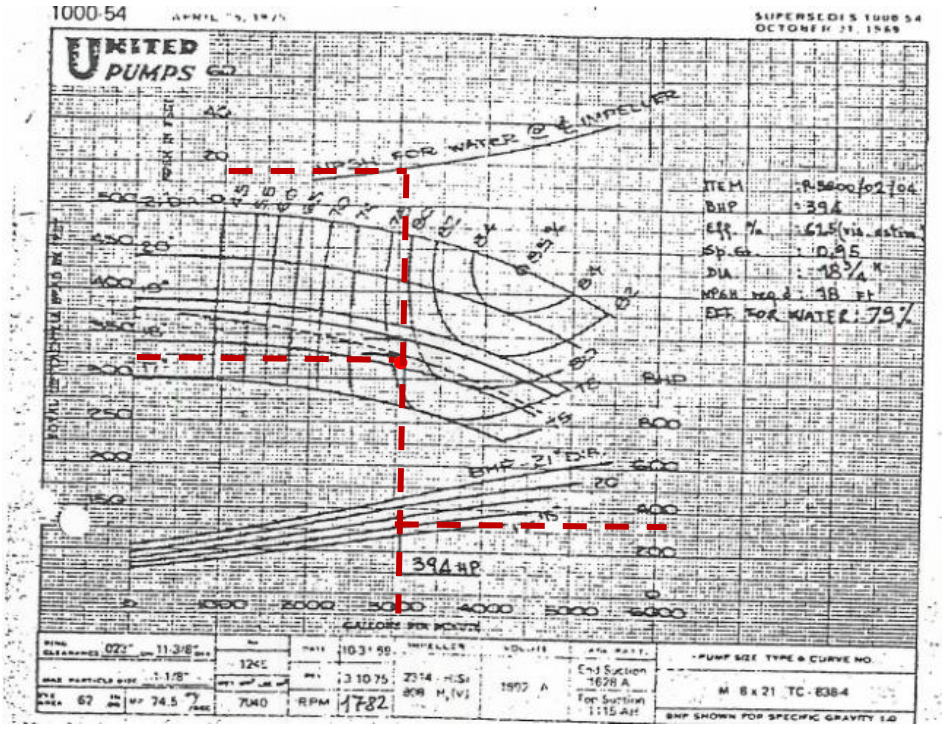
Nota. Tomado de: GRB, informe interno.

Para disponer de una medición de flujo confiable que permita realizar el control de los porcentajes de mezcla de los demás componentes y adicionalmente registrar la densidad en línea para obtener una mezcla estable a la unidad, se instala el FI-38530 tipo Coriolis después del

mezclador S-3853 (ver ubicación propuesta en la Figura 8). La Figura 12 presenta la curva para la P-3851 operando con agua; la bomba presenta una antigüedad de 53 años, por lo cual, la imagen tiene baja definición. El punto de operación es localizado con un círculo rojo, mientras las líneas segmentadas definen las lecturas para el BHP, la eficiencia, la cabeza de la bomba y el NPSH requerido. Según lo anterior, la bomba opera con un impulsor de 18.72", generando un flujo de 3000 gpm (137,1 kbpd), una eficiencia con agua de 79%, una cabeza de agua de 330 ft, un BHP de 394 y un NPSH requerido de 18 ft. De igual manera, la presión de descarga de la P-3851 se encuentra en el rango 90-160 psig. Otra información de relevancia para el cargue directo corresponde a las capacidades de los tanques; el tanque de PMU (K-961) tiene una altura máxima de 14 m, con una capacidad entre 34,5 y 190 kbbl; el K-822 tiene una capacidad neta de 133 kbbl.

Figura 12.

Curva de la bomba P-3851.



Nota. Tomado de: GRB, informe interno.

De otro lado, la línea de tubería desde la descarga de la P-3851 (Figura 11) al mezclador S-3853 presenta las siguientes características: sección de tubería de longitud 0,145 km para un diámetro de 10”, 8 válvulas de compuerta, 3 secciones de contracción y expansión, 10 codos de 90° de 10” y sección de tubería de longitud 0,017 km para un diámetro de 12”. La distancia a partir de la salida del mezclador en línea S-3853 (Figura 11) hasta el manifold de crudos en Casa Bombas 2 (Figura 1), comprende 1,4 km, según mediciones tomadas con la aplicación Google Maps®; la Figura 13 presenta la medición realizada con esta aplicación. Con esta distancia, la tubería y los accesorios que conectan el S-3853 y el manifold de crudos son: 1.4 km de Tubería 10”, 1 válvula de 14”, 5 válvulas de 10”, 2 válvulas de 12”, 34 codos de 90° de 10”, 2 codos de 45° de 14”, 1 reducción de 12” a 10” y 1 expansión de 10” a 14”. La Tabla 4 resume las líneas de tubería desde la descarga de la P-3851 y desde la descarga del mezclador S-3853, la cuales comprende la alternativa de carga directa a la U-2100.

Figura 13.

Distancia definida por Google Maps® para la sección desde la salida del mezclador S-3853 al manifold de Casa Bombas 2; aplicación consultada el día 25 de mayo de 2022.

