

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA SUSTITUCIÓN DEL FLUIDO DE
CALENTAMIENTO DEL SERPENTÍN DE LA TORRE 2502 PARA MANTENER
LA CARGA EN DEMEX CUANDO VISCORREDUCTORA II SE ENCUENTRA
FUERA DE SERVICIO EN LA GCB DE ECOPETROL S.A**

YULI STEFANNY BARBOSA MURILLO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA SUSTITUCIÓN DEL FLUIDO DE
CALENTAMIENTO DEL SERPENTÍN DE LA TORRE 2502 PARA MANTENER
LA CARGA EN DEMEX CUANDO VISCORREDUCTORA II SE ENCUENTRA
FUERA DE SERVICIO EN LA GCB DE ECOPETROL S.A**

YULI STEFANNY BARBOSA MURILLO

Trabajo de Grado para optar por el título de:

Ingeniera Química

**DIRECTOR: CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA
INGENIERO QUIMICO, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A mis padres, por darme su apoyo incondicional, por sus enseñanzas, por creer en mí y por su gran amor.

A mis hermanos por permitirme ser un ejemplo a seguir.

A mi familia, por su colaboración y motivación.

A Aura Patricia Mendoza por creer en mí y motivarme día a día a seguir adelante.

A Carlos Javier Granados Sánchez por sus palabras confortantes, por hacerme feliz y por hacer parte de mi vida.

A mis amigos y a aquellas personas que me acompañaron en el desarrollo de esta etapa, por su incondicionalidad y por hacer de esta etapa universitaria un camino memorable.

Yuli Barbosa

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar presente en mi vida, por darme la oportunidad día a día de ser una mejor persona, por su amor y sus bendiciones.

A mis padres por apoyarme en esta etapa de formación, por su sacrificio para hacer de mí una mejor persona, y por ser los mejores padres.

A cada uno de los profesores que hicieron parte de esta hermosa etapa de aprendizaje, por sus sabias enseñanzas, por su orientación y paciencia.

A mis amigos por hacer parte de una de las etapas más valiosas de la vida, por acompañarme con sus locuras y alegrías, y por apoyarme en los momentos buenos y malos.

Al Profesor Crisóstomo Barajas Ferreira por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A Ecopetrol S.A y al Departamento de Refinación de Fondos por la ayuda que me brindaron, por sus múltiples enseñanzas y por hacer de mi primera experiencia laboral un aprendizaje significativo.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 15 |
| 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA..... | 15 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... | 17 |
| 2. OBJETIVOS..... | 20 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL..... | 20 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 20 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 21 |
| 3.1 ESTUDIO DEL PROCESO DE LA UNIDAD DE DEMEX Y VISCORREDUCTORA II..... | 21 |
| 3.2 ESTUDIO DEL SISTEMA ACTUAL..... | 21 |
| 3.2.1 Recopilación de datos..... | 22 |
| 3.2.2 Cálculo del calor aportado por el gasóleo..... | 22 |
| 3.2.3 Presión y temperatura máxima permisible en el serpentín..... | 23 |
| 3.3 PLANTEAMIENTO Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS..... | 24 |
| 3.4 EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE CRITERIOS DE ALTERNATIVAS..... | 24 |
| 3.5 REVISIÓN PARA LA IMPLEMENTACION DE LA ALTERNATIVA ESCOGIDA..... | 24 |
| 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | 25 |
| 4.1 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS..... | 25 |
| 4.1.1 Alternativa 1: Uso de vapor de 150 psig en línea de 2 in..... | 25 |

| | |
|---|----|
| 4.1.2 Alternativa 2: Uso de slurry caliente de cracking I..... | 26 |
| 4.1.3 Alternativa 3: Uso de los fondos Demex provenientes del D-2506..... | 26 |
| 4.1.4 Alternativa 4: Uso del condensado de vapor de 600 psig del serpentín de la T-2501..... | 27 |
| 4.1.5 Alternativa 5: Uso de vapor de 600 psig degradado a 400 psig y posteriormente saturado..... | 28 |
| 4.2 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN LA MATRIZ DE CRITERIOS..... | 29 |
| 4.3 ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACION DE LA ALTERNATIVA MAS VIABLE..... | 31 |
| 4.3.1 Flujos requeridos..... | 32 |
| 4.3.2 Vapor de 600 psig..... | 32 |
| 4.3.3 Agua de calderas..... | 33 |
| 4.3.4 Condensado..... | 34 |
| 4.3.5 Esquema de la T-2502 y el serpentín con las líneas propuestas..... | 35 |
| 4.3.6 Diseño de válvulas de control y platina de orificio..... | 37 |
| 4.3.6.1 Válvula control de presión..... | 37 |
| 4.3.6.2 Válvula control de temperatura..... | 38 |
| 4.3.6.3 Válvula control de flujo de condensado..... | 38 |
| 4.3.6.4 Platina de orificio..... | 40 |
| 4.3.7 Análisis hidráulico..... | 41 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 42 |
| 6. RECOMENDACIONES..... | 43 |
| BIBLIOGRAFÍA | 44 |
| CITAS BIBLIOGRAFICAS..... | 46 |
| ANEXOS..... | 48 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Condiciones de entrada de la T-2502 y del serpentín..... | 22 |
| Tabla 2. Calor aportado por el gasóleo..... | 23 |
| Tabla 3. Datos del calor aportado por el vapor saturado de 400 psig con relación al flujo..... | 29 |
| Tabla 4. Alternativas propuestas..... | 30 |
| Tabla 5. Matriz de aspectos mínimos requeridos..... | 30 |
| Tabla 6. Matriz de criterios empleados para la valoración de cada alternativa..... | 31 |
| Tabla 7. Datos de los flujos..... | 32 |
| Tabla 8. Especificaciones de la válvula de control de presión del vapor de 400psig..... | 39 |
| Tabla 9. Especificaciones de la válvula de control de temperatura para garantizar la temperatura de saturación del vapor de 400 psig..... | 39 |
| Tabla 10. Especificaciones de la válvula de control de flujo de condensado a la salida del serpentín de la T-2502..... | 40 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Diagrama de la unidad Demex..... | 16 |
| Figura 2. Diagrama de la torre despojadora de DMO T-2502..... | 19 |
| Figura 3. Metodología empleada..... | 21 |
| Figura 4. Rango permisible de presión y temperatura para una tubería de acero al carbón de rating 300 #..... | 23 |
| Figura 5. Calor cedido por el vapor 150 psig respecto al flujo..... | 25 |
| Figura 6. Calor que ceden los fondos Demex y el slurry caliente respecto al flujo..... | 27 |
| Figura 7. Calor que entrega el condensado de vapor de 600 psig con respecto al flujo suministrado..... | 28 |
| Figura 8. Banco de tuberías del bloque 1, con líneas propuestas..... | 33 |
| Figura 9. Tomamuestra del cabezal de agua de calderas de 800 psig, con el esquema de la nueva línea para la saturación del vapor..... | 34 |
| Figura 10. Válvulas de control de presión y temperatura propuestas..... | 35 |
| Figura 11. Línea de condensado y especificación del tramo a cambiar para la instalación del cuadro de control..... | 36 |
| Figura 12. Conexión de la línea de condensado con el cabezal de condensados de media en los E-2515..... | 36 |
| Figura 13. Esquema propuesto..... | 37 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A. Esquema proceso de carga hasta la Unidad de Viscorreductora II..... | 48 |
| ANEXO B. Simulación del sistema actual..... | 48 |
| ANEXO C. Presión y Temperatura del vapor de 150 psig dentro del rango permisible..... | 50 |
| ANEXO D. Presión y Temperatura del “slurry” caliente dentro del rango permisible..... | 50 |
| ANEXO E. Esquema del sistema propuesto para el uso de fondos Demex..... | 51 |
| ANEXO F. Presión y Temperatura de los fondos Demex dentro del rango permisible..... | 52 |
| ANEXO G. Presión y Temperatura del condensado de vapor de 600 psig dentro del rango permisible..... | 52 |
| ANEXO H. Imagen del banco de tuberías y la T-2502..... | 53 |
| ANEXO I. Presión y Temperatura del vapor saturado de 400 psig dentro del rango permisible..... | 54 |
| ANEXO J. Listado de puntos de conexión..... | 54 |
| ANEXO K. Diseño válvulas de control..... | 55 |
| ANEXO L. Diseño de la platina de orificio..... | 68 |
| ANEXO M. Análisis de la hidráulica del proceso según el sistema propuesto..... | 69 |

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA SUSTITUCIÓN DEL FLUIDO DE CALENTAMIENTO DEL SERPENTÍN DE LA TORRE 2502 PARA MANTENER LA CARGA DE DEMEX CUANDO VISCORREDUCTORA II SE ENCUENTRA FUERA DE SERVICIO EN LA GCB DE ECOPETROL S.A *

AUTOR: Yuli Stefanny Barbosa Murillo**

PALABRAS CLAVE: Serpentín, Calor aportado, Vapor 400 psig, Sistema hidráulico.

La unidad de extracción de Demex (U-2500) del Departamento de refinación de fondos de la GRB, baja carga cada 12 meses a causa de la parada técnica de la Unidad de Viscorreductora II (U-2800) por el decoquizado de los Hornos H-2801 A/B. A causa de esta problemática la refinería baja la carga de crudo, lo que genera una disminución económica considerable.

La causa encontrada consiste específicamente en que el serpentín de la T-2502 (Torre despojadora) de la U-2500 utiliza como fluido de calentamiento el gasóleo para el despojo del solvente, el cual es generado por la U-2800. Debido a la parada técnica, se deja de producir el gasóleo, lo que hace que se requiera un fluido que aporte un calor similar para calentar el fondo de la torre.

En el desarrollo de la práctica industrial se realizó el siguiente trabajo, que tuvo como propósito proponer y evaluar diferentes alternativas, que permitan mantener una carga constante durante el funcionamiento de la Unidad de Demex sin afectar directamente la carga de la refinería.

La evaluación de estas alternativas se realizó con base a una matriz de criterios, que arrojó como resultado que la alternativa más viable es el uso de vapor de 400 psig. Finalmente se propuso un sistema hidráulico y control para permitir el uso del vapor como fluido de calentamiento.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, Ingeniero Químico.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF ALTERNATIVES FOR REPLACEMENT OF HEATING FLUID IN THE COIL OF THE 2502 TOWER TO KEEP UP THE LOAD IN DEMEX WHEN VISBREAKER II IS OUT OF SERVICE IN THE GCB OF ECOPETROL S.A.*

AUTHOR: Yuli Stefanny Barbosa Murillo**

KEY WORDS: Heating coil, Duty, Steam 400 psig, Hydraulic system.

In the extraction Demex Unit (U-2500) of the Refining Funds Department of the GRB, it fall loads every 12 months because of the technical stop of the Unit of Visbreaker II (U-2800) for the decoking of the Ovens H-2801 A/B. Because this problematic the Refinery lowers the load of crude oil, which generates an economic considerable decrease.

Found problems consist specifically of the fact that the coil of the T-2502 (Extraction tower) of the U-2500 uses as fluid of warming the gasóleo for the spoliation of the solvent, which is generated by the U-2800. Due to the technical stop, it stops producing the gasóleo, which does that it needs a fluid that generate a similar heat for to warm up the bottom of the tower.

In the developing the industrial practice the following work was performed, which had as intention propose and evaluate different alternatives, which allow to support a constant load during the functioning of Demex Unit without affecting directly the load of the refinery.

The evaluation of these alternatives was made based on a criteria matrix, resulting the most viable alternative the use steam 400 psig. Finally a hydraulic system and control are proposed to allow the use of the steam as fluid of warming.

* Undergraduate Project

** Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Advisor: M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, Chemical Engineer.

INTRODUCCIÓN

Diariamente, Ecopetrol S.A trabaja en función de proveer el abastecimiento de petroquímicos y combustibles para el país, como también la exportación de los mismos. Así mismo, su actividad genera un alto índice de rentabilidad: con el mantenimiento de una carga promedio, a través de una buena práctica en los procesos de refinación y transporte y con una constante preocupación por mantener los estándares de calidad.

En la Gerencia Complejo de Barrancabermeja (GCB), se ha impulsado, en el transcurso de los años, el desarrollo de alternativas que optimicen cada uno de los procesos, eviten pérdidas económicas y disminución de carga, y mantengan la seguridad de los procesos y las personas, entre los que se encuentra el aprovechamiento energético de los fluidos para calentamiento.

El Departamento de Refinación de Fondos, teniendo como prioridad el logro de estos objetivos, ha venido trabajando en el mejoramiento de aquellos procesos que generan algún impacto negativo. Siendo uno de éstos la disminución de carga de la Unidad Demex, debido a la parada de Viscorreductora II, lo que genera pérdidas de productividad para la empresa.

Por este motivo, a través de la práctica industrial realizada se presentó el siguiente trabajo, en donde se evalúan diferentes alternativas que puedan dar solución a una de las causas que se considera relevante para la disminución de carga de la Unidad, la cual es: remplazo de gasóleo por un fluido de calentamiento para su aprovechamientos energético en el serpentín de la T-2502. Este proyecto es iniciativa del Departamento de refinación de fondos para evaluar su viabilidad como alternativa útil en el cumplimiento de los objetivos de la GCB y de Ecopetrol S.A.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Ecopetrol S.A es la primera compañía petrolera de Colombia, ubicada entre las 40 petroleras más grandes del mundo y las 4 principales de Latinoamérica. Siendo esta una sociedad mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energías [1]. La empresa funciona como una sociedad de naturaleza mercantil, dedicada al ejercicio de las actividades propias de la industria y el comercio del petróleo y sus afines.

Además de Colombia, en donde se genera más del 60% de la producción nacional, tiene presencia en actividades de exploración y producción en Perú, Brasil y en el Golfo de México.

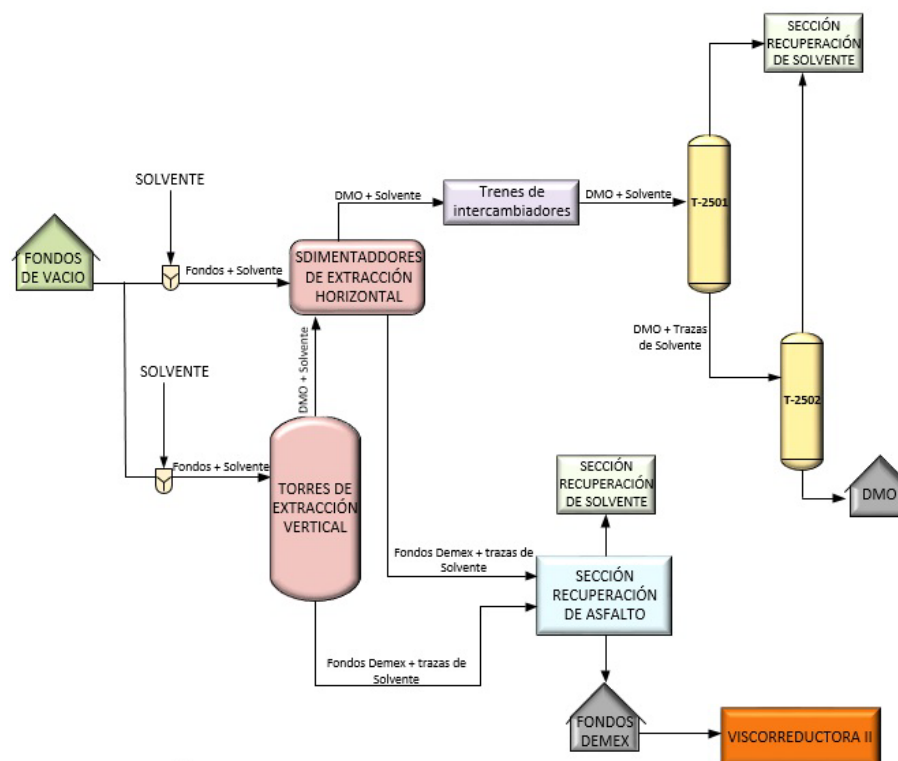
Ecopetrol cuenta con la mayor refinería de Colombia; La Gerencia Complejo Barrancabermeja (GCB), localizada en la ciudad del mismo nombre, en la región central del país. El complejo cuenta con la capacidad de mantener una carga promedio de 227 mil barriles día de crudo de varias calidades para producir diferentes tipos de productos requeridos en el mercado nacional.

El área de Refinación se produce principalmente Gasolinas y destilados. El área de Petroquímicas elabora productos tales como lubricantes, parafinas, aromáticos, y polietilenos. En el área de Cracking principalmente se produce nafta y GLP (Gas Licuado de Petróleo). En el área de Materias Primas se realizan los productos terminados y el recibo de crudo. Los servicios industriales son generados en la refinería [2].

Este crudo pasa a la columna de destilación atmosférica en donde se obtienen 5 productos principales entre ellos el residuo pesado. Estos residuos pasan a la columna de destilación al vacío en la que se separan productos como el GLV (Gas

Licuado Vehicular), el GPV, y los fondos de vacío que son enviados a la unidad Demex en donde se genera el DMO (Aceite desmetalizado) y los Fondos Demex. EL DMO es enviado a la Unidad Unibón para la producción de DMOH (Aceite desmetalizado hidrogenado) y los Fondos Demex pasan a la unidad Viscorreductora II para la producción de combustóleo como producto principal y Nafta, gases residuales, butanos como subproductos. (Ver Anexo A)

FIGURA 1. Diagrama de la Unidad Demex



FUENTE: Manual De la Unidad Demex

En la unidad Demex ocurre un proceso de separación de compuestos pesados y livianos de los fondos de vacío, en donde se utiliza una mezcla propano-butano como solvente, para obtener un extracto llamado DMO. Esta está diseñada para procesar 45000 BPD (Barriles por día) de fondos de vacío desde las torres de destilación de crudo al vacío. El proceso es llevado a cabo en la sección de extracción líquido-líquido horizontal (dos trenes de sedimentadores) y vertical (dos

torres desasfaltadoras) [3], en donde se emplea una relación volumétrica de carga de fondos de vacío: solvente de 1:5 que garantiza la efectiva extracción de DMO del asfalto [4].