En la Tabla 4 también se reportan la presión de entrada, la presión de salida y la caída de presión total de la línea que comprende la alternativa de cargue directo a la U-2100. Los cálculos fueron realizados por medio del objeto *Pipe Segment* de Hysys (Figura 14).

Tabla 4.

Líneas de tuberías de la alternativa de cargue directo a la U-2100.

	Línea descarga P-3851	**Línea descarga S-3853**
Flujo estándar, kbpd	40	40
Longitud tubería, km (diámetro)	0,145 (12”), 0,017 (10”)	1,4 (10”)
Accesorios	10 Codos de 90° 8 Válvulas de compuerta 3 Contracciones y expansiones 3 T de entrada de crudos.	34 Codos de 90° 2 Codos de 45° 8 Válvulas de compuerta 1 Reducción y expansión
Velocidad, m/s	1,45	1,45
Presión de entrada línea (psig)	120	101,2
Presión de salida línea (psig)	101,2	60,6
ΔP, psi	18,8	40,6

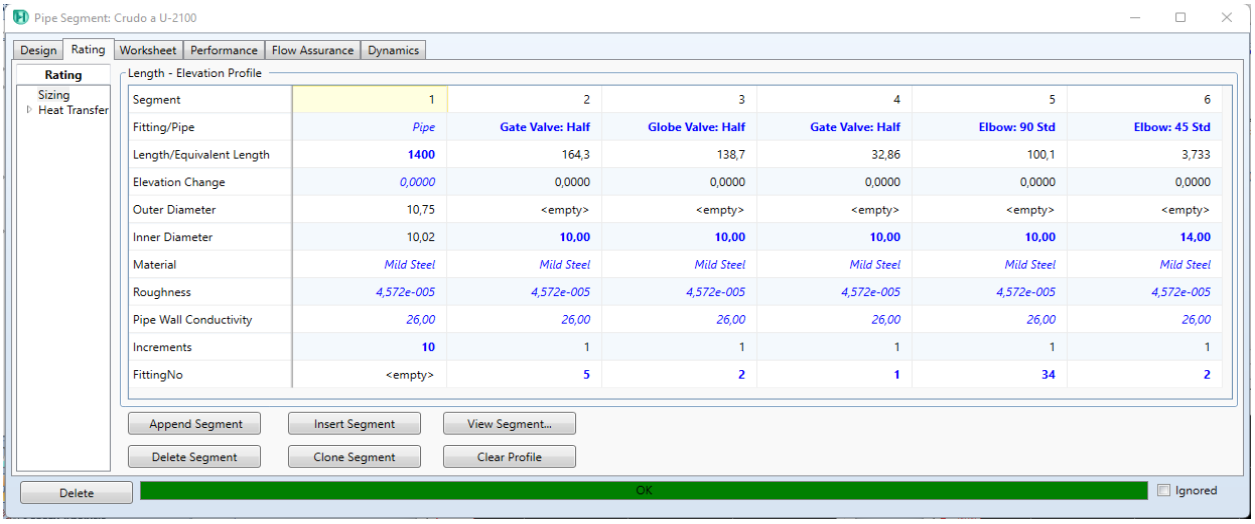
En esta figura se presenta el PFD de la alternativa de cargue directo a la U-2100. Este PFD considera líneas de entrada de los crudos antes del mezclador (línea de mezcla o *blending*); esta línea de entrada presenta una longitud de 14 m para un diámetro de 10”, con 4 válvulas de compuerta y 1 válvula de globo. Según la Tabla 4, el flujo de crudo sale de la bomba P-3851 con una presión de 120 psi, reportando una caída de presión de la caída de presión de 18,8 psi, la cual incluye la línea de *blending*. La segunda línea recibe el flujo de crudos a una presión de 101,2 psi, pasa este flujo por el mezclador en línea o estático y posteriormente, dirige este flujo a la U-2100 (succión P-2101). La caída de presión en el mezclador estático es de 7,2 psi (Tabla 3), lo cual corresponde a un 17,7% de la caída en esta línea; la caída de presión desde la salida del mezclador hasta la succión de la P-2101 es de 33,6 psi, representando un 82,3% de la caída de la línea. La presión de succión de la P-2101 obtenida por cargue directo es superior a la reportada por los históricos (sección 4.1), cumpliendo los requisitos de integridad del equipo.

Con lo anterior, el cargue directo presenta una caída de presión total de 59,4 psi, desde la descarga de la P-3851 a la succión de la P-2101 (bomba de carga a la U2100); este valor energético

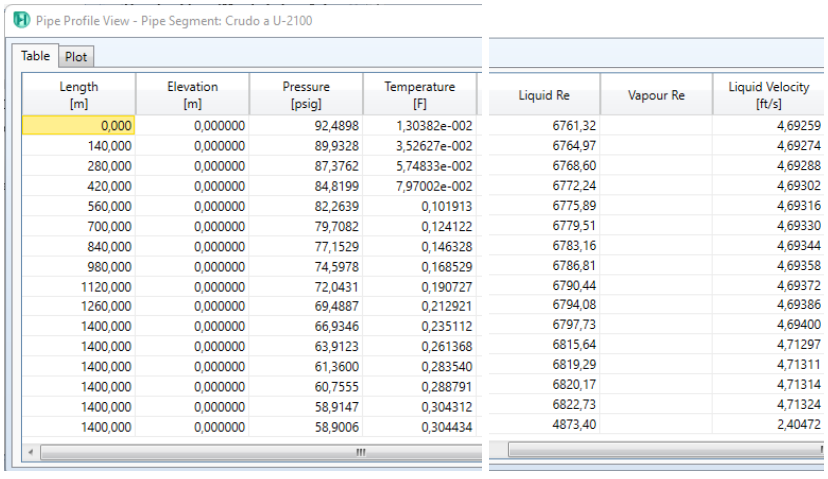
es suministrado por la P-3851. La caída de presión en el mezclador es el 12,1% de la caída total en la alternativa de cargue directo; los otros porcentajes corresponden a 31,6% de la línea de entrada de crudos (*blending*) y a 56,3% de la línea de salida del mezclador. Por otra parte, adecuaciones mecánicas requeridas para la alternativa son:

Figura 14.

Ventana de Pipe Segment codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo.



Segment	1	2	3	4	5	6
Fitting/Pipe	Pipe	Gate Valve: Half	Globe Valve: Half	Gate Valve: Half	Elbow: 90 Std	Elbow: 45 Std
Length/Equivalent Length	1400	164,3	138,7	32,86	100,1	3,733
Elevation Change	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Outer Diameter	10,75	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>
Inner Diameter	10,02	10,00	10,00	10,00	10,00	14,00
Material	Mild Steel	Mild Steel	Mild Steel	Mild Steel	Mild Steel	Mild Steel
Roughness	4,572e-005	4,572e-005	4,572e-005	4,572e-005	4,572e-005	4,572e-005
Pipe Wall Conductivity	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
Increments	10	1	1	1	1	1
FittingNo	<empty>	5	2	1	34	2



Length [m]	Elevation [m]	Pressure [psig]	Temperature [F]	Liquid Re	Vapour Re	Liquid Velocity [ft/s]
0,000	0,000000	92,4898	1,30382e-002	6761,32		4,69259
140,000	0,000000	89,9328	3,52627e-002	6764,97		4,69274
280,000	0,000000	87,3762	5,74833e-002	6768,60		4,69288
420,000	0,000000	84,8199	7,97002e-002	6772,24		4,69302
560,000	0,000000	82,2639	0,101913	6775,89		4,69316
700,000	0,000000	79,7082	0,124122	6779,51		4,69330
840,000	0,000000	77,1529	0,146328	6783,16		4,69344
980,000	0,000000	74,5978	0,168529	6786,81		4,69358
1120,000	0,000000	72,0431	0,190727	6790,44		4,69372
1260,000	0,000000	69,4887	0,212921	6794,08		4,69386
1400,000	0,000000	66,9346	0,235112	6797,73		4,69400
1400,000	0,000000	63,9123	0,261368	6815,64		4,71297
1400,000	0,000000	61,3600	0,283540	6819,29		4,71311
1400,000	0,000000	60,7555	0,288791	6820,17		4,71314
1400,000	0,000000	58,9147	0,304312	6822,73		4,71324
1400,000	0,000000	58,9006	0,304434	4873,40		2,40472

- Cambio de tubería menores asociado a instalación de válvulas de control e instrumentación, configuración de *interlocks*, nueva válvula de control de presión con característica *fail Look*, nuevo medidor de flujo tipo Coriolis, nuevo transmisor de presión redundante, intercambiar las flautas de flujo FIC38028 y FIC38029 para garantizar el flujo requerido de 38.000 BPD.
- Nueva válvula de control de 4" para cambiar la FV-38510.
- Se deben incluir facilidades para el drenaje del producto en la puesta en servicio del medidor de flujo FI38530 y actividades de mantenimiento futuras, igualmente instalar una facilidad para el retiro e instalación con planta en operación en caso de cambio o calibración. Para este caso se debe garantizar una medición equivalente y confiable del medidor tipo platina FI-38054.
- Nueva platina de orificio para garantizar el flujo mínimo de la MP3851 en 2900 BPD.
- Configuraciones en el DCS asociados al cargue directo de la U2100.

4.3 Simulación Alternativa de Cargue Directo

La alternativa de cargue directo requiere la configuración de un lazo de control para el flujo de carga a la U-2100, manteniendo la presión de succión a la P-2101 en los límites permisibles (NPSH). Para esto, un lazo de control *feedback* o por realimentación fue codificado en el diagrama de procesos para el cargue directo. El lazo de control cuenta con una lectura de la presión en la succión de la bomba P-2101, con un controlador PID y una válvula instalada después del mezclador en línea S-3853. El control de flujo es realizado de manera implícita por medio del controlador de presión. Es importante mencionar que, a nivel de planta, la instrumentación de