En el proceso de separación de la zona de extracción se obtiene: DMO + la mayor cantidad de Solvente y Fondos Demex + solvente. El DMO + solvente es enviado a la sección de recuperación de DMO; la corriente pasa por los trenes de calentamiento E-2503 A/F con el fin de calentarse para vaporizar la mayor cantidad de solvente, la vaporización continúa con el incremento de la temperatura en los calentadores de DMO E-2522 A/D. La corriente líquido-vapor efluente entra en la torre separadora de DMO T-2501, aquí el solvente vaporizado se separa del DMO debido a una caída de presión y una expansión volumétrica. El solvente sale por la cima, hacia la sección de recuperación de solvente y el DMO con solvente sale por el fondo y continúa hacia la Torre Despojadora de DMO (T-2502) [5].

En la T-2502 se despoja el solvente remanente en la corriente líquida de DMO efluente del fondo de la Torre Separadora de DMO. El despojo se hace por medio del contacto del líquido con vapor de agua ascendiendo a través de la torre. El serpentín en el fondo de la torre, en el cual circula gasóleo (GAO), mejora la separación del solvente del DMO que cae en el fondo de la torre [6].

Los Fondos Demex + Solvente pasan a la sección de recuperación de asfalto en donde se generan los fondos Demex que son enviados a la unidad Viscorreductora II.

1.2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La Refinería de Barrancabermeja ha ido creciendo, aumentando los rendimientos de calidad y rentabilidad, mejorando sus prácticas de operación y mantenimiento, para alcanzar mayores niveles de disponibilidad y confiabilidad. En este centro de

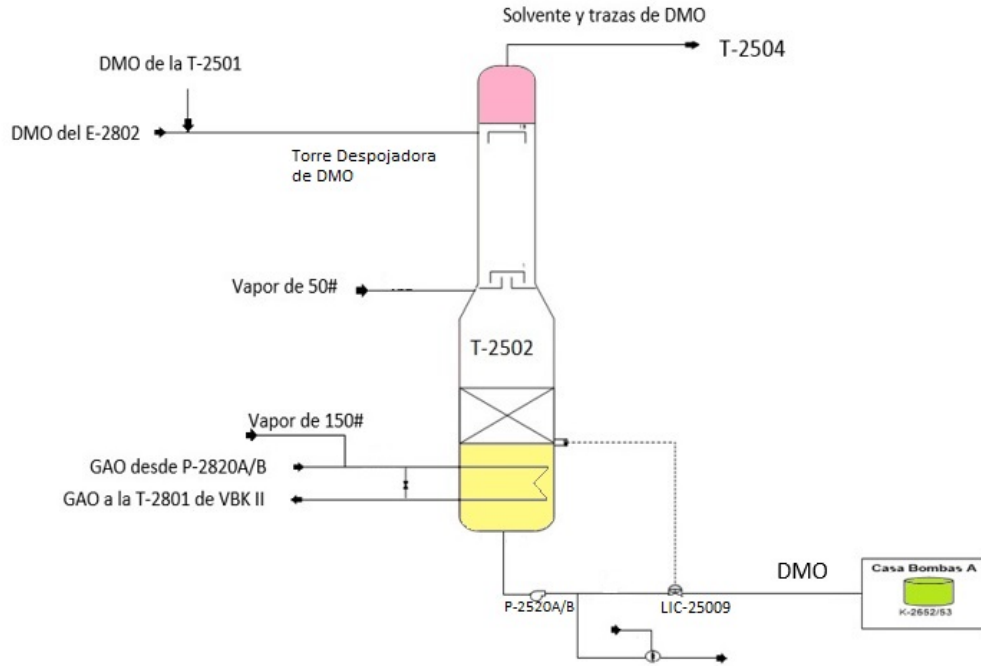
refinado se produce el 80% del mercado interno de combustibles y derivados del país, lo que genera un desarrollo económico y social [7].

La refinería maneja diariamente una carga de 227 mil barriles con significativas mejoras en productos de alto valor, lo que permite mantener el abastecimiento de los principales combustibles al país. Por esta razón cada Departamento debe trabajar con una meta de carga y de producción. En el departamento de refinación de fondos se cargan 45000 BPD a la unidad Demex; a causa de la parada técnica de Viscorreductora II para el decoquizado de los hornos H-2501 A/B se tiene que bajar la carga a 32000 BPD debido a que la producción de DMO se ve limitada en la T-2502.

En la Figura 2 se observa el esquema de la T-2502 [8], en donde en el fondo de la torre, ocurre el despojo de trazas de solvente por medio de calentamiento a través de un serpentín, donde fluye gasóleo desde la bomba P-2820 de la Unidad Viscorreductora II. El gasóleo que sale del serpentín, retorna a la Unidad Viscorreductora II. Durante la parada, el gasóleo es remplazado por vapor de 150 psig, este vapor no supe el requerimiento energético para calentar la misma cantidad de fluido en la torre.

Por lo anterior, surgió la necesidad de cambiar el GAO como fluido de calentamiento en la T-2502, por un fluido que aporte al sistema un calor similar a este y que no afecte la integridad del serpentín y de las líneas. El presente proyecto hace un análisis y evaluación de diferentes alternativas y la mejor alternativa es estudiada para que se pueda llevar a cabo.

FIGURA 2. Diagrama de la torre despojadora de DMO T-2502



FUENTE: Manual de la Unidad Demex

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar alternativas para sustituir el fluido de calentamiento del serpentín de la torre 2502, y así mantener la carga de Demex cuando Viscorreductora II se encuentre fuera de servicio.

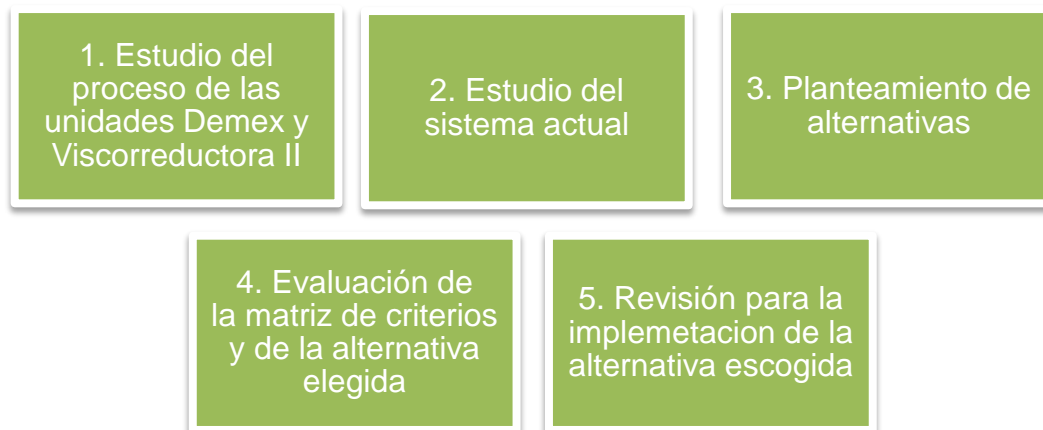
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el calor aportado por diferentes fluidos con el fin de satisfacer los requerimientos energéticos de la T-2502.
- Evitar disminuir la carga a la unidad Demex (U-2500), en el momento en que la Unidad Viscorreductora II se encuentre fuera de servicio.
- Estudiar la matriz de criterios y con base a esta escoger la mejor alternativa y así darle solución al problema propuesto.
- Realizar una evaluación de la posible hidráulica del fluido seleccionado para garantizar las presiones y velocidades requeridas.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 3 se presenta la metodología abordada para el desarrollo de la problemática planteada.

FIGURA 3. Metodología empleada



ENTE: El Autor

FU

3.1. Estudio del proceso de la Unidad Demex y Viscorreductora II

Se llevó a cabo el estudio del proceso en la Unidad Demex y Viscorreductora II, entendiendo el funcionamiento de los diferentes equipos y variables operativas, para esto se realizó la lectura de los diferentes manuales, P&IDs (Piping and Instrumentation Diagrams), PFD (Process FLOW Diagram) y hoja de vida de los equipos, con el propósito de revisar el estado actual de la T- 2502 y del serpentín de calentamiento y de esta manera poder abordar la problemática abordada.

3.2. Estudio del sistema actual

En esta etapa se desarrollaron actividades que se consideraron pertinentes para obtener la mayor cantidad de datos necesarios para la generación de alternativas. Las actividades fueron:

3.2.1. Recopilación de datos

Se investigaron y recopilaron las condiciones de operación de la T-2502 y del serpentín, con base a los datos obtenidos en el cuarto de control y con la toma de datos en patio. Los datos recopilados se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de Entrada de la T-2502 y del serpentín

| Condiciones de entrada | | T-2502 | Serpentín |
|------------------------|--------|-----------------------------|-----------------|
| Fluido | | DMO + Solvente | Gasóleo |
| Flujo | | 4947,8 [ft ³ /h] | 86745.06 [lb/h] |
| Presión | [psia] | 31,69 | 205 |
| Temperatura | [°F] | 281 | 425 |

FUENTE: El Autor.

3.2.2. Cálculo del calor aportado por el gasóleo.

Se calculó el calor aportado por gasóleo con base en los datos recopilados. Esto con el fin de tener conocimiento acerca de calor requerido por la torre para mantener la misma carga.

Para ello, se utilizó la formula termodinámica de calor sensible [9].

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad \text{(EC.1)}$$

Donde, Q es el calor cedido [MBtu/h]

m es el flujo [lb/h]

C_p es la capacidad calorífica [Btu/lb.°F]

ΔT es el diferencial de temperatura [°F]

El valor obtenido se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Calor aportado por el Gasóleo

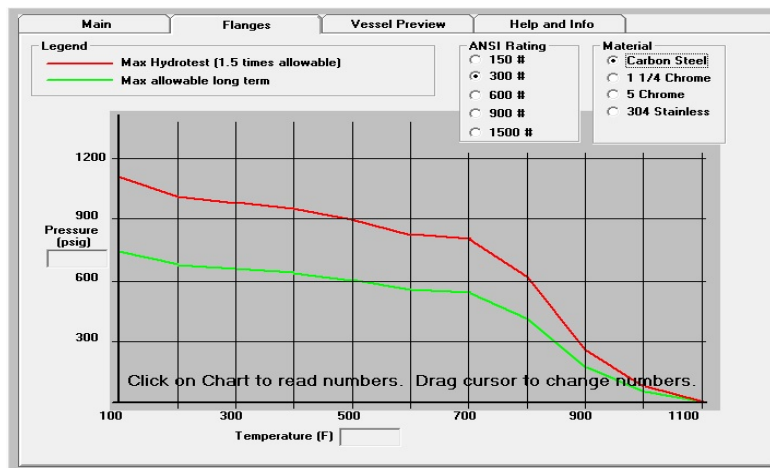
| Cálculo del Calor | | |
|-------------------|------------------|-------------|
| Variable | Unidad | Valor |
| Flujo | [lb/h] | 86745,06 |
| Cp | [Btu/lb.°F] | 0,58 |
| Te | [°F] | 425 |
| Ts | [°F] | 401 |
| Calor | [Mbtu/h] | 1,22 |

FUENTE: El Autor

3.2.3. Presión y temperatura máxima permisible en el serpentín

Para tener una idea de la presión y temperatura máxima que podía soportar el serpentín según el material y el rating (rango de presión permisible), se utilizó el programa Flange Rating Information. En el cual con el material y rating de este, se puede determinar una gráfica de Presión vs Temperatura, en donde la línea verde significa el máximo que puede soportar con trabajo permanente, y la línea roja el máximo que puede soportar con trabajo por cortos períodos de tiempo. En la Figura 4 se puede visualizar lo anteriormente dicho.

FIGURA 4. Rango permisible de presión y temperatura para una tubería de acero al carbón con rating 300#



FUENTE: El Autor. Flange rating information.

3.3. Planteamiento y estudio de alternativas

Se plantearon posibles alternativas para dar solución a la problemática, en donde cada una de ellas se atacó de manera directa. En cada alternativa se calculó el calor aportado en función del flujo suministrado y con la ayuda de la Figura 4 se analizó si la presión y temperatura del fluido no afectarían la integridad del serpentín. Luego de su estudio, se descartaron y se escogió la alternativa que presento la solución más pertinente.

3.4. Evaluación de la matriz de criterios de alternativas

Con base al conjunto de alternativas o soluciones factibles, se realizó un conjunto de criterios de objetivos, que permitiera evaluar cada una de estas conforme a sus ponderaciones. Se estructuró la matriz con una valoración por peso de cada ítem para poder evaluar las variables que se podrían ver implicadas en la selección de la mejor de ellas. Los criterios tenidos en cuenta fueron:

- ✓ ¿El fluido aporta el calor necesario?
- ✓ ¿Se cuenta con disponibilidad de flujo para alcanzar la transferencia de calor deseada?
- ✓ ¿Se ve afectada la integridad del serpentín?
- ✓ ¿Es el estudio hidráulico factible?
- ✓ ¿Se garantiza la seguridad del proceso?

3.5. Revisión para la implementación de la alternativa escogida

Después de analizar la matriz de criterios se determinó cual sería la alternativa más viable a llevar a cabo, igualmente se realizó un posible diseño para su implementación y de esta forma evitar disminuir la carga en Demex.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

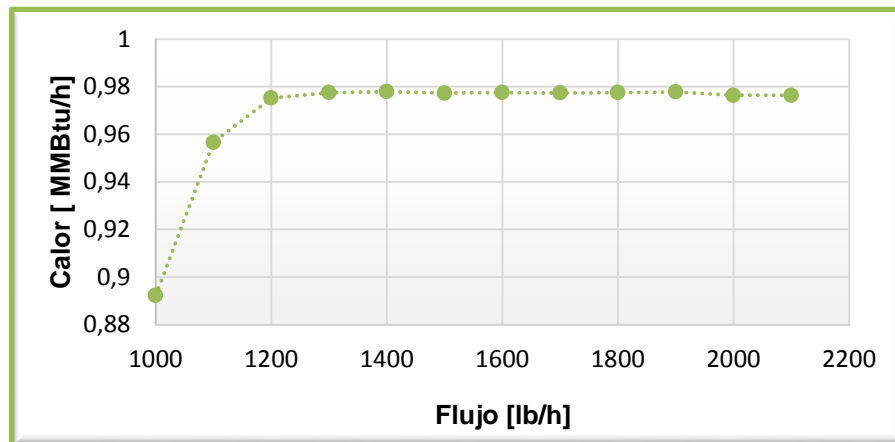
4.1. Estudio de alternativas

Se plantearon 5 alternativas con el objetivo de hallar el calor de 1,22 MBtu/h y evitar daños en la metalurgia del serpentín por elevadas presiones y temperaturas, para cada fluido propuesto. Los cálculos del calor se realizaron con la ayuda del software PRO II como simulador de procesos químicos. (Ver Anexo B)

4.1.1. Alternativa 1: Uso de vapor de 150 psig en línea de 2 in.

Durante la parada de Viscosreductora II, el gasóleo es remplazado por vapor de 150 psig en línea de $\frac{3}{4}$ in como fluido de calentamiento. Se planteó utilizar vapor de 150 psig en línea de 2 in para aumentar la capacidad de flujo. En la Figura 5 se puede observar el calor obtenido respecto a la variación de diferentes flujos volumétricos de vapor.

FIGURA 5. Calor cedido por el vapor 150 psig respecto al flujo



FUENTE: El Autor

Bajo el análisis de esta alternativa se determinó que el calor de 1,22 MBtu/h no es alcanzado aún con flujos muy altos, por esta razón la T-2502 no obtendría el calor requerido para el despojo del solvente.

La presión de 150 psig y la temperatura de 370 °F no afectarían ni la integridad del serpentín ni la seguridad del proceso. (Ver Anexo C)

4.1.2. Alternativa 2: Uso de Slurry caliente de Cracking I

El slurry caliente proveniente de la Cracking I (Unidad de craqueo catalítico) llega por el lado norte de la unidad, con el fin de diluir el combustóleo a una $T=450^{\circ}\text{F}$. Este posee un alto poder calorífico y podría ser de fácil implementación. Se estudió la posibilidad de utilizar esta corriente como fluido de calentamiento analizando el calor suministrado por el slurry al sistema con respecto a la variación de flujo a la temperatura de entrada. En la Figura 6 se muestran los resultados.

Con el estudio de esta alternativa se observó que el calor de 1,22 MBtu/h se puede obtener con un flujo de 3800 BPD. Se verificó la cantidad de flujo disponible para el aprovechamiento de este gracias al control indicador de flujo FIC-27029 [10]. Sin embargo, el flujo de slurry que viene de Cracking I a la Unidad de Viscosreductora II es de 2500 BPD.