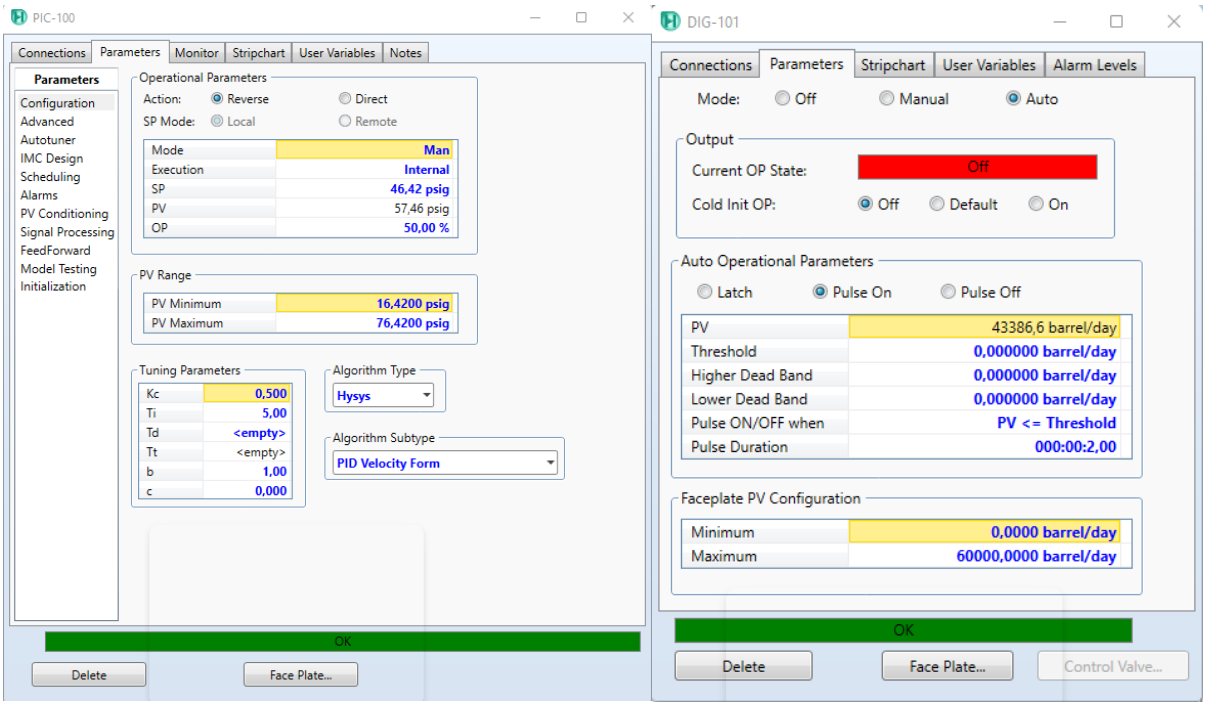
medición y transmisión que se instale en el sistema de cargue directo debe presentar un límite superior en la escala, de por lo menos 60 kbpd o 76 psi, según el caso.

Por otra parte, considerando la confiabilidad e integridad del sistema de control, en caso de disparo del motor de la bomba P-3851, un lazo de control *on/off* fue codificado para el inicio de la carga por gravedad a la U-2100 desde el K-822. Este lazo puede ser instalado en planta, por lo cual se recomienda la instalación de una válvula entre el tanque K-822 y la línea de cargue directo, evitando perturbaciones hidráulicas, disminución de flujo o perdida de presión con impacto en la operación de la U2100.

La estrategia de cargue directo, así como el esquema de control fueron codificados en Aspen Hysys; la validación realizada para la simulación del cargue actual soporta el uso de Aspen Hysys en el análisis de la respuesta del sistema. La Figura 15 muestra las ventanas de los controladores PID y on/off codificados en Hysys. El rango definido para el controlador PID se encuentra entre 16 y 76 psi, con una caída de presión de 14 psi en la respectiva válvula (Figura 15a); esta caída de presión condujo a un amplio flujo de operación. Los parámetros del controlador fueron definidos en K=0.5 %/%, tiempo integral (Ti) = 5 y tiempo derivativo (Td)=0. Para el controlador *on/off*, el estado de arranque fue definido en *off* (válvula con apertura 0%), mientras que la activación de la válvula (apertura 100%) fue establecida en valores de flujo nulo de la línea de cargue.

Figura 15.

Ventanas de los controladores PID y on/off codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo.



La Figura 16 presenta la alternativa de cargue directo a la unidad U-2100 codificada en Aspen Hysys, considerando los controles de presión y *on/off*. En esta figura se puede analizar que la alternativa fue dividida en dos secciones, la sección de alimentación de las premezclas (parte izquierda) y la sección de mezclado y alimentación a la U-2100 (parte derecha). En la sección de alimentación se consideran los equipos de bombeo P-3864, P-3851 y P-3853 las cuales conducen los flujos de premezcla al *blending* y al mezclador estático en línea. La parte derecha considera desde la salida del mezclador estático a la P-2101; sobre esta línea se tiene el control de presión con el PIC-100 y la válvula VLV-104. Asimismo, en esta parte se presenta la alternativa de cargue por gravedad, con el respectivo control *on/off* (DIG-101) y la válvula VLV-105. Las partes derecha

e izquierda se encuentran enlazadas por el cálculo de la caída de presión debida al mezclador estático (Ec. 4); este cálculo es realizado por el *SpreadSheet* (Datos Tuberías).

El código o PFD desarrollado en Aspen Hysys fue utilizado para el análisis de la respuesta de la alternativa de cargue directo, ante perturbaciones en el flujo de salida del mezclador. La Figura 18 muestra la respuesta del sistema en lazo cerrado (control PID en automático) en el inicio de la simulación dinámica; los ejes de esta figura corresponden a presión de succión en P-2101 versus el tiempo en minutos. La primera parte de la respuesta presentada en la Figura 18 corresponde a la estabilización en lazo abierto (PID en automático), con lo cual se llega a una zona de estabilización a la presión de 57 psig; posteriormente, el control PID se activó en automático, mostrando que el lazo *feedback* conduce a la presión de succión al respectivo *set point* (46.6 psig, incluyendo la caída de presión de 14 psi en la válvula de control), para un tiempo de estabilización de aproximadamente 45 min.

El tiempo de respuesta está marcado por el valor bajo de la ganancia proporcional (K=0,5 %/%). Un valor más elevado de ganancia (K=0,5 %/%) condujo a un sistema inestable, marcado por fluctuaciones en valores superiores de 60 psig; la Figura 19 presenta el comportamiento inestable del sistema con un valor de K=1 %/%, después de disminuir a 40% la apertura de la VLV-104, con una activación del controlador en automático. La parte final de la respuesta en la Figura 19 representa la estabilización alcanzada por el sistema ante una sintonización del controlador al valor de K=0,5 %/% y Ti=5 min.

Figura 16.

PFD codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo.

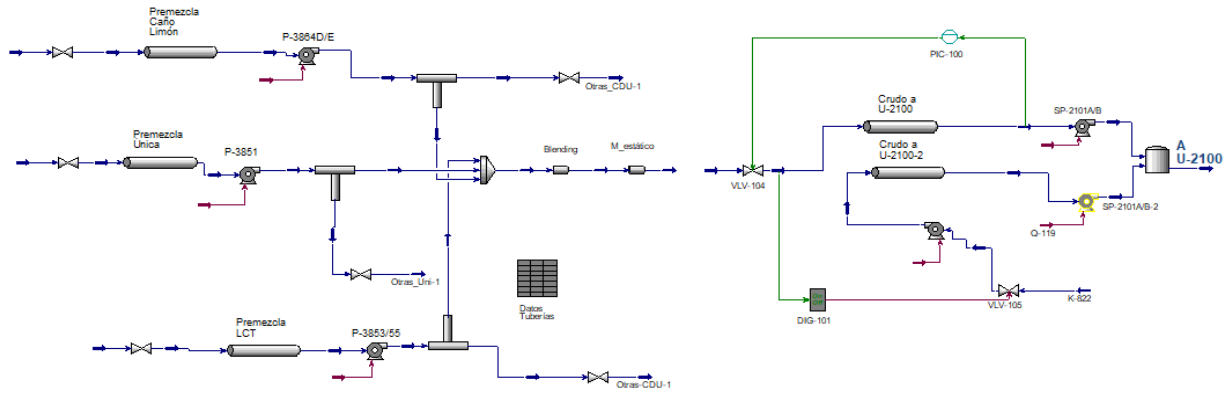


Figura 17.

Simulación dinámica con el PFD codificado en HYSYS para la alternativa de cargue directo.

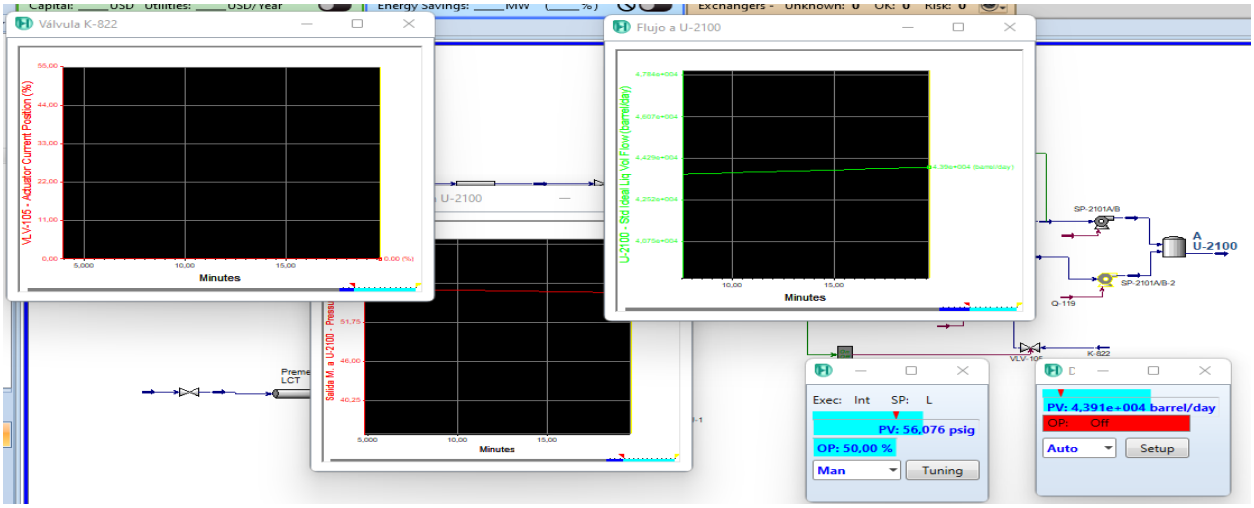


Figura 18.

Respuesta del sistema al inicio de la simulación dinámica, con activación del PID en automático (K=0.5 %/%, Ti=5 min).