El slurry caliente viene a una $T=400^{\circ}\text{F}$ y una $P= 130$ psig; estas condiciones no afectan la integridad del serpentín y la seguridad del proceso. (Ver Anexo D)

4.1.3. Alternativa 3: Uso de los Fondos Demex provenientes del D-2506

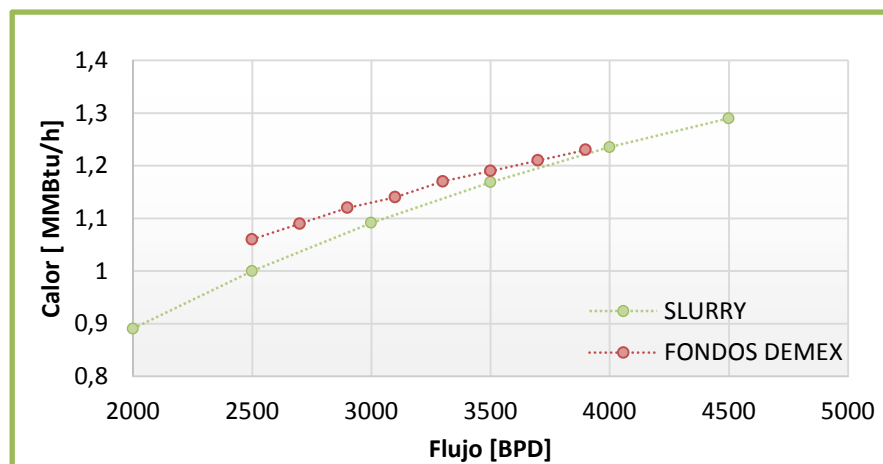
Los Fondos provenientes del D-2506 (Torre separadora de asfalto) de la unidad Demex se encuentran a una $T=410^{\circ}\text{F}$ y pueden ser usado como fluido de calentamiento por su alta temperatura y por la disponibilidad de flujo. Con base a esto, se varió la cantidad de flujo hasta encontrar el calor deseado. En la Figura 6 se observa la relación calor vs flujo.

Al revisar esta alternativa se concluyó que para alcanzar el calor de 1,22 MBtu/h se requiere un flujo de 3600 BPD; flujo que se encuentra disponible para el

calentamiento de la T-2502. No obstante, al estudiar la posibilidad de enviar este fluido hasta el serpentín de la T-2502 como se muestra en el Anexo E, se analizó que este fluido por su alta presencia de coque, podría generar afectaciones futuras, ya que la cantidad de coque que no alcanza a quedar atrapado en filtro, podría generar una reducción en el área de la tubería por incrustación de partículas pesadas y generar fuertes caídas de presión en el sistema, lo que generaría daños en la integridad del serpentín.

La temperatura de los fondos Demex es 410°F y la presión 200 psig, con estos datos no se afectaría el serpentín por altas temperaturas y presiones. (Ver Anexo F)

FIGURA 6. Calor que ceden los fondos Demex y el “slurry” con relación al flujo



FUENTE: El Autor

4.1.4. Alternativa 4: Uso del condensado de Vapor de 600 psig del serpentín de la T-2501

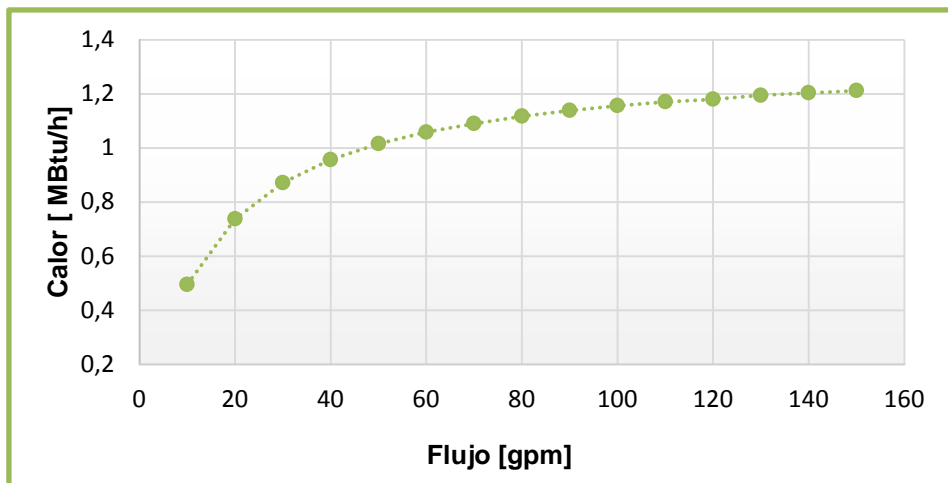
En el serpentín de fondo de la T-2501, el calor al sistema lo suministra vapor de 600 psig que a la salida se condensa y va hacia el cabezal de recuperación de condensado de alta presión. Se propone utilizar el condensado como fluido de calentamiento aprovechando la temperatura de salida de 400°F y la facilidad de

conectarlo al cabezal del fluido de calentamiento del serpentín de la T-2502. En la Figura 7 se observa el calor en función del flujo de vapor de 600 psig

El calor requerido para el calentamiento de la T-2502 se logra con el flujo de condensado de 130 gpm. Sin embargo, se revisó la medición del FIC-25011, instrumento ubicado a la salida de condensado del serpentín de la T-2501, se encontró que el flujo era de 40 gpm un flujo demasiado pequeño para aportar el calor requerido.

La temperatura y presión de salida de condensado son 400°F y 600 psig respectivamente, estas condiciones no afectarían la integridad del serpentín. (Ver Anexo G)

FIGURA 7. Calor que entrega el condensado de vapor de 600 psig con respecto al flujo suministrado



FUENTE: El Autor

4.1.5. Alternativa 5: Uso de Vapor de 600 psig degradado a 400 psig y posteriormente saturado.

El cabezal de vapor de 600 psig se encuentra ubicado en el banco de tuberías del bloque I y a poca distancia del serpentín de la T-2502 (Ver Anexo H). Se propone

degradar el vapor 600 psig a 400 psig, y después saturarlo utilizando una inyección de agua de calderas. Los valores obtenidos del calor aportado con base al flujo suministrado se pueden observar en la Tabla 3.

TABLA 3. Datos del calor aportado por el Vapor saturado de 400 psig con relación al flujo

| Flujo [lb/h] | Calor [MBtu/h] |
|--------------|----------------|
| 1180 | 1,11 |
| 1200 | 1,13 |
| 1220 | 1,15 |
| 1240 | 1,16 |
| 1260 | 1,18 |
| 1280 | 1,20 |
| 1300 | 1,22 |

FUENTE: El Autor

Según los datos arrojados por la tabla, el calor de 1,22 MBtu/h se logra con un flujo de vapor saturado de 400 psig de 1300 lb/h. La disponibilidad de este flujo es posible ya que el Vapor de 600 psig es generado en servicios industriales y se puede hacer uso de esta cantidad.

El vapor de 400 psig tiene una temperatura de saturación de 449 °F. El serpentín podría soportar operación permanente bajo estas condiciones debido a que se encuentran entre el rango permisible de operación a largo plazo (Ver Anexo I).

4.2. Evaluación de las alternativas en la matriz de criterios.

Para la evaluación de la viabilidad de las alternativas (Tabla 4) se tuvieron en cuenta los criterios ya mencionados, considerando los siguientes factores: ambiental, seguridad y practicidad. Dichos criterios se analizaron en una matriz de

aspectos mínimos requeridos (AMR) (Tabla 5), revisando si cumplían o no con las especificaciones dadas.

TABLA 4. Alternativas propuestas

| No. | ALTERNATIVAS A CONSIDERAR |
|-----|---|
| 1 | Uso de vapor de 150 psig en línea de 2 in |
| 2 | Uso de slurry caliente de cracking I |
| 3 | Uso de los fondos Demex provenientes del D-2506 |
| 4 | Uso del condensado de Vapor de 600 psig del serpentín de la T-2501 |
| 5 | Uso de Vapor de 600 psig degradado a 400 psig y posteriormente saturado |

FUENTE: El Autor

TABLA 5. Matriz de Aspectos mínimos requeridos

| Criterios | Calificación No: 1; Si: 2 | | | | |
|--|---------------------------|----|----|----|----|
| | ALTERNATIVAS A CONSIDERAR | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿El fluido aporta el calor requerido? | No | Si | Si | Si | Si |
| ¿Se cuenta la disponibilidad de flujo para alcanzar la transferencia de calor deseada? | Si | Si | Si | No | Si |
| ¿Se mantiene la integridad del serpentín? | Si | No | No | Si | Si |
| ¿Es el estudio hidráulico factible? | Si | Si | Si | Si | Si |
| ¿De fácil construcción? | Si | Si | No | No | Si |
| ¿Se garantiza la seguridad del proceso? | Si | Si | Si | Si | Si |
| Puntos negativos | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 |

FUENTE: El Autor

Se evaluó cada alternativa teniendo como base la matriz de la Tabla 5, en donde, dependiendo la calificación y el peso (prioridad con números, con el objetivo de

que todos sumaran 10), se obtuvo una puntuación, que indica que aquella con mayor valoración es la más viable. En la Tabla 6 se pueden observar los valores obtenidos.

TABLA 6. Matriz de criterios empleada para la valoración de cada alternativa

| Criterios | Peso | CALIFICACION ALTERNATIVAS A CONSIDERAR | | | | |
|-----------------------------------|------|--|----|----|----|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Calor requerido | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Disponibilidad de Flujo | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| Integridad del serpentín | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Estudio hidráulico factible | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| De fácil construcción | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Seguridad del proceso | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| TOTAL (Peso*Calificación) | 10 | 17 | 18 | 17 | 17 | 20 |

FUENTE: El Autor

De acuerdo a los resultados de la Tabla 6, la alternativa más viable fue la alternativa 5: El uso de vapor de 600 psig degradado a 400 psig y posteriormente saturado. De acuerdo a esto se realizó un estudio para la implementación de esta.

4.3. Estudio para la implementación de la alternativa más viable

Según los resultados de la matriz de criterios, la alternativa más factible fue degradar vapor de 600 psig a vapor 400 psig para su posterior saturación, que además de entregar el calor requerido para el despojo de solvente en la T-2502, queda con la capacidad de entregar más calor. Esto cuando el proceso lo requiera por aumento de carga a Demex.

Para llevar a cabo la implementación de esta alternativa se planteó lo siguiente:

- ✓ Utilizar el cabezal de 600 psig del banco de tuberías del bloque I y degradarlo a vapor de 400 psig.
- ✓ Para saturar el vapor de 400 psig se requiere agua de calderas, la cual puede ser tomada del cabezal de agua de calderas que se encuentra en el límite sur del banco de tuberías.
- ✓ Para la recuperación del condensado a la salida del serpentín, se puede utilizar el cabezal de condensado de media que se conecta con los intercambiadores E-2515 [11].

A continuación se muestra en detalle la evaluación de cada planteamiento

4.3.1. Flujos requeridos

Se calculó el flujo de vapor de 600 psig con relación al flujo de agua de calderas, con el objetivo que entre los dos se lograra el flujo de 1300 lb/h vapor de 400 psig requerido para satisfacer los requerimientos energéticos deseados por el serpentín. Para esto se utilizó el software Pro II 9.1, en donde se calcularon los flujos. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7. Datos de los flujos.

| Fluido | Flujo [lb/h] |
|-------------------|--------------|
| Vapor de 600 psig | 1190 |
| Agua de calderas | 110 |
| Vapor de 400 psig | 1300 |

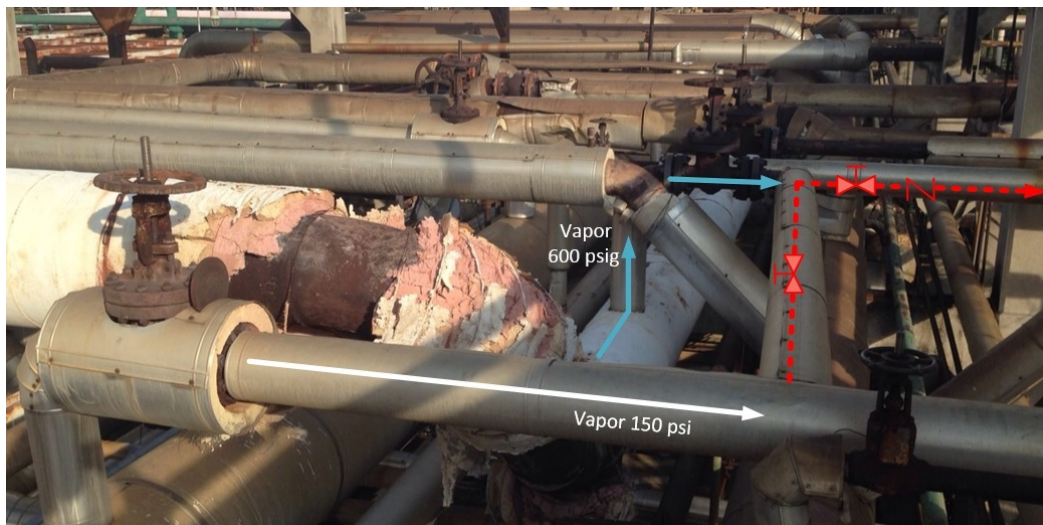
FUENTE: El Autor

4.3.2. Vapor de 600 psig

El vapor de 600 psig es utilizado como fuerza motriz las turbinas del bloque I. En el banco de tuberías del bloque I se encuentra la línea de vapor de 600 psig, la cual se encarga de alimentar la turbina de la bomba NP-2520 B. Basándose en los criterios de diseño de Ecopetrol, en donde dice “Para montajes en bancos de

tuberías, las buenas prácticas limitan el diámetro nominal de la línea a 2 in " [12], se propone implementar una línea de 2 in de rating 600 en el banco de tuberías, que iría desde la brida que une el cabezal de vapor de 600 psig con el de 150 psig como se muestra en la Figura 8, hasta el cabezal de Gasóleo, el cual es la línea de salida del serpentín de la T-2502. Esta nueva línea deberá tener: 2 válvulas de compuerta para restringir o dar paso de flujo cuando sea conveniente. un cheque para evitar la inversión de circulación. Diseño de un cuadro de control de presión como se muestra en la Figura 10. Para garantizar la presión requerida de 400 psig y evitar graves daños en la metalurgia del sistema.

Figura 8. Banco de tuberías del Bloque 1, con líneas propuestas



FUENTE: El Autor. Fotografía tomada el 14 de Julio del 2014

4.3.3. Agua de calderas

El agua de caldera necesaria para saturar el vapor de 400 psig, se sacaría de una línea de toma muestra de $\frac{3}{4}$ in x 800 del cabezal de agua de calderas que se encuentra en el límite sur del banco de tuberías, cuya presión y temperatura son 800 psig y 205°F respectivamente. La nueva línea supuesta de $\frac{1}{2}$ in x 800 se sacaría de una T que tiene el toma muestra, como se observa en la Figura 9 y

llegaría hasta el nuevo cabezal de vapor de 400 psig. Esta línea requiere una válvula de compuerta para restringir y dar paso al flujo cuando sea necesario y el diseño de un cuadro de control de temperatura como se muestra en la Figura 10, para garantizar la temperatura de saturación del vapor de 400 psig.

4.3.4. Condensado

El condensado a la salida del serpentín se puede llevar al cabezal de condensado de media que se conecta con los E-2515, reemplazando la línea de 1 in x150 que se encuentra instalada en la salida del serpentín por una nueva línea de $\frac{3}{4}$ in x 400. En las Figuras 11 y 12 se puede observar lo mencionado. Para el control del calor transferido en el serpentín se debe hacer un cuadro de control de flujo en la línea de condensado, cuya válvula de control baje la presión a 45 psig para llevarlo al cabezal de condensados de media de 38 psig y 200°F y una válvula de compuerta para dar paso o restringir el flujo.

Figura 9. Toma muestra del cabezal de agua de caldera de 800 psig con esquema de la nueva línea para la saturación del vapor.



FUENTE: El Autor. Fotografía tomada el día 14 de Julio del 2014.

Figura 10. Válvulas de control de presión y temperatura propuestas

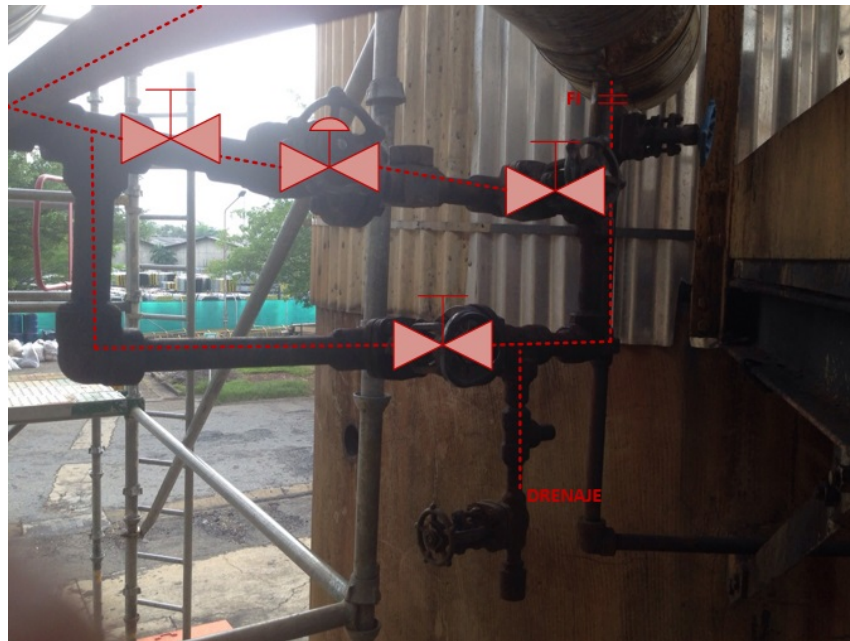


FUENTE: El Autor. Fotografía tomada el día 14 de Julio del 2014.

4.3.5. Esquema del sistema propuesto

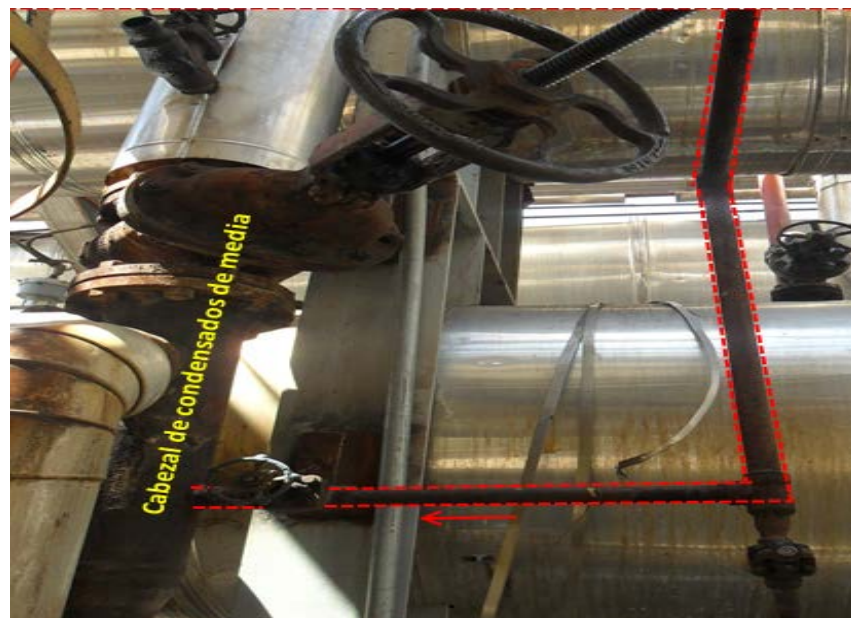
El esquema propuesto se esquematiza en la Figura 13, en donde se pueden observar las líneas, válvulas e instrumentos requeridos para llevar a cabo la presente alternativa, al igual que los respectivos puntos de conexión, los cuales en la Figura 13 se presentan enumerados dentro de un hexágono. En el Anexo J se enumera los puntos de conexión correspondientes.

Figura 11. Línea de condensado y especificación del tramo a cambiar para la instalación del cuadro de control



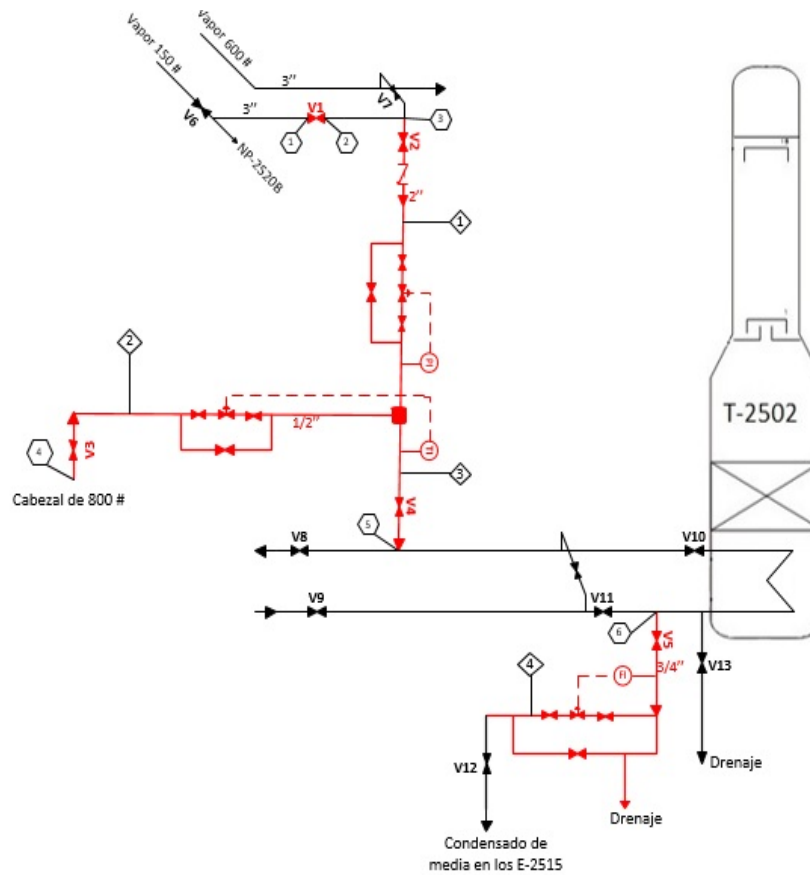
FUENTE: El Autor. Fotografía tomada el día 14 de Julio del 2014.

Figura 12. Conexión de la línea de condensado con el cabezal de condensados de media en los E-2515



FUENTE: El Autor. Fotografía tomada el 14 de Julio del 2014.

FIGURA 13. Esquema de la T-2502 y el serpentín con las líneas propuestas



FUENTE: El Autor

4.3.6. Diseño Válvulas de control y platina de orificio

Para el sistema propuesto se requieren tres cuadros de control: válvula de control de presión, válvula de control de temperatura y válvula de control de flujo, al igual que una platina de orificio (Ver Anexo K).

4.3.6.1. Válvula control de presión

El objetivo de la válvula de control de presión es asegurar que la presión se mantenga en 400 psig a la entrada del serpentín. Los flujos mínimo y máximo se

calcularon según el Manual de criterios de diseño de Ecopetrol [13] y para el cálculo del Cv (Capacidad de la válvula) de la válvula se usó el programa de diseño de válvulas: Fisher Specification Manager. Se escogió una válvula tipo globo de rating 600, de igual porcentaje. (Ver Anexo K.a). En la Tabla 8 se pueden observar los datos obtenidos.

4.3.6.2. Válvula control de temperatura

El objetivo de la válvula de control de temperatura es asegurar que el vapor de 400 psig se mantenga en su temperatura de saturación. Los flujos mínimo y máximo se calcularon según el manual de criterios de diseño y para el cálculo del Cv de la válvula se usó el programa de diseño de válvulas: Fisher Specification Manager. Se escogió una válvula tipo globo de rating 800 de igual porcentaje (Ver Anexo K.b). En la Tabla 9 se pueden observar los datos obtenidos.

4.3.6.3. Válvula control de flujo de condensado

La válvula de control de flujo de condensado, además de controlar, mantendrá un tiempo de residencia del fluido dentro del serpentín, al igual que facilitará bajar la presión hasta 45 psig, que es la presión del cabezal de condensado de media. Los flujos mínimo y máximo se calcularon según el manual de criterios de diseño, y para el cálculo del Cv de la válvula se usó el programa de diseño de válvulas: Fisher Specification Manager. Se escogió una válvula tipo globo de rating 400 de igual porcentaje (Ver Anexo K.c). la Tabla 10 se pueden observar los datos obtenidos.

Tabla 8. Especificaciones de la válvula de control de presión del vapor de 400 psig

| Variable | Flujo mínimo | Flujo normal | Flujo máximo |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Flujo [lb/h] | 650 | 1310 | 1980 |
| Presión entrada [psig] | 600 | 600 | 600 |
| Presión salida [psig] | 400 | 350 | 300 |
| Temperatura [°F] | 640 | 640 | 640 |
| Gravedad específica | 1 | 1 | 1 |
| Cv | 0,90 | 1,70 | 2,52 |
| Diámetro línea [in] | 2 | 2 | 2 |
| Tipo de válvula | Globo | Globo | Globo |
| Falla | Cerrada | Cerrada | Cerrada |

FUENTE: El Autor

Tabla 9. Especificaciones de la válvula de control de temperatura para garantizar la temperatura de saturación del vapor de 400 psig

| Variable | Flujo mínimo | Flujo normal | Flujo máximo |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Flujo [gpm] | 0,15 | 0,3 | 0,45 |
| Presión entrada [psig] | 800 | 800 | 800 |
| Presión salida [psig] | 410 | 410 | 410 |
| Temperatura [°F] | 160 | 160 | 160 |
| Gravedad específica | 1 | 1 | 1 |
| Cv | 0,006 | 0,015 | 0,023 |
| Diámetro línea [in] | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Tipo de válvula | Globo | Globo | Globo |
| Falla | Cerrada | Cerrada | Cerrada |

FUENTE: El Autor

Tabla 10. Especificaciones de la válvula de control de flujo de condensado a la salida del serpentín de la T-2502

| Variable | Flujo mínimo | Flujo normal | Flujo máximo |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Flujo [lb/h] | 0,6 | 2,5 | 4,5 |
| Presión entrada [psig] | 600 | 400 | 150 |
| Presión salida [psig] | 45 | 45 | 45 |
| Temperatura [°F] | 300 | 300 | 300 |
| Gravedad especifica | 1 | 1 | 1 |
| Cv | 0,02 | 0,14 | 0,43 |
| Diámetro línea [in] | 0,75 | 0,75 | 0,75 |
| Tipo de válvula | Globo | Globo | Globo |
| Falla | Abierta | Abierta | Abierta |

FUENTE: El Autor

4.3.6.4. Platina de orificio

La válvula de control de flujo de condensado operará en sintonía con el nuevo medidor de flujo a la salida de serpentín donde se instalará la platina de orificio concéntrica para dicho flujo. Para el diseño de la platina se usó el programa ISO Flow Element Sizing Programs. Los datos calculados fueron los siguientes:

- Diámetro de la platina: 0,30 in.
- Diámetro de orificio para el venteo: 0,030 in.
- $\beta = 0,409$

En el Anexo L, se muestra el diseño de la platina.

4.3.7. Análisis Hidráulico

Se realizó un análisis hidráulico para el sistema planteado con el fin de constatar las condiciones de operación propuestas y mirar si el sistema respondería correctamente en el manejo del fluido para mantener la d carga en la Unidad Demex.

Para esta evaluación se utilizó el software de simulación PIPEPHASE 9.5, el cual permitió revisar la hidráulica, en especial los diferenciales de presión y las velocidades.

En el Anexo M, se muestran los resultados obtenidos.

6. CONCLUSIONES

- ✓ La práctica industrial permitió ampliar los conocimientos en la industria petroquímica, y gracias al Departamento de Refinación de fondos una profundización y aplicación de los conceptos adquiridos a lo largo de la carrera.
- ✓ Se construyó una matriz de criterios la cual fue de gran ayuda, ya que permitió evaluar de manera más fácil cada alternativa según los criterios propuestos y de esta forma facilitó la selección de alternativa más factible para abordar la problemática planteada.
- ✓ Se analizaron varias alternativas de las cuales se concluyó que la mejor manera de evitar una disminución de carga en la unidad Demex cuando Viscorreductora II se encuentra fuera de servicio es utilizar otro fluido de calentamiento en el serpentín de la T-2502, siendo la alternativa más viable y llamativa el uso de vapor saturado de 400 psig.
- ✓ El estudio hidráulico corroboró que el diámetro de las líneas propuestas era el indicado para satisfacer los requerimientos de presión a la llegada de las líneas, al igual que las velocidades del fluido se encontraban dentro de rango permisibles por los criterios de diseño.
- ✓ El fluido que se escogió para remplazar el gasóleo cuando la Unidad Viscorreductora se encuentre fuera de servicio puede usarse de manera permanente ya que se cuenta con disponibilidad de vapor de 600 psig.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Cumplir con los estándares para la instalación de tuberías de proceso en la planta descritos en el código ASME B31.3 “Process Piping”.
- ✓ Cumplir con los estándares para la instalación de válvulas y bridas descritos en el código ASME B16.5 “Steel Pipe Flanges and Flanged Fittings”.
- ✓ Ubicar los cuadros de control a una altura que permita el fácil acceso y manejo por el operador.
- ✓ Realizar un consenso de especialistas de diferentes disciplinas de ingeniería, para revisar aspectos tales como: riesgos operacionales, estrategias de control y costos.

BIBLIOGRAFÍA

FOSTER WHEELR USA CORPORATION. Demex Unit Revamp. Barrancabermeja: GRB, 1988. 36p.

VICEPRESIDENCIA DE REFINACIÓN Y PETROQUIMICA, GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Demex. Barrancabermeja.2007.

VICEPRESIDENCIA DE REFINACIÓN Y PETROQUIMICA, GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Viscosreductora II. Barrancabermeja.2007.

VICEPRESIDENCIA DE REFINACIÓN Y PETROQUIMICA, GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA. Manual de Descripción de Procesos de FCCU UOP 1. Barrancabermeja.2009.

VICEPRESIDENCIA DE SERVICIOS Y TECNOLOGIA DE NORMAS Y ESTANDARES. Manual Técnico de criterios de diseño de la especialidad de Ingeniería de procesos. Barrancabermeja.2010.

PERRY, R. H, Green, D.W., Maloney, J.O. "Perry's Chemical Enginnering Handbook", 7th ed. New York: Mc Graw Hill. 2577p

CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y teberias. 15 ed. New York: Mc Graw Hill, 1999. 215p

SMSCI. PIPEPHASE, Simulation software Versión 9.5. 2010.

CORRERO EVA. Diseño básico de un sistema de vapor para calefacción de tanques de almacenamiento de aceite vegetal. Cádiz. 2009. 331p. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Universidad de Cádiz. Facultad de Ciencias.

ACUTECH CONSULTING Inc. FLANGE RATING INFORMATION, Simulation software versión 1.0 c.

INVENSYS SYSTEM Inc. PRO/II, Simulation software versión 9.1. 2011.

SPECIFICATION MANAGER. FISHER. Simulation software versión 2.10. 2014.

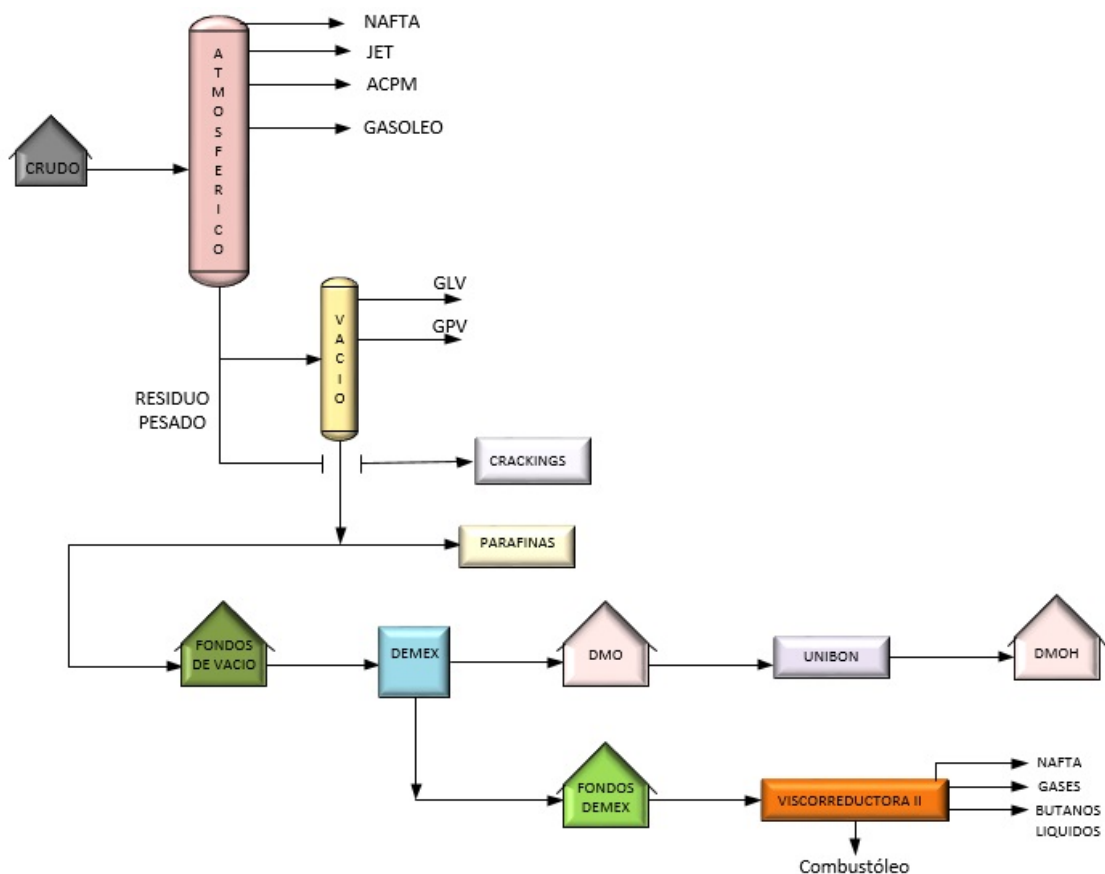
CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] ECOPETROL S.A. Marco legal. {En línea}. {2 de Marzo de 2015} disponible en internet: (<http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/marco-legal>).
- [2] ECOPETROL S.A. Manual de descripción de procesos de la unidad Demex 2007_rev0. Barrancabermeja. 2007. p.10.
- [3] FOSTER WHEELER USA CORPORATION DEMEX Unit Revamp. Barrancabermeja. 1968.136.p
- [4] GILLIS, D y VAN TINE, F. What's new insolvent deasphalthing? UOP & Foster Wheeler team up in solvent deasphalting.1998.13.p
- [5] ECOPETROL S.A. Manual de descripción de procesos de la unidad Demex 2007_rev0. Barrancabermeja. 2007. p.17
- [6] ECOPETROL S.A. Manual de descripción de procesos de la unidad Demex 2007_rev0. Barrancabermeja. 2007. p.21.
- [7] ECOPETROL S.A. Refinería de Barrancabermeja Celebra 93 años de refinar crudo para el país. {En línea}. {5 de Marzo de 2015} disponible en: (<http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/refineria-de-barrancabermeja-celebra-93>)
- [8] ECOPETROL S.A. Manual de descripción de procesos de la unidad Demex 2007_rev0. Barrancabermeja. 2007. p.23.
- [9] CAO. Eduardo. Intercambiadores de calor. Buenos Aires: Adquirim. 1983. p.2.
- [10] ECOPETROL S.A. Manual de descripción de procesos de la unidad FCCU UOP 1. Barrancabermeja. 2009. p.22.
- [11] ECOPETROL S.A. P&ID Unidad Demex. Barrancabermeja. 2003
- [12] ECOPETROL S.A. Manual técnico de criterios de diseño de la especialidad de Ingeniería de Procesos. Barrancabermeja. 2010. p.20.