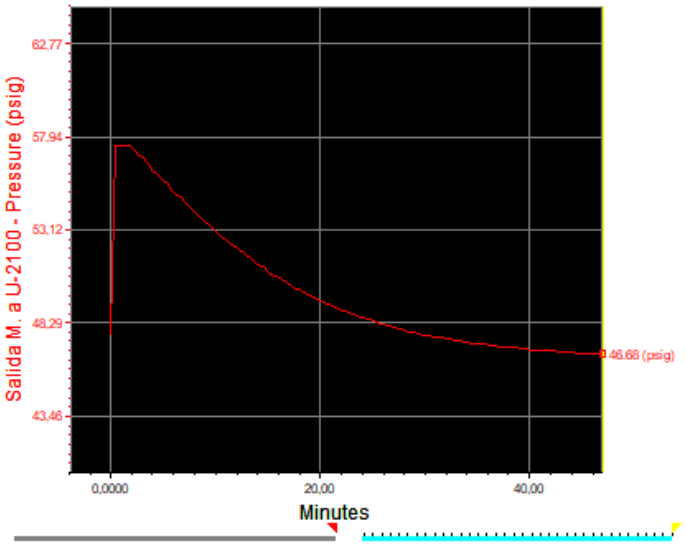
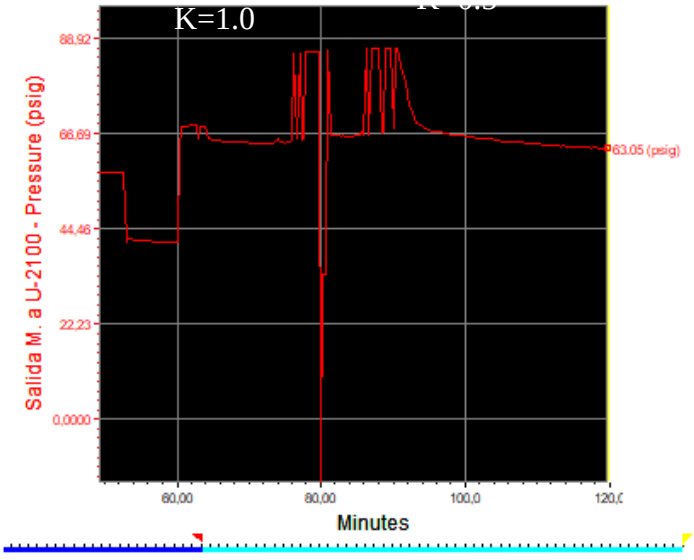


Figura 19.

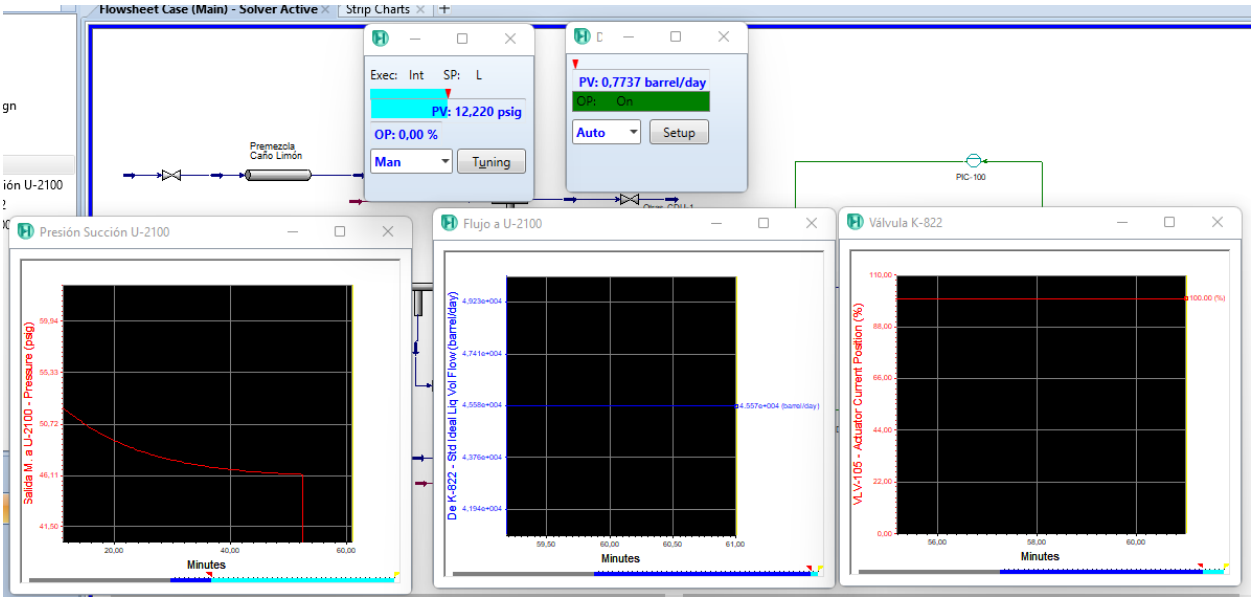
Respuesta del sistema ante una disminución a 40% en la apertura de la VLV-104 (K=1%, Ti=5 min).