[13] ECOPETROL S.A. Manual técnico de criterios de diseño de la especialidad de Ingeniería de Procesos. Barrancabermeja. 2010. p.42.

ANEXOS

Anexo A. Esquema del proceso de carga hasta la unidad de Viscorreductora II



FUENTE: Manual de la Unidad Demex

ANEXO B. Cálculo de calor en PRO II 9.1

La simulación del serpentín de la T-2502 se asemejó a un intercambiador de calor de tubo y carcaza.

Para esto se utilizó el software PRO II, en donde se tomó como modelo el estado actual del serpentín con los siguientes datos:

Tubo: Gasóleo con un flujo de 4947,8 ft³/h

Casco: DMO + Solvente con un flujo 1684,1 ft³/h

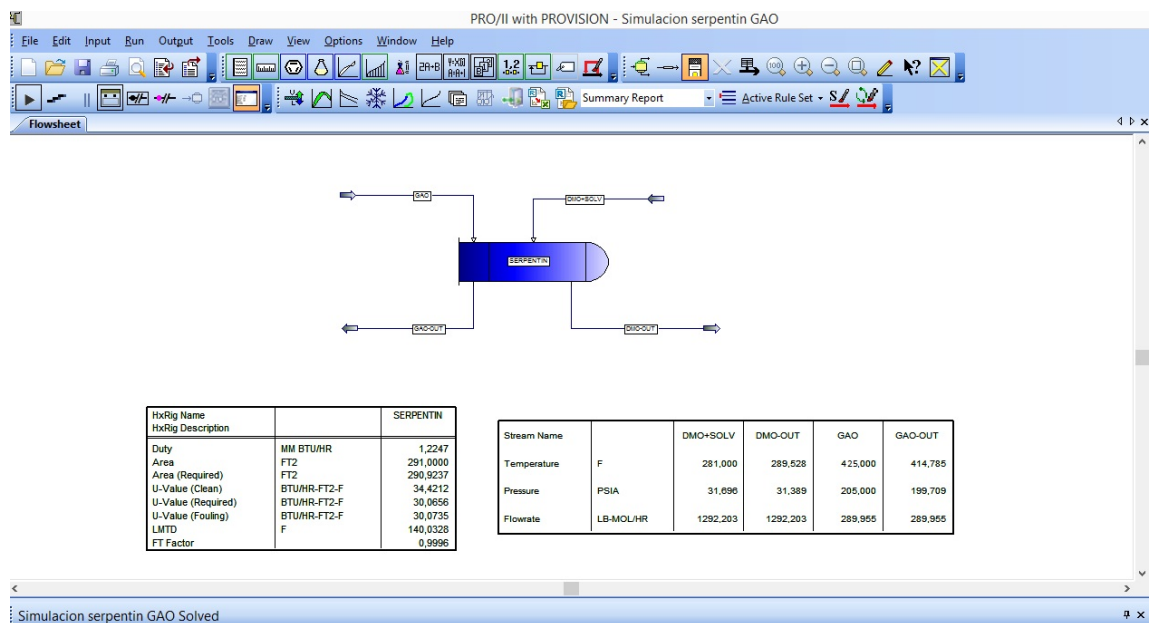
Área de transferencia: 291 m²

Número de tubos: 12

La configuración del intercambiador se seleccionó de forma que el calor diera 1,22 MBTU/h que es el calor requerido por el sistema para su calentamiento. Al realizar varias variaciones, la configuración escogida fue: DGU

En la Figura A se puede observar el modelo simulado.

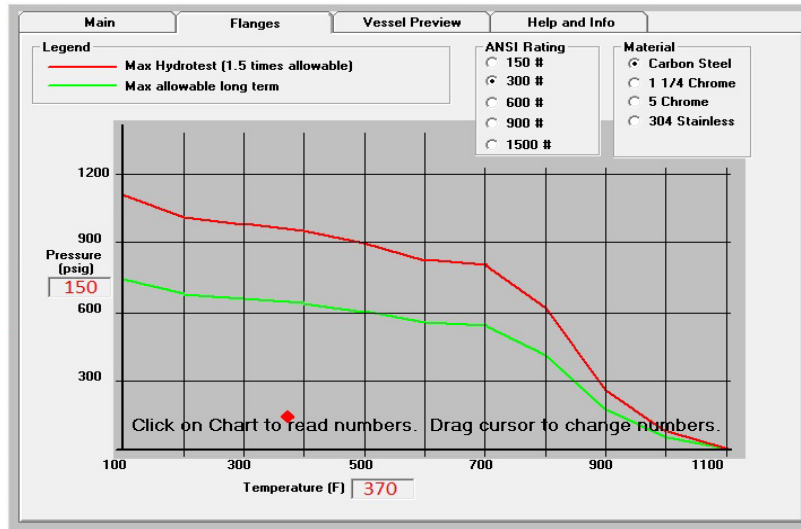
FIGURA A. Simulación del sistema actual



FUENTE: El Autor. Simulación en PRO II

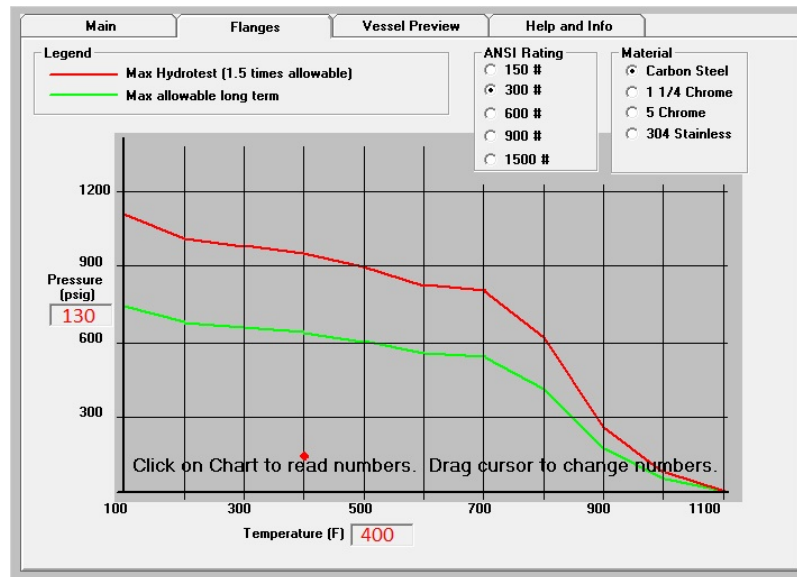
Tomando como base el modelo simulado que se muestra en la figura A, se cambió el gasóleo por cada fluido propuestos con sus respectivas condiciones de operación y dejando fija la corriente de DMO + Solvente se calculó el calor con diferentes tasas de flujo de cada fluido.

ANEXO C. Presión y temperatura del vapor de 150 psig dentro del rango permisible por el serpentín



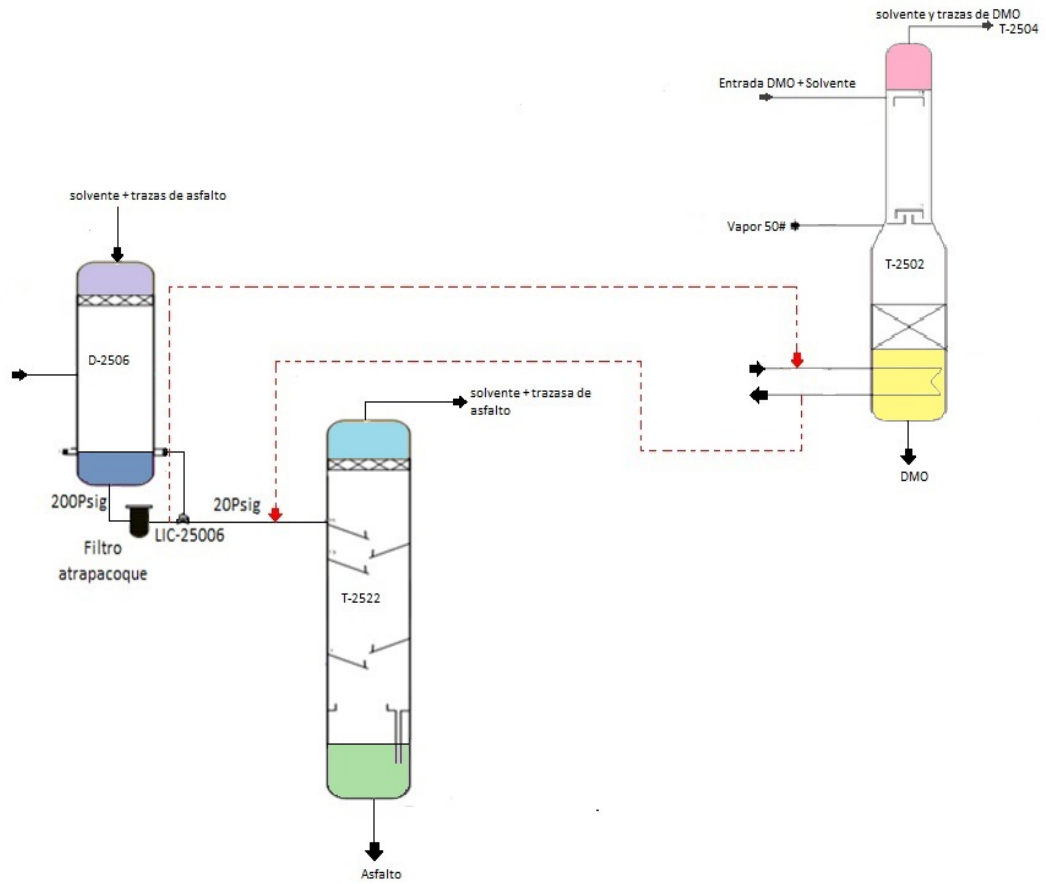
FUENTE: El Autor. Flange rating information.

ANEXO D. Presión y temperatura del slurry caliente dentro del rango permisible por el serpentín



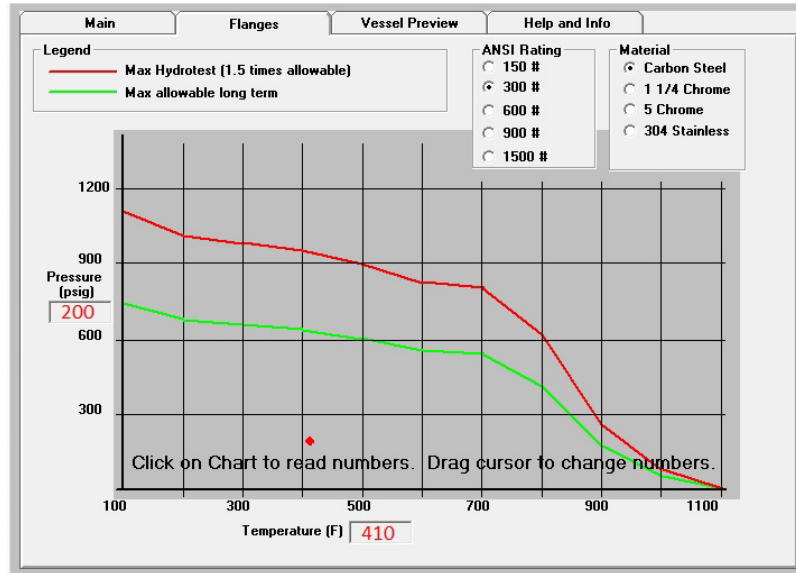
FUENTE: El Autor. Flange rating information.

Anexo E. Esquema del sistema propuesto para el uso de los fondos Demex



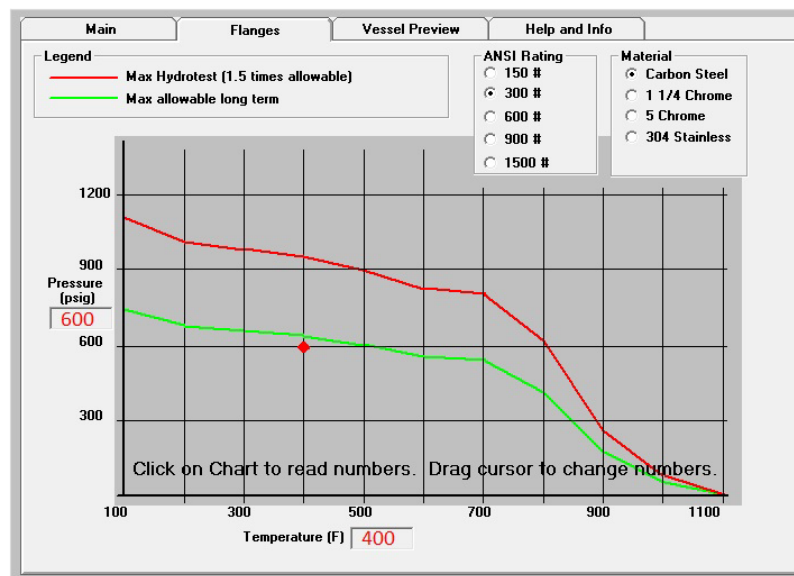
FUENTE: El Autor. Manual de la Unidad Demex.

ANEXO F. Presión y temperatura de los fondos Demex dentro del rango permisible por el serpentín



FUENTE: El Autor. Flange rating information

ANEXO G. Presión y temperatura del condensado de vapor de 600 psig dentro del rango permisible por el serpentín



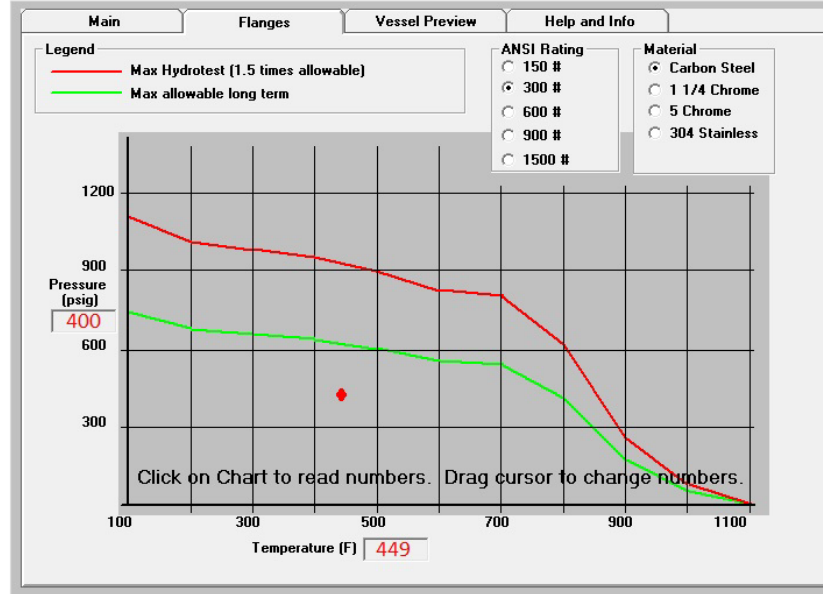
FUENTE: El Autor. Flange rating information

ANEXO H. Imagen del banco de tuberías y la T-2502



FUENTE: El Autor. Fotografía tomada el 14 de Julio del 2014.

ANEXO I. Presión y temperatura del vapor saturado de 400 psig dentro del rango permisible por el serpentín



FUENTE: El Autor. Flange rating information

Anexo J. Listado de puntos de conexión

| Puntos de conexión | Especificación |
|--------------------|--|
| 1 (3 in x 600#) | Unión de la válvula V1 con el cabezal de vapor de 150 psig. |
| 2 (3 in x 600#) | Unión de la válvula V1 con la línea que comunica con el vapor de 600 psig. |
| 3 (2 in x 600#) | Unión de la nueva línea de vapor, con la facilidad del cabezal de vapor de 600Psig. |
| 4 (1/2 in x 600#) | Unión del toma muestra del cabezal de agua de caldera con la nueva línea de agua para la saturación del vapor. |
| 5 (2 in x 600#) | Unión de la nueva línea de vapor de 400 psig con el cabezal de gasóleo en la salida del serpentín. |
| 6 (1 in x 600#) | Unión del cabezal de gasóleo en la entrada del serpentín con el tramo nuevo de la línea de condensado. |

FUENTE: El Autor.

Anexo K. Diseño válvulas de control

Con base al Manual Técnico de criterios de diseño de la especialidad de ingeniería de procesos, en donde se especifica diferentes criterios que se deben tener en cuenta para el desarrollo de proyectos en Ecopetrol S.A. En este caso se tuvieron en cuenta los criterios de diseño de las válvulas de control.

✓ Flujo en válvula

Los flujos máximos y mínimos de las válvulas de control deben ser:

- Flujo máximo = 150% del flujo de operación
- Flujo mínimo = 50 % del flujo de operación.

✓ Porcentaje de Apertura

El porcentaje de apertura se debe encontrar entre un 30% y 70% para garantizar un buen control.

✓ Tipo de válvula

El tipo de válvula de control a seleccionar debe obedecer a las características particulares del sistema, como fluido a manejar y presión disponible; Sin embargo se deben tener en cuenta los siguientes criterios.

- Válvula de globo: Para líquidos o gases en donde la presión disponible permita una caída de presión en la válvula superior a 10 psig.
- Válvula de bola: Para líquidos donde la presión disponible permita una caída de presión inferior a 10 psig.
- Válvula de mariposa: Para control en manejo de líquidos o gas con bajo requerimiento de precisión.

a. Válvula control de presión

Esta válvula se diseñó teniendo en cuenta los parámetros anteriores.

✓ Flujos

- Flujo normal

El cálculo del flujo normal se hizo en base a una presión de entrada a la válvula de 600 psig y una caída de presión de 250 psig. La presión de salida sería de 350 psig; con esta presión se requeriría un flujo de 1310 lb/h para alcanzar el calor requerido.

- Flujo mínimo

El cálculo del flujo mínimo se hizo en base a una presión de entrada a la válvula de 600 psig y una caída de presión de 200 psig. La presión de salida sería de 400 psig; con esta presión se requiere un flujo de 1300 lb/h para alcanzar el calor requerido, a este flujo se le sacó el 0,5 según condiciones de diseño, dando como resultado un flujo de 650 lb/h.

- Flujo máximo

El cálculo del flujo máximo se hizo en base a una presión de entrada a la válvula de 600 psig y una caída de presión de 300 psig. La presión de salida sería de 300 psig; con esta presión se requeriría un flujo de 1320 lb/h para alcanzar el calor requerido, a este flujo se le sacó el 1,5 según condiciones de diseño, lo que arrojo un flujo de 1980 lb/h.

El cálculo del calor a diferentes presiones se hizo con ayuda del software PRO II.

✓ Tipo de válvula

Se escogió una válvula tipo globo, ya que es utilizada para caídas de presión superior a 10 psig.

- ✓ Falla de la válvula

La falla de la válvula se escogió teniendo en cuenta la seguridad del proceso de manera que si se llegara a presentar alguna falla de energía la posición más segura de la válvula sería cerrada.

- ✓ Coeficiente de Flujo (Cv)

Para el cálculo el Cv se usó el programa Fisher Specification Manager, en el cual se ingresaron como: flujo, presión de entrada, caída de presión, temperatura entrada, y datos requeridos de la Tabla A.

Tabla A. Datos requeridos del vapor de agua

| Fluid or Compound | M-Molecular Wt. | gamma, γ -Ratio of Specific Heats | Pv-Vapor Pressure @ 70F (PSIG) | Tc-Critical Temp (deg R) | Pc-Critical Pressure (PSIA) | Gl-Specific Gravity of Liquid @ 60F (3,4,10 for hydro-carbons) | Gg-Specific Gravity of Gas (2,10 for hydro-carbons) |
|-------------------------|-----------------|--|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--|---|
| n-Butane | 58.120 | 1. 090 | 51.6(11) | 765.30 | 550.70 | 0.5844(7) | 2. 0068 |
| n-Heptane | 100.20 | 1. 050 | 1. 620(11) | 972.29 | 396.72 | 0.6882 | 3.4596 |
| n-Octane | 114.22 | 0 | 0.537(11) | 1025.0 | 361.53 | 0.7068 | 3.9439 |
| Natural Gas (estimated) | 17.74 | 1. 27 | | 365.67 | 672 | | |
| Nitric Oxide | 30.00 | 1. 400 | | 323.00 | 940.80 | | |
| Nitrogen | 28.13 | 1. 40 | | 227.25 | 492.42 | 0.81(3) | 0.97 |
| Oxygen | 32.00 | 1. 40 | | 278.60 | 737.62 | 1. 14(3) | 1. 105 |
| Propane | 44.09 | 1. 130 | 190(11) | 666.00 | 618.70 | 0.5077(7) | 1. 5225 |
| Water Vapor | 18.02 | 1. 330 | | 1165.0 | 3206.67 | 1. 39 | • 21 |

FUENTE: Chapter 10 – Engineering Data, pp. 200-202 and pp. 203-205 of the Control Valve Handbook, Third Edition, by Fisher Controls.

En las Figuras B, C y D se pueden observar los datos arrojados por el programa.

FIGURA B. Instalación de datos en Fisher para el diseño de la válvula de control de presión

The screenshot shows the Fisher Specification Manager software interface. The title bar reads "Fisher® Specification Manager". The menu bar includes "File", "Edit", "Profile", "Contacts", "View", and "Help". The toolbar contains icons for file operations and navigation. The project tree on the left shows "MyProjects" with sub-items "presion" and "V3". The main window displays the "Installation Data" configuration screen, which is part of a multi-step process (1-Installation Data, 2-Valve Sizing, 3-Valve Selection, 4-Valve Construction, 5-Actuator Selection, 6-Positioner, 7-Additional Accessories). The "Installation Data" section includes the following fields:

- Style:** Globe (dropdown), [D/F](#)
- Rating:** CL600 (dropdown), [D/F](#)
- Nominal Inlet Pipe Size:** 2 (dropdown), Inches (dropdown), [D/F](#). **Schedule:** 80 (dropdown), **Thickness:** (input field)
- Nominal Outlet Pipe Size:** 2 (dropdown), [D/F](#). **Schedule:** 80 (dropdown), **Thickness:** (input field)
- End Connection:** (dropdown), [L](#)
- Insulation:** (dropdown), **Thickness:** (input field), **Noise Deduction:** (input field) dB(A)
- Allowable Noise:** 85 (input field) dB(A)
- Body to Bonnet bolt & nuts material:** Manufacturer Standard (dropdown), **Packing Flange Studs & Nuts:** Manufacturer Standard (dropdown)
- Design Pressure:** 600 (input field), psia (dropdown)
- Design Temperature:** 640 (input field), deg F (dropdown)

FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

Figura C. Datos de entrada en el programa para el diseño de la válvula de control de presión

The screenshot shows the Fisher Specification Manager interface. The main data table is as follows:

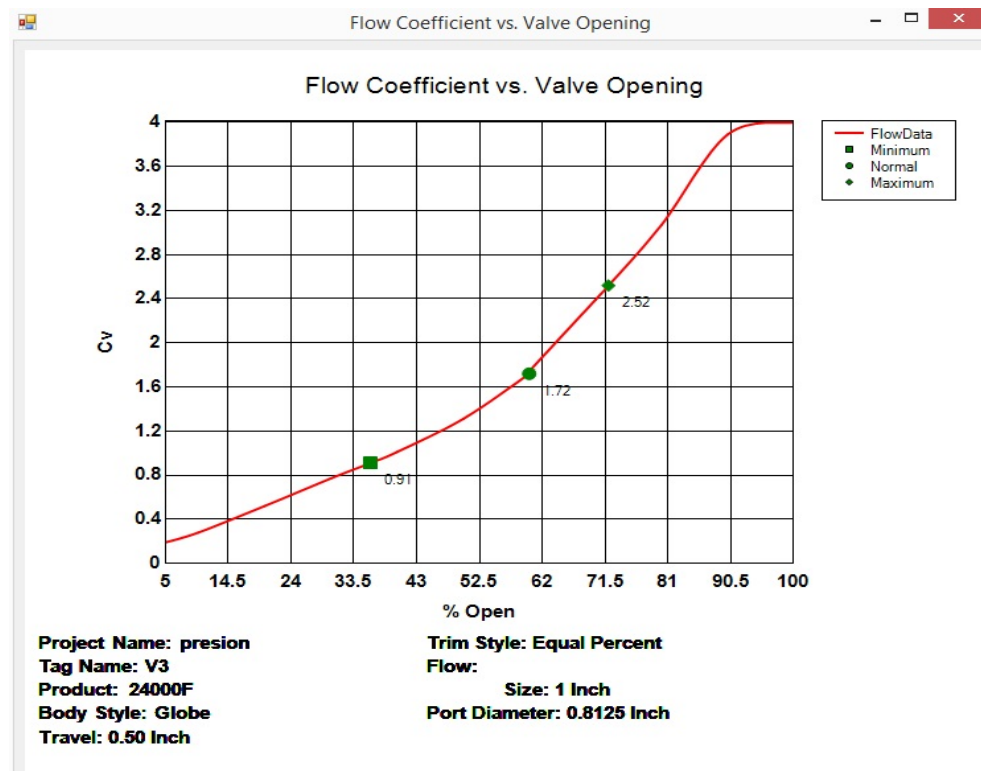
| Name | Units | Minimum | Normal | Maximum | Others |
|-------------------------------------|-------|----------|----------|----------|--------|
| Warnings: | | YES | YES | YES | YES |
| SIZING INPUTS | | | | | |
| Gas | | | | | |
| Mass Flow Rate Gas | lb/h | 650.000 | 1310.000 | 1980.000 | |
| Inlet Pressure | psig | 600.000 | 600.000 | 600.000 | |
| Pressure differential | psi | 200.000 | 250.000 | 300.000 | |
| Inlet Temperature | deg F | 640.0000 | 640.0000 | 640.0000 | |
| Molecular Weight / Specific Gravity | M | 18.020 | 18.020 | 18.020 | |
| Ratio of specific heats | | 1.330 | 1.330 | 1.330 | |
| Critical Pressure | psia | 3206.670 | 3206.670 | 3206.670 | |
| Critical Temperature | deg R | 705.330 | 705.330 | 705.330 | |
| Inlet Compressibility Factor | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Pressure drop ratio factor (xt) | | 0.650 | 0.650 | 0.650 | 0.650 |
| IEC NOISE INPUTS | | | | | |
| Outlet temperature | deg F | | | | |
| Outlet Compressibility Factor | | | | | 1.000 |
| Valve Diameter | in | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Valve/Trim for aerodynamic noise | | | | | |
| Aerodynamic distance Rn | in | | | | 39.37 |
| Valve style modifier (Fd) | | 0.350 | 0.350 | 0.350 | 0.350 |
| Recovery Factor (FI) | | 0.900 | 0.900 | 0.900 | 0.900 |
| Upstream pipe size | in | 2 | 2 | 2 | 2 |

On the right side of the interface, the following configuration options are visible:

- Sizing For:**
 - Liquid
 - Gas
 - Vapor
 - Steam
 - Fisher Real Gas
 - Water
 - Pulp
 - 2-phase liquid/gas
 - 2-phase liquid/vapor
 - Simple Cv
- Diffuser Model:** None
- Design Condition:** Minimum
- Solve For:**
 - Cv
 - dP
 - Q (Flow)
- Piping:**
 - Size/Schedule
 - Size/Thickness
- Estimate:**
 - Compressibility
- Default Wizard:**
 - Calculate**
 - Cancel Conditions

FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

FIGURA D. Datos del Cv arrojados por el programa para el diseño de la válvula de control de presión



FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

b. Válvula control de temperatura

Esta válvula se diseñó teniendo en cuenta los criterios de diseño.

✓ Flujos

- Flujo normal

El flujo normal es el flujo de agua de calderas requerido para saturar el vapor, este es igual a 0,3 gpm (110 lb/h), con una presión de entrada a la válvula de 800 psig y una caída de presión de 390 psig. La presión de salida sería de 410 psig.

- Flujo mínimo

$$\text{Flujo mínimo} = 0,5 * 0.3 \text{ gpm}$$

$$\text{Flujo mínimo} = 0,15 \text{ gpm}$$

- Flujo máximo

$$\text{Flujo máximo} = 1,5 * 0,3 \text{ gpm}$$

$$\text{Flujo máximo} = 0,45 \text{ gpm}$$

- ✓ Tipo de válvula

Se escogió una válvula tipo globo, ya que es utilizada para caídas de presión superior a 10 psig.

- ✓ Falla de la válvula

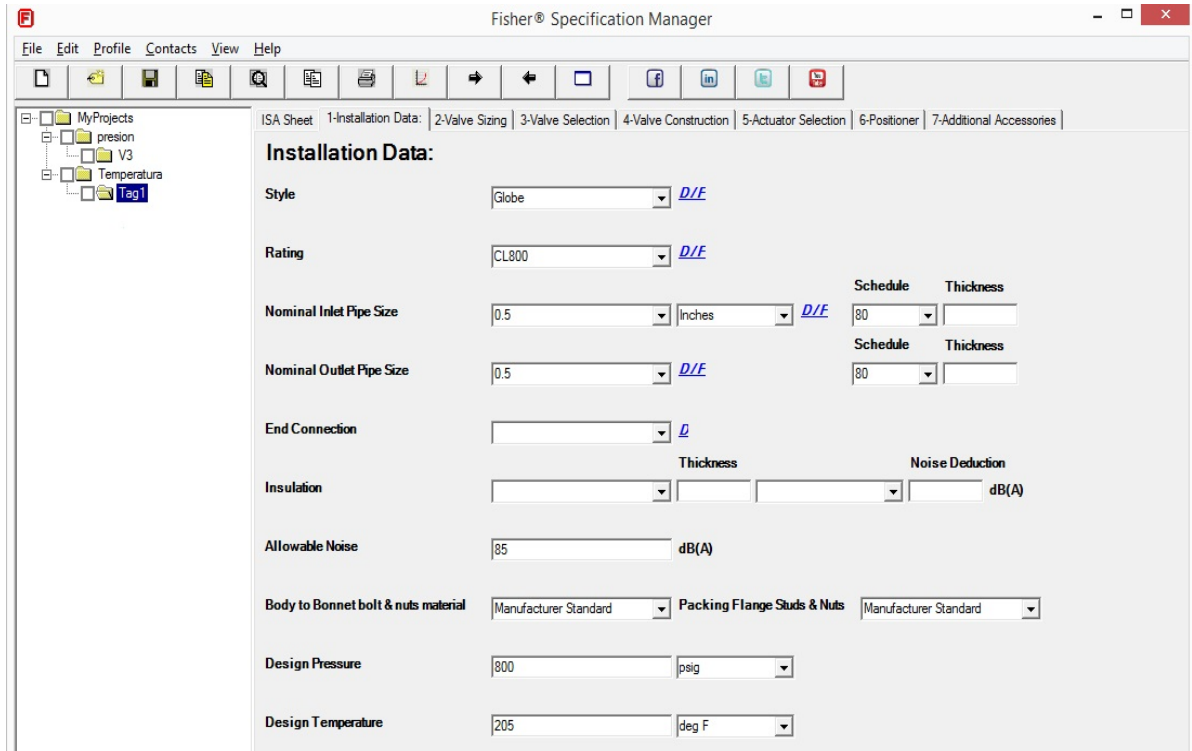
La falla de la válvula se escogió teniendo en cuenta la seguridad del proceso de manera que, si se llegara a presentar alguna falla de energía la posición más segura de la válvula sería cerrada.

- ✓ Coeficiente de Flujo (Cv)

Para el cálculo el Cv se usó el programa Fisher Specification Manager, en el cual se ingresaron como: flujo, presión de entrada, caída de presión, temperatura entrada.

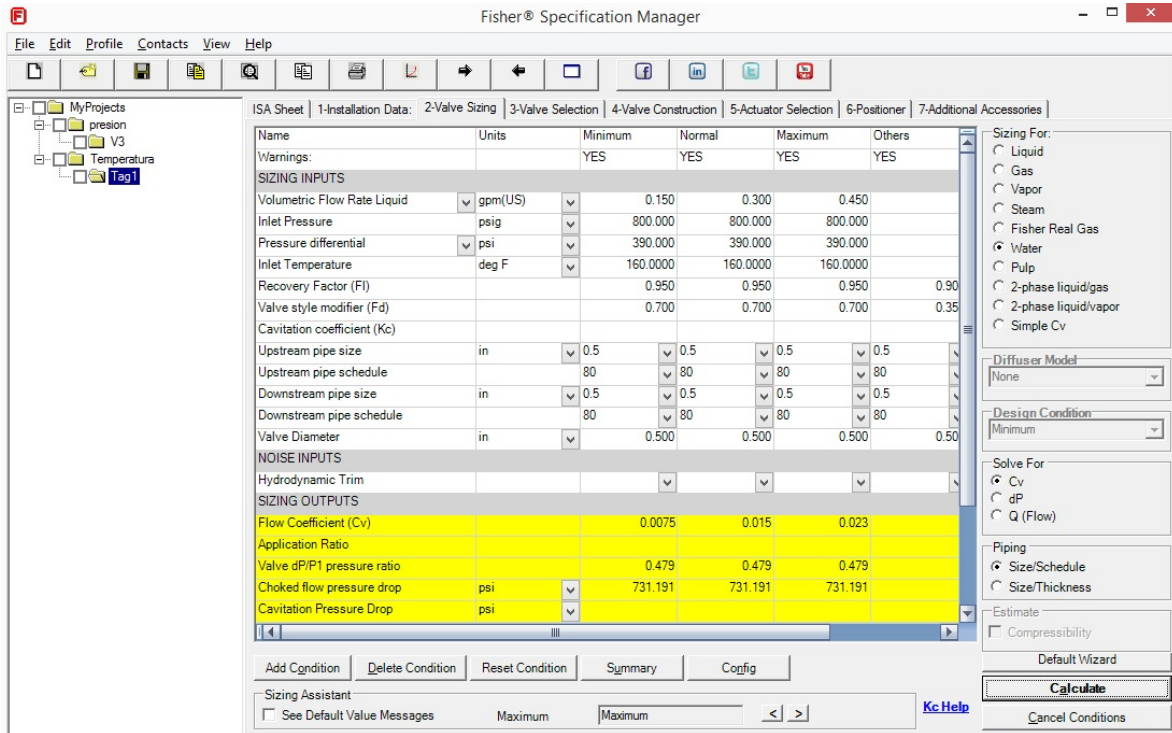
En las Figuras E, F y G se pueden observar los datos arrojados por el programa.

FIGURA E. Instalación de datos en Fisher para el diseño de la válvula de control de temperatura



FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

Figura F. Datos de entrada en el programa para el diseño de la válvula de control de temperatura



FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

FIGURA G. Datos del Cv arrojados por el programa para el diseño de la válvula de control de temperatura



FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

c. Válvula control de flujo

Esta válvula se diseñó teniendo en cuenta los criterios de diseño.

✓ Flujos

- Flujo normal

El cálculo del flujo normal se hizo en base a una presión de entrada a la válvula de 400 psig y una caída de presión de 355 psig. La presión de salida sería de 45 psig, que es la presión requerida por el cabezal de

condensado de media. Con esta presión el flujo de salida de condensado sería de 2,6 gpm (1300 lb/h).

- Flujo mínimo

El cálculo del flujo mínimo se hizo en base a una presión de entrada a la válvula de 600 psig ya que esta la máxima presión que soporta el serpentín y una caída de presión de 550 psig. La presión de salida sería de 45 psig; con esta presión se requiere un flujo de 1,2 gpm (600 lb/h) para alcanzar el calor requerido, a este flujo se le sacó el 0,5 según condiciones de diseño, dando como resultado un flujo de 0,6 gpm (300 lb/h).