De otro lado, la respuesta del sistema ante control *on/off* fue analizada ante un cierre total en la apertura de la VLV-104. La Figura representa el comportamiento del sistema ante la activación *on* en la apertura de la VLV-105 (al 100%) por cumplimiento del valor de 0 en el flujo de la línea de mezcla directa. La línea de carga por gravedad (estrategia de cargue actual) es activada por el control *on/off*, reportando un flujo de 37 kbpd para una caída de presión de 10 psi en la válvula VLV-105 y una operación dinámica estable, según simulación. Es importante mencionar que el cargue por gravedad en la simulación codificado con una línea independiente de la de cargue directo; esta línea consideró su propio objeto *PipeSegment* y su propia P-2101. Las dos líneas cargan al mismo tanque desde donde sale el flujo a los equipos de proceso de la U-2100. El cargue por gravedad fue codificado de esta manera debido a los requerimientos de presiones, definidos en la simulación dinámica en Aspen Hysys; la línea de cargue por gravedad reporta presión nula, mientras no se active el flujo por la VLV-105; en un mezclador, las presiones de todas las líneas se igualan a la de menor presión.

Figura 20.

Activación del cargue por gravedad (control on/off) ante falla en el suministro de crudo por la línea de cargue directo a la U-2100.



La simulación con los lazos de control PID y *on/off* corresponden a un aporte del presente trabajo, ya que, en futuros trabajos, puede ser implementada en simulaciones de la U-2100, permitiendo el análisis de la influencia de la producción ante perturbaciones desde la línea de mezcla directa a la unidad. Asimismo, el control on/off puede permitir el análisis de las diferentes situaciones operacionales que puedan presentar los equipos de la U-2100, suscitados por el cambio de alimentación de línea de mezcla directa a alimentación por gravedad y viceversa. Con lo anterior, la simulación desarrollada corresponde a una herramienta que pueden utilizar tanto los ingenieros de diseño como los ingenieros de proceso.

5. Conclusiones

El análisis de la base de datos mostró que el flujo de carga a la U-2100 reportó valores entre 25 y 40 kbpd, con una variación en la presión de succión a la P-2101 entre 10.4 y 16.3 psi. La simulación desarrollada para el cargue actual a la U-2100 reprodujo a nivel semicuantitativo, los valores de la base de datos del sistema.

Los tamaños de los equipos para la alternativa de cargue directo a la U-2100 son: mezclador estático en línea tipo KMS de 10" de diámetro nominal y 100" de longitud; línea de alimentación directa después del mezclador de 1.4 km de longitud y diámetro nominal de 10"; accesorios de la línea de alimentación: 34 codos de 90°, 2 codos de 45° y 8 válvulas de compuerta.

La alternativa de cargue directo a la U-2100 conlleva a que la presión de succión de la bomba P-2101, se encuentre por encima de los valores reportados en los datos históricos. Lo anterior cumple con el requisito de integridad de la P-2101.

Dos lazos de control fueron validados por simulación para la alternativa de cargue directo a la U-2100. El lazo de control PID para el control de la presión de succión de la P-2101, con los parámetros ganancia (K) de 0.5 %/% y tiempo integral de 5 min, reportó estabilidad para las perturbaciones analizadas. Igualmente, el control *on/off* codificado en la simulación para la activación del cargue por gravedad, condujo a una operación estable ante flujos nulos en la línea de carga directa.

La simulación desarrollada corresponde a una herramienta que puede ser de utilidad, en el análisis de las situaciones operacionales suscitadas por perturbaciones en el flujo de carga a la U-2100.

6. Recomendaciones

Validaciones adicionales a la simulación desarrollada son recomendadas, verificando las respuestas de los lazos de control ante diferentes perturbaciones.

La ampliación del análisis y el diseño de líneas de carga directa es recomendada para las demás unidades de destilación de crudos de la GRB.

Referencias Bibliográficas

Akintola, T.A. & Giwa, S.O. (2009). Optimum Pipe Size Selection for Turbulent Flow. *Leonardo Journal of Science*, 14, 112-123.

Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. (2006). *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, 3th edition.

Çengel, Y.A. & Cimbala, J.M. (2006). *Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications*. First Edition, McGraw Hill. Higher Education. USA.

Ghanem, A., Lemenand, T., Valle, D.D., Peerhossaini, H. (2014). Static mixers: mechanisms, applications, and characterization methods – A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 205-228.

Hosseini, S.M., Razzaghi, K., Shahraki, F. (2018).

McKeon, B.J., Zagarola, M.V., Smits, A.J. (2005). A new friction factor relationship for fully developed pipe flow. *J. Fluid Mech*. 538, pp. 429–443.

Meijer, H.E.H., Singh, M.K., Anderson, P.D. (2012). On the quantitative performance of static mixers: A quantitative comparison. *Progress in Polymer Science*, 37, 1333-1349.

Morrison, A., Bachmann, C., & Saccomanno, F. (2018). Developing an Empirical Pipeline and Rail Crude Oil Mode Split and Route Assignment Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119811880135. doi:10.1177/0361198118801350.

Nekooghadirli, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghezavati, V.R., Javanmard, S. (2014). Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics. *Comput. Ind. Eng*. **76**, 204–221.

Paglianti, A. (2008). Recent Innovations in Turbulent Mixing with Static Elements. *Recent Patents on Chemical Engineering*, 1, 80-87.

Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A., Kresta, S.M. (2004). *Handbook on industrial mixing. Science and Practice*. Wiley-Interscience. New Jersey.