- Flujo máximo

El cálculo del flujo máximo se hizo en base a una presión de entrada a la válvula de 150 psig; ya que la línea que se propone para el uso del vapor de 600 psig queda con una facilidad de manejar vapor de 150 psig, la válvula tendría una caída de presión de 300 psig. La presión de salida sería de 45 psig; con esta presión se requeriría un flujo de 3 gpm (1500 lb/h) para alcanzar el calor requerido, a este flujo se le sacó el 1,5 según condiciones de diseño, lo que arrojo un flujo de 4,5 gpm (2250 lb/h).

El cálculo del calor a diferentes presiones se hizo con ayuda del software PRO II .

✓ Tipo de válvula

Se escogió una válvula tipo globo, ya que es utilizada para caídas de presión superior a 10 psig.

✓ Falla de la válvula

La falla de la válvula se escogió teniendo en cuenta la seguridad del proceso de manera que, si se llegara a presentar alguna falla de energía la posición más segura de la válvula sería Abierta, para evitar retención de líquido dentro del serpentín.

✓ Coeficiente de Flujo (Cv)

Para el cálculo el Cv se usó el programa Fisher Specification Manager, en el cual se ingresaron como: flujo, presión de entrada, caída de presión, temperatura entrada.

En las Figuras H, I e J se pueden observar los datos arrojados por el programa.

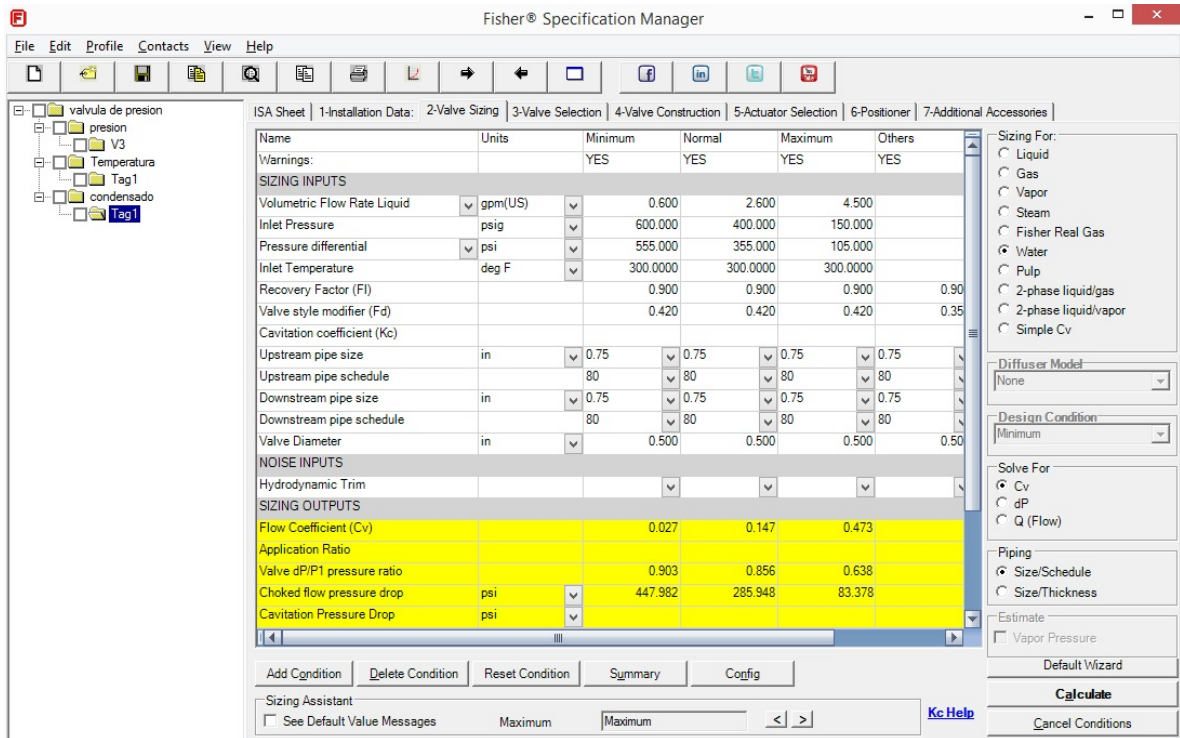
FIGURA H. Instalación de datos en Fisher para el diseño de la válvula de control de flujo

The image shows a screenshot of the Fisher Specification Manager software interface. The window title is "Fisher® Specification Manager". The menu bar includes "File", "Edit", "Profile", "Contacts", "View", and "Help". The toolbar contains various icons for file operations and navigation. The main workspace is titled "Installation Data:" and contains the following fields:

- Style:** Globe (dropdown)
- Rating:** CL400 (dropdown)
- Nominal Inlet Pipe Size:** 0.75 (dropdown), Inches (dropdown), Schedule: 80, Thickness: (input field)
- Nominal Outlet Pipe Size:** 0.75 (dropdown), Schedule: 80, Thickness: (input field)
- End Connection:** (dropdown)
- Insulation:** (dropdown), Thickness: (input field), Noise Deduction: (input field) dB(A)
- Allowable Noise:** 85 dB(A)
- Body to Bonnet bolt & nuts material:** Manufacturer Standard (dropdown), Packing Flange Studs & Nuts: Manufacturer Standard (dropdown)
- Design Pressure:** 600 psig (dropdown)
- Design Temperature:** 600 deg F (dropdown)
- ANSI Shutoff:** (dropdown)

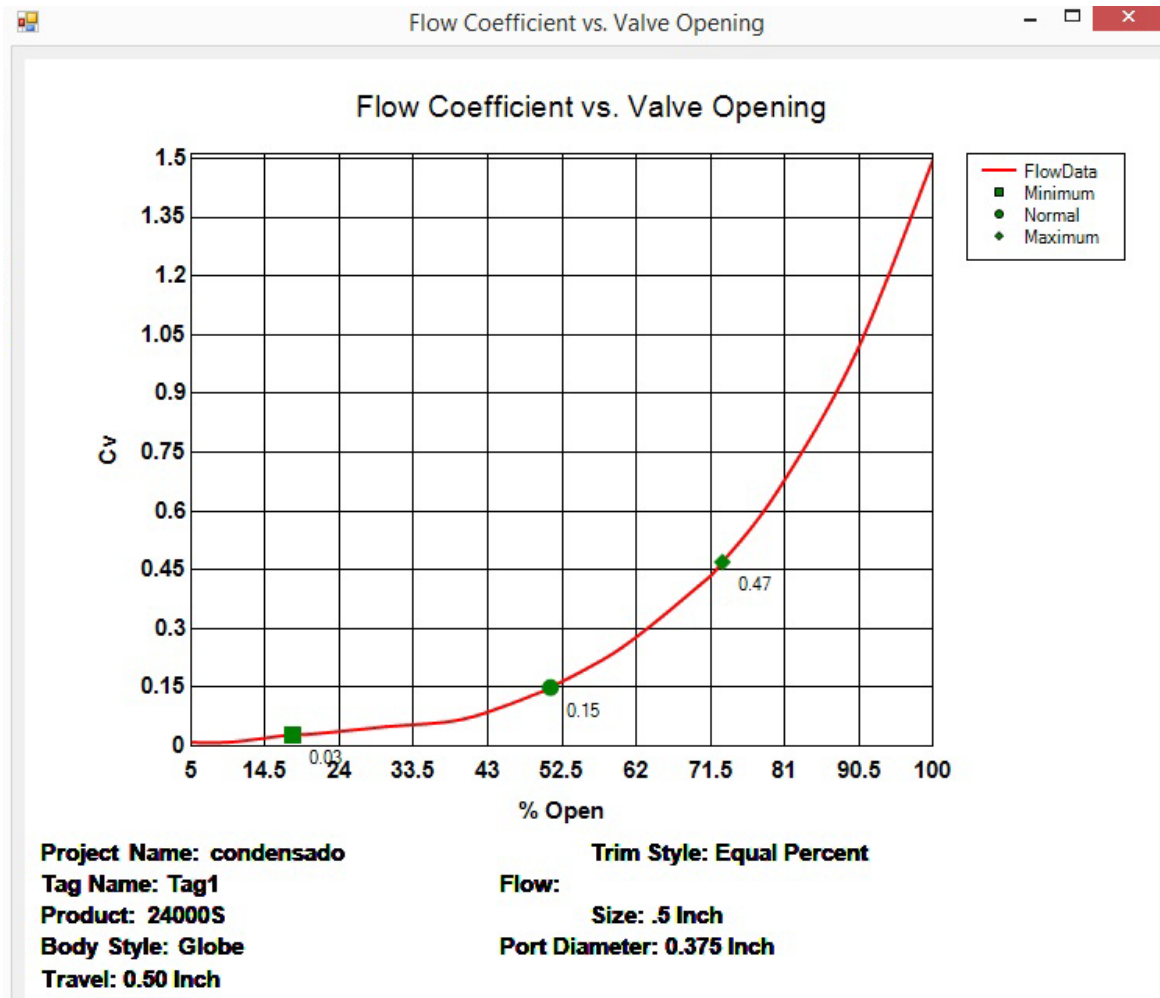
FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

Figura I. Datos de entrada en el programa para el diseño de la válvula de control de flujo



FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

FIGURA J. Datos del Cv arrojados por el programa para el diseño de la válvula de control de flujo



FUENTE: El Autor. Fisher Specification Manager

Anexo L. Diseño de la platina de orificio

Para el diseño de la platina de orificio se usó el programa “ISO Flow Element Sizing Programs”. Para su diseño se requirió el input de los siguientes datos: flujo [gpm], temperatura del fluido [°F], presión de entrada [psig], presión de descarga [psig] y datos que dependen de las propiedades del fluido y de las condiciones en este caso Agua, tales como: presión de vapor, gravedad específica y viscosidad. Se utilizó como premisa de diseño que la relación (β) entre el diámetro interior de la tubería y el del orificio estuviera dentro del rango: $0,3 \leq \beta \leq 0,6$ para aplicaciones

donde se requiere precisión. En la Figura K se muestran los valores arrojados por el programa.

Figura K. Diseño de la platina de orificio con base al programa

| Input data | | Output data | |
|----------------------|--------------|---------------------|-------------|
| Tag | | Beta ratio | .409509 |
| Fluid | Water | Reynolds number | 40183 |
| Normal liquid flow | 2.6 USgal/m | Max pressure loss | 2 psi |
| Flow temperature | 216.68 degF | Max power loss | .003175 hp |
| Inlet pressure | 400 psig | Flow status | Normal flow |
| Discharge pressure | 398 psig | Min plate thickness | .125 in |
| Vapor pressure | .2448 psia | | |
| SG @ flow conditions | .9577 | | |
| SG @ base conditions | 1 | | |
| Viscosity @ FTP | .2755 cp | | |
| Pipe inside diameter | .742 in | | |
| Vent/drain hole dia | .0306 in | | |
| Orifice diameter | .303855 in | | |
| Element material | Carbon steel | | |
| Pipe material | Carbon steel | | |

FUENTE: El Autor. ISO Restriction Orifice Platine

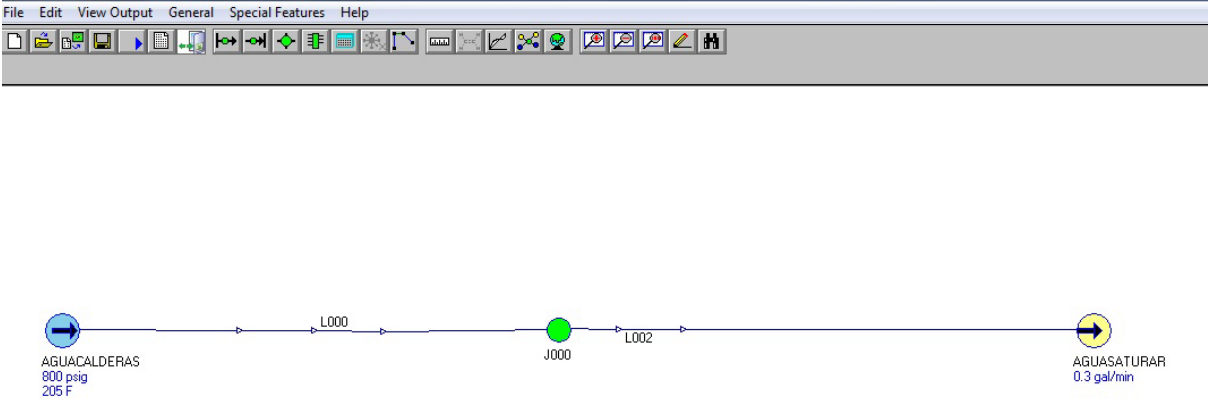
Anexo M. Análisis de la hidráulica del proceso según el sistema propuesto

Se estudió el sistema hidráulico de la presente alternativa, con el fin de conocer las velocidades y los diferenciales de presión. Para esto se usó el software Pipephase 9,5, en donde se crearon las líneas propuestas con aproximaciones de longitudes tomadas en campo.

Primero se simuló la línea desde al cabezal de agua de calderas hasta el final de la válvula de control de temperatura, para conocer las condiciones de llegada a la

línea de vapor de 400 psig. En la Figura L, se muestra la simulación y en la Tabla B, los resultados obtenidos.

FIGURA L. Simulación de la línea de agua de calderas



FUENTE: Pipephase 9.5.

TABLA B. Resumen de resultado de la simulación de agua de calderas

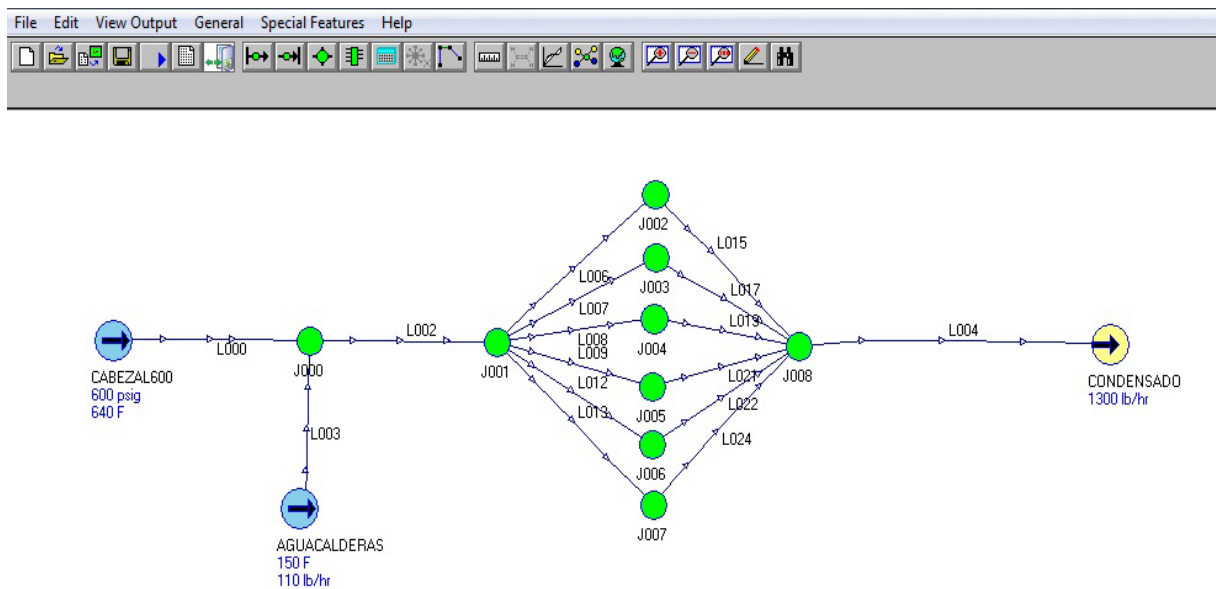
| Results Summary - Base Case | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| Link Name | Device Name | Device Type | Seg 1 Mixture Flow Rate | Inlet Pressure | Outlet Pressure | Inlet Temperature | Outlet Temperature |
| | | | GAL/MIN | PSIG | PSIG | DEG F | DEG F |
| L000 | P000 | PIPE | 0,31 | 800,00 | 799,90 | 205,00 | 204,96 |
| L000 | V000 | VALV | 0,31 | 799,90 | 799,90 | 204,96 | 204,96 |
| L000 | P001 | PIPE | 0,31 | 799,90 | 798,26 | 204,96 | 204,32 |
| L000 | B000 | BEND | 0,31 | 798,26 | 798,26 | 204,32 | 204,32 |
| L000 | P002 | PIPE | 0,31 | 798,26 | 798,26 | 204,32 | 204,06 |
| L000 | B001 | BEND | 0,31 | 798,26 | 798,26 | 204,06 | 204,06 |
| L000 | P003 | PIPE | 0,31 | 798,26 | 798,26 | 204,06 | 204,02 |
| L000 | B002 | BEND | 0,31 | 798,26 | 798,25 | 204,02 | 204,02 |
| L000 | P004 | PIPE | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 204,02 | 203,91 |
| L000 | B003 | BEND | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 203,91 | 203,91 |
| L000 | B004 | BEND | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 203,91 | 203,91 |
| L000 | P005 | PIPE | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 203,91 | 202,86 |
| L000 | B005 | BEND | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,86 | 202,86 |
| L000 | P006 | PIPE | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,86 | 202,82 |
| L000 | B006 | BEND | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,82 | 202,82 |
| L000 | P007 | PIPE | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,82 | 202,72 |
| L000 | B007 | BEND | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,72 | 202,72 |
| L000 | B008 | BEND | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,72 | 202,72 |
| L000 | P008 | PIPE | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,72 | 202,62 |
| L000 | B009 | BEND | 0,31 | 798,25 | 798,25 | 202,62 | 202,62 |
| L000 | P009 | PIPE | 0,31 | 798,25 | 796,47 | 202,62 | 201,94 |
| L000 | B010 | BEND | 0,31 | 796,47 | 796,47 | 201,94 | 201,94 |
| L000 | P010 | PIPE | 0,31 | 796,47 | 796,47 | 201,94 | 201,84 |
| L000 | T000 | TEE | 0,31 | 796,47 | 796,47 | 201,84 | 201,84 |
| L002 | P011 | PIPE | 0,31 | 796,47 | 796,47 | 201,84 | 201,83 |
| L002 | P012 | PIPE | 0,31 | 796,47 | 796,46 | 201,83 | 201,80 |
| L002 | V001 | VALV | 0,31 | 796,46 | 796,46 | 201,80 | 201,80 |
| L002 | P013 | PIPE | 0,31 | 796,46 | 796,46 | 201,80 | 201,74 |
| L002 | B011 | BEND | 0,31 | 796,46 | 796,46 | 201,74 | 201,74 |
| L002 | P014 | PIPE | 0,31 | 796,46 | 798,24 | 201,74 | 201,25 |
| L002 | B012 | BEND | 0,31 | 798,24 | 798,24 | 201,25 | 201,25 |
| L002 | P015 | PIPE | 0,31 | 798,24 | 798,08 | 201,25 | 164,77 |
| L002 | B013 | BEND | 0,31 | 798,08 | 798,07 | 164,77 | 164,77 |
| L002 | P016 | PIPE | 0,31 | 798,07 | 798,04 | 164,77 | 161,57 |
| L002 | V002 | VALV | 0,31 | 798,04 | 798,04 | 161,57 | 161,57 |
| L002 | P017 | PIPE | 0,31 | 798,04 | 798,04 | 161,57 | 161,54 |
| L002 | P018 | PIPE | 0,31 | 798,04 | 798,04 | 161,54 | 161,48 |
| L002 | V003 | VALV | 0,31 | 798,04 | 797,99 | 161,48 | 161,48 |
| L002 | R000 | DREG | | 797,99 | 405,00 | 161,48 | 161,48 |
| L002 | P019 | PIPE | 0,31 | 405,00 | 405,00 | 161,48 | 161,43 |
| L002 | B014 | BEND | 0,31 | 405,00 | 405,00 | 161,43 | 161,43 |
| L002 | P020 | PIPE | 0,31 | 405,00 | 404,58 | 161,43 | 161,34 |
| L002 | B015 | BEND | 0,31 | 404,58 | 404,58 | 161,34 | 161,34 |
| L002 | P021 | PIPE | 0,31 | 404,58 | 404,58 | 161,34 | 160,93 |

Con base a los resultados obtenidos por la simulación de la línea de agua de calderas, se pudo observar que a lo largo del tramo, la temperatura baja de 205°F a 160°F y llega con una presión de 405,58 psig a la línea de vapor de 400 psig.

Conociendo los datos de llegada del agua de calderas, se simuló por completo el sistema propuesto, para así poder conocer las velocidades y diferenciales de presión del sistema en conjunto. La simulación se muestra en la Figura M y los resultados obtenidos en las Tablas C y D.

FIGURA M. Simulación de las líneas propuestas

FUENTE: Pipephase 9.5.



FUENTE: El Autor. Pipephase 9.5

TABLA C. Resumen de resultado de la simulación

| Results Summary - Base Case | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------------------|----------------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------|----------------|
| Link Name | Device Name | Device Type | Seg 1 Mixture Flow Rate | Inlet Pressure | Outlet Pressure | Inlet Temperature | Outlet Temperature | Inlet Quality | Outlet Quality |
| | | | LB/HR | PSIG | PSIG | DEG F | DEG F | Fraction | Fraction |
| L000 | P000 | PIPE | 1.190,00 | 600,00 | 600,00 | 640,12 | 639,48 | 1,0000 | 1,0000 |
| L000 | V000 | VALV | 1.190,00 | 600,00 | 599,99 | 639,48 | 639,48 | | |
| L000 | V001 | VALV | 1.190,00 | 599,99 | 599,94 | 639,48 | 639,48 | | |
| L000 | P001 | PIPE | 1.190,00 | 599,94 | 599,83 | 639,48 | 627,58 | 1,0000 | 1,0000 |
| L000 | V002 | VALV | 1.190,00 | 599,83 | 598,79 | 627,58 | 627,45 | | |
| L000 | P037 | PIPE | 1.190,00 | 598,79 | 598,78 | 627,45 | 626,83 | 1,0000 | 1,0000 |
| L000 | V007 | VALV | 1.190,00 | 598,78 | 598,24 | 626,83 | 626,77 | | |
| L000 | R000 | DREG | | 598,24 | 400,00 | 626,77 | 600,75 | | |
| L000 | P002 | PIPE | 1.190,00 | 400,00 | 399,99 | 600,75 | 600,13 | 1,0000 | 1,0000 |
| L000 | V008 | VALV | 1.190,00 | 399,99 | 399,98 | 600,13 | 600,12 | | |
| L000 | P038 | PIPE | 1.190,00 | 399,98 | 399,97 | 600,12 | 599,75 | 1,0000 | 1,0000 |
| L000 | P039 | PIPE | 1.190,00 | 399,97 | 399,96 | 599,75 | 598,74 | 1,0000 | 1,0000 |
| L003 | P007 | PIPE | 110,00 | 399,96 | 399,96 | 160,00 | 149,74 | 0,0000 | 0,0000 |
| L002 | P003 | PIPE | 1.300,00 | 399,96 | 399,94 | 448,35 | 448,34 | 0,9975 | 0,9971 |
| L002 | T001 | TEE | 1.300,00 | 399,94 | 399,92 | 448,34 | 448,34 | | |
| L002 | P041 | PIPE | 1.300,00 | 399,92 | 399,81 | 448,34 | 448,31 | 0,9971 | 0,9946 |
| L002 | V009 | VALV | 1.300,00 | 399,81 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | | |
| L002 | P042 | PIPE | 1.300,00 | 399,80 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | 0,9946 | 0,9946 |
| L006 | P006 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | 0,9946 | 0,9314 |
| L007 | P008 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | 0,9946 | 0,9314 |
| L008 | P009 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | 0,9946 | 0,9314 |
| L009 | P010 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | 0,9946 | 0,9314 |
| L012 | P011 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | 0,9946 | 0,9314 |
| L013 | P012 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 399,80 | 448,31 | 448,31 | 0,9946 | 0,9314 |
| L015 | P013 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 400,28 | 448,31 | 232,42 | 0,9314 | 0,0000 |
| L017 | P015 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 400,28 | 448,31 | 232,42 | 0,9314 | 0,0000 |
| L019 | P016 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 400,28 | 448,31 | 232,42 | 0,9314 | 0,0000 |
| L021 | P017 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 400,28 | 448,31 | 232,42 | 0,9314 | 0,0000 |
| L022 | P018 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 400,28 | 448,31 | 232,42 | 0,9314 | 0,0000 |
| L024 | P019 | PIPE | 216,67 | 399,80 | 400,28 | 448,31 | 232,42 | 0,9314 | 0,0000 |
| L015 | P014 | PIPE | 216,67 | 400,28 | 400,28 | 232,42 | 216,68 | 0,0000 | 0,0000 |
| L017 | P020 | PIPE | 216,67 | 400,28 | 400,28 | 232,42 | 216,68 | 0,0000 | 0,0000 |
| L019 | P021 | PIPE | 216,67 | 400,28 | 400,28 | 232,42 | 216,68 | 0,0000 | 0,0000 |
| L021 | P022 | PIPE | 216,67 | 400,28 | 400,28 | 232,42 | 216,68 | 0,0000 | 0,0000 |
| L022 | P023 | PIPE | 216,67 | 400,28 | 400,28 | 232,42 | 216,68 | 0,0000 | 0,0000 |
| L024 | P024 | PIPE | 216,67 | 400,28 | 400,28 | 232,42 | 216,68 | 0,0000 | 0,0000 |

Linea antes del serpentín

Serpentín

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L004 | P025 | PIPE | 1.300,00 | 400,28 | 400,55 | 216,68 | 216,67 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P026 | PIPE | 1.300,00 | 400,55 | 400,55 | 216,67 | 216,66 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | O001 | ORIF | 1.300,00 | 400,55 | 398,13 | 216,66 | 216,67 | | |
| L004 | P036 | PIPE | 1.300,00 | 398,13 | 398,13 | 216,67 | 216,66 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | V004 | VALV | 1.300,00 | 398,13 | 398,12 | 216,66 | 216,67 | | |
| L004 | P027 | PIPE | 1.300,00 | 398,12 | 398,12 | 216,67 | 216,66 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | V005 | VALV | 1.300,00 | 398,12 | 397,87 | 216,66 | 216,66 | | |
| L004 | R001 | DREG | | 397,87 | 45,00 | 216,66 | 217,48 | | |
| L004 | P028 | PIPE | 1.300,00 | 45,00 | 45,00 | 217,48 | 217,47 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | V006 | VALV | 1.300,00 | 45,00 | 44,99 | 217,47 | 217,47 | | |
| L004 | P029 | PIPE | 1.300,00 | 44,99 | 44,99 | 217,47 | 217,47 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | B001 | BEND | 1.300,00 | 44,99 | 44,97 | 217,47 | 217,47 | | |
| L004 | P030 | PIPE | 1.300,00 | 44,97 | 44,89 | 217,47 | 217,33 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P031 | PIPE | 1.300,00 | 44,89 | 43,49 | 217,33 | 217,26 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P032 | PIPE | 1.300,00 | 43,49 | 43,11 | 217,26 | 216,59 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P033 | PIPE | 1.300,00 | 43,11 | 43,31 | 216,59 | 216,58 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P034 | PIPE | 1.300,00 | 43,31 | 42,70 | 216,58 | 215,52 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P035 | PIPE | 1.300,00 | 42,70 | 44,02 | 215,52 | 215,46 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P043 | PIPE | 1.300,00 | 44,02 | 43,74 | 215,46 | 214,98 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P044 | PIPE | 1.300,00 | 43,74 | 47,04 | 214,98 | 214,83 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P045 | PIPE | 1.300,00 | 47,04 | 47,01 | 214,83 | 214,76 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P046 | PIPE | 1.300,00 | 47,01 | 48,33 | 214,76 | 214,70 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | P047 | PIPE | 1.300,00 | 48,33 | 48,32 | 214,70 | 214,69 | 0,0000 | 0,0000 |
| L004 | V010 | VALV | 1.300,00 | 48,32 | 48,31 | 214,69 | 214,69 | | |
| L004 | P048 | PIPE | 1.300,00 | 48,31 | 48,31 | 214,69 | 214,68 | 0,0000 | 0,0000 |

Linea después del serpiente

FUENTE: Pipephase 9.5, Text report.

TABLA D. Resumen de velocidad de la simulación

| Velocity Summary - Base Case | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|-------------|------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|
| Link Name | Device Name | Device Type | Inlet Mixture Velocity | Outlet Mixture Velocity | Critical Velocity | Erosional Velocity | Inlet Pressure Gradient | Outlet Pressure Gradient | Pressure Change |
| | | | FT/SEC | FT/SEC | FT/SEC | FT/SEC | PSI/FT | PSI/FT | PSIG |
| L000 | P000 | PIPE | 15,70 | 15,69 | 1.969,31 | 98,55 | -0,0035 | -0,0035 | -0,01 |
| L000 | V000 | VALV | 15,69 | 15,69 | | | | | 0,00 |
| L000 | V001 | VALV | 15,69 | 15,69 | | | | | -0,06 |
| L000 | P001 | PIPE | 15,66 | 15,48 | 1.966,65 | 97,89 | -0,0035 | -0,0035 | -0,11 |
| L000 | V002 | VALV | 15,45 | 35,46 | | | | | -1,04 |
| L000 | P037 | PIPE | 15,47 | 15,46 | 1.953,18 | 97,84 | -0,0035 | -0,0035 | -0,01 |
| L000 | V007 | VALV | 15,46 | 25,81 | | | | | -0,54 |
| L000 | R000 | DREG | | | | | | | -198,24 |
| L000 | P002 | PIPE | 22,96 | 22,94 | 1.956,01 | 119,18 | -0,0052 | -0,0052 | -0,01 |
| L000 | V008 | VALV | 22,94 | 22,94 | | | | | -0,01 |
| L000 | P038 | PIPE | 22,94 | 22,93 | 1.955,29 | 119,15 | -0,0100 | -0,0100 | -0,01 |
| L000 | P039 | PIPE | 22,93 | 22,91 | 1.954,74 | 119,09 | -0,0052 | -0,0052 | -0,01 |
| L003 | P007 | PIPE | 0,10 | 0,10 | 0,00 | 12,78 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00 |
| L002 | P003 | PIPE | 19,72 | 19,72 | 1.010,58 | 98,91 | -0,0092 | -0,0091 | -0,02 |
| L002 | T001 | TEE | 19,72 | 19,72 | | | | | -0,02 |
| L002 | P041 | PIPE | 19,71 | 19,68 | 1.015,15 | 96,56 | -0,0091 | -0,0089 | -0,12 |
| L002 | V009 | VALV | 19,68 | 19,68 | | | | | -0,01 |
| L002 | P042 | PIPE | 19,68 | 19,67 | 1.026,46 | 96,25 | -0,0089 | -0,0089 | 0,00 |
| L006 | P006 | PIPE | 3,25 | 3,10 | 1.052,61 | 61,56 | -0,0002 | -0,0002 | 0,00 |
| L007 | P008 | PIPE | 3,25 | 3,10 | 1.052,61 | 61,56 | -0,0002 | -0,0002 | 0,00 |
| L008 | P009 | PIPE | 3,25 | 3,10 | 1.052,61 | 61,56 | -0,0002 | -0,0002 | 0,00 |
| L009 | P010 | PIPE | 3,25 | 3,10 | 1.052,61 | 61,56 | -0,0002 | -0,0002 | 0,00 |
| L012 | P011 | PIPE | 3,25 | 3,10 | 1.052,61 | 61,56 | -0,0002 | -0,0002 | 0,00 |
| L013 | P012 | PIPE | 3,25 | 3,10 | 1.052,61 | 61,56 | -0,0002 | -0,0002 | 0,00 |
| L015 | P013 | PIPE | 2,71 | 0,06 | 1.163,07 | 13,80 | 0,0084 | 0,0110 | 0,48 |
| L017 | P015 | PIPE | 2,71 | 0,06 | 1.163,07 | 13,80 | 0,0084 | 0,0110 | 0,48 |
| L019 | P016 | PIPE | 2,71 | 0,06 | 1.163,07 | 13,80 | 0,0084 | 0,0110 | 0,48 |
| L021 | P017 | PIPE | 2,71 | 0,06 | 1.163,07 | 13,80 | 0,0084 | 0,0110 | 0,48 |
| L022 | P018 | PIPE | 2,71 | 0,06 | 1.163,07 | 13,80 | 0,0084 | 0,0110 | 0,48 |
| L024 | P019 | PIPE | 2,71 | 0,06 | 1.163,07 | 13,80 | 0,0084 | 0,0110 | 0,48 |
| L015 | P014 | PIPE | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 12,94 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00 |
| L017 | P020 | PIPE | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 12,94 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00 |
| L019 | P021 | PIPE | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 12,94 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00 |
| L021 | P022 | PIPE | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 12,94 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00 |
| L022 | P023 | PIPE | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 12,94 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00 |
| L024 | P024 | PIPE | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 12,94 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00 |

Linea antes del serpentín

Serpentín

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|-------|---------|---------|---------|
| L004 | P025 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,93 | 0,4032 | 0,4032 | 0,26 |
| L004 | P026 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,93 | -0,0116 | -0,0116 | 0,00 |
| L004 | O001 | ORIF | 3,75 | 3,75 | | | | | -2,41 |
| L004 | P036 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,93 | -0,0116 | -0,0116 | 0,00 |
| L004 | V004 | VALV | 2,00 | 2,00 | | | | | -0,01 |
| L004 | P027 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,93 | -0,0116 | -0,0116 | 0,00 |
| L004 | V005 | VALV | 2,00 | 2,00 | | | | | -0,25 |
| L004 | R001 | DREG | | | | | | | -352,87 |
| L004 | P028 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | 0,00 |
| L004 | V006 | VALV | 2,00 | 2,00 | | | | | -0,01 |
| L004 | P029 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | 0,00 |
| L004 | B001 | BEND | 2,00 | 2,00 | | | | | -0,02 |
| L004 | P030 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | -0,08 |
| L004 | P031 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,4259 | -0,4259 | -1,40 |
| L004 | P032 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | -0,38 |
| L004 | P033 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | 0,4027 | 0,4027 | 0,20 |
| L004 | P034 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | -0,61 |
| L004 | P035 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | 0,4029 | 0,4029 | 1,32 |
| L004 | P043 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | -0,28 |
| L004 | P044 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | 0,4030 | 0,4030 | 3,31 |
| L004 | P045 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | -0,04 |
| L004 | P046 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | 0,4030 | 0,4030 | 1,32 |
| L004 | P047 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | -0,01 |
| L004 | V010 | VALV | 2,00 | 2,00 | | | | | -0,01 |
| L004 | P048 | PIPE | 2,00 | 2,00 | 0,00 | 12,94 | -0,0117 | -0,0117 | 0,00 |

Linea después del serpentín

FUENTE: Pipephase 9.5, Text report.

Con los resultados de la simulación, se pudo constatar:

1. La velocidad de salida de condensado de 2 ft/s se encuentra entre el rango permisible por los criterios de Diseño que es 0,5 a 8 ft/s.
2. Las presiones de llegada de las líneas son las requeridas para la implementación de la alternativa.
3. Los diámetros supuestos por las tuberías son los indicados para los flujos manejados