Pham BT, Prakash I. (2017). *Spatial prediction of rainfall induced shallow landslides using adaptive-network-based fuzzy inference system and particle swarm optimization: a case study at the Uttarakhand Area, India.* In: Tien Bui D., Bui HB., Hoang ND, editors. Proceedings of the international conference on geo-spatial technologies and earth resources. Springer; p. 224–238.

Rebba, R., Huang, S., Liu, Y., Mahadevan, S. (2006). Statistical Validation of Simulation Models. *Int. J. Materials and Product Technology*, 25, 164-181.

Riazi, M.R. (2005). *Characterization and Properties of Petroleum Fractions.* Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materieals.

Statiflo, (2015). Coefficient of Variation (CoV). https://statiflo.com/about-static-mixing-2/mixture-quality/coefficient-of-variation-cov/. Consultada, julio 10 de 2022.

Tarifa, E.E., Erdmann, E., Humana, D., Vicente, M.S., Cari, L.R., Fuentes, L. (2007). Análisis de una red de transporte de gas. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 89-97.

Apéndices

Apéndice A. Figuras y Tablas

Figura S1.

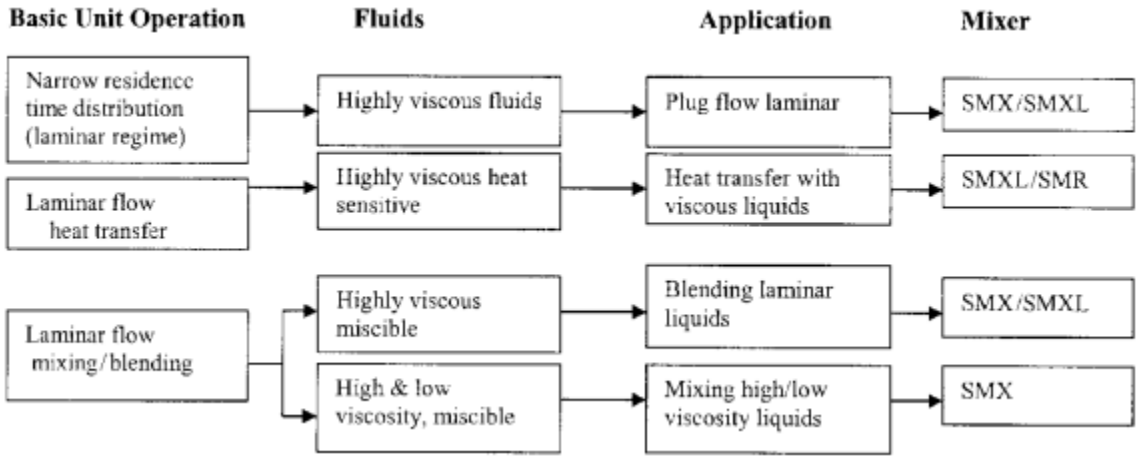
Mezcladores estáticos.

Figure 7-16 Static mixer design options. From left: vortex mixer (type KVM), corrugated plate (type SMV), wall-mounted vanes (type SMF), cross-bar (type SMX), helical twist (type KHT), cross-bar (type SMXL). (Courtesy of Koch-Glitsch, LP.)

Nota. Tomado de: Paul *et al.* 2004.

Figura S2.

Guía para la selección del tipo de mezclador estático (siglas de los mezcladores en la Figura S1).



Nota. Tomado de: Paul *et al.* 2004.

Figura S3.

Valores para el parámetro K (Ec. 4) según el tipo de mezclador estático y el régimen de flujo (siglas de los mezcladores en la Figura S1).

Table 7-5 Laminar Blending and Pressure Drop Parameters for Motionless Mixers

Device	KL	KiL
Empty pipe	1	—
KMS	6.9	0.87
SMX	37.5	0.63
SMXL	7.8	0.85
SMF	5.6	0.83
SMR	46.9	0.81

Source: Streiff et al. (1999).

Table 7-6 Turbulent Blending and Pressure Drop Parameters for Motionless Mixers

Device	Ne[a]	KT	KiT
Empty pipe	0.01	1	0.95
KMS	1.5	150	0.50
KVM	0.24	24	0.42
SMX	5	500	0.46
SMXL	1	100	0.87
SMV	1–2	100–200	0.21–0.46
SMF	1.3	130	0.40

[a]Ne is the Newton number, equivalent to 2f, twice the Fanning friction factor.

Source: Streiff et al. (1999).

Nota. Tomado de: Paul *et al.* 2004.

Apéndice B. Código desarrollado en Matlab

```
clear all
global hySS
hyApp = feval('actxserver', 'Hysys.Application');
hyApp.Visible=1
get(hyApp)
hyy=invoke(hyApp.SimulationCases,'Open','C:\CargueU2100);
invoke(hyy,'Activate');
%Hoja en donde se encuentran referenciados los flujos de crudo mezcla
hySS = hyApp.ActiveDocument.Flowsheet.Operations.Item('SPRDSHT-1');
fun=@U2100

pause(1)
try
   hySS.Cell('B5').CellValue=a1;
   hySS.Cell('B6').CellValue=a2;

catch
   pause(5)
   c1=hySS.Cell('E5').CellValue;
   c2=hySS.Cell('E6').CellValue;
end
```