

Estrategia operativa de disminución de carga de fondos de vacío, de 30 kbpd a 20 kbpd,
durante la operación de la unidad de Demex de la GRB - Refinería del grupo Ecopetrol en
Barrancabermeja

Juan Manuel Nieves Torres

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero de Procesos de Refinación y
Petroquímica

Director

Giovanni Morales Medina

PhD. Ingeniería Química

Codirectores

Gabriel Antonio Morales Salazar

Magíster en Ingeniería Química

Adrián Trisancho

Magíster en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Ingeniería de procesos de refinación y petroquímicos
Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Primeramente, a Dios por su bondad inmerecida, el que me acompaña cada día y me da el aliento y las bendiciones, por medio de su palabra la Biblia, para poder seguir adelante con entusiasmo y perseverancia en la búsqueda de la realización de los sueños y metas propuestas.

A mis padres Juan Bautista Nieves Barros (Qpd) y Manuela Leonor Torres Atencio, porque desde niño me formaron con valores, por su amor incondicional y su ruego constante en sus oraciones y por apoyo permanente.

A todos los profesores y/o profesionales por su dedicación, paciencia y por compartir enseñanzas que desde hoy quedaran en mi como profesional y persona que soy.

A la empresa Ecopetrol y todo su equipo de profesionales y líderes, por esta oportunidad de formación y por su interés de hacernos mejores profesionales

A todos y cada una de las personas que siempre me brindaron su ayuda y soporte.

Juan Manuel Nieves torres.

Agradecimientos

A todos y cada uno de mis profesores, quienes me dedicaron parte de su valioso tiempo, a lo largo de este importante proyecto de aprendizaje, como lo es, formarme, con ética y valores como profesional en ingeniería de procesos y petroquímicos, en especial al profesor PhD. Giovanni Morales quien muy amablemente tuvo a bien acompañarme en este reto final del proyecto de grado, como director

A todos mis compañeros de trabajo por todos sus aportes y la disposición incondicional a todo momento, en especial a Adrián Tristancho y Gabriel Morales quienes decidieron acompañarme como codirectores de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme ser parte de tan valiosa institución, en la cual pude formarme como profesional y en especial a la facultad de ingeniería química a la cual pertenezco.

A Ecopetrol S. A. por darme la oportunidad de formarme como ingeniero mediante su apoyo económico y toda la colaboración para poder asistir a clases, además de darme la oportunidad de poder aplicar y practicar los conocimientos adquiridos en sus instalaciones.

Finalmente, a todos mis compañeros de clases por estar atentos a compartir sus experiencias y conocimientos y por siempre tener presente y hacer sentir a cada integrante del equipo como parte de él.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1. Objetivo General.....	13
1.2. Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Conceptual.....	14
2.1. Unidad U-2500 DEMEX	14
2.2. Estado del Arte.....	21
2.2.1. Proceso de Disminución de Carga de 30 kbps a 20 kbps en la U-2500 y Lavado de Equipos Fuera de Servicio en Línea	21
3. Metodología	26
3.1. Etapa 1. Justificación Técnica o Soporte	27
3.1.1. Seguimiento y Revisión en Campo.....	27
3.2. Etapa 2. Diseño de Líneas y Facilidades	27
3.2.1. Recopilación, Mención y Análisis del Espacio Disponible	27
3.2.2. Proposición de Alternativas	28
3.2.3. Balance de Energía Mecánica.....	28
3.3. Etapa 3. Evaluación Económica de la Alternativa.....	28
3.3.1. Cálculo de CAPEX	28
3.3.2. Cálculo de OPEX	28
3.3.3. Proposición del Flujo de Caja	28
4. Análisis de Resultados	30

4.1. Justificación Técnica o Soporte	30
4.1.1. Argumentación Técnica o Soporte.....	30
4.1.2. Evaluación del Seguimiento y Revisión en Campo	40
4.1.3. Análisis de Documentos y Estudios Previos que Soportan el Cambio de Carga.....	41
4.2. Diseño de Líneas y Facilidades.....	42
4.2.1. Medición y Análisis del Espacio disponible para el Diseño y Construcción del Alineamiento.....	42
4.2.2. Proposición de Alternativas de Tuberías y Accesorios para el Alineamiento	44
4.2.3. Aplicación del Balance de Energía Mecánica en cada una de las Alternativas	46
4.2.4. Selección de la Mejor Alternativa con Base en el Menor Consumo Energético	47
4.3. Evaluación Económica de la Alternativa.....	48
4.3.1. Cálculo del CAPEX	48
4.3.2. Cálculo del OPEX.....	49
4.3.3. Proposición del Flujo de Caja y Determinación de los Índices Económicos VPN y TIR ..	50
5. Conclusiones	53
6. Recomendaciones	54
Referencias Bibliograficas	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Composición volumétrica del solvente para la extracción	20
Tabla 2 Parámetros de calidad de DMO	21
Tabla 3 Variables observadas	32
Tabla 4 Medidas de tuberías y accesorios.....	46
Tabla 5 Costo materiales.....	48
Tabla 6 Costo Infraestructura.....	49
Tabla 7 Cálculo CAPEX (Adicional a la operación actual)	49
Tabla 8 Cálculo OPEX (Adicional a la operación actual)	50
Tabla 9 Flujo de caja estimado de la propuesta	50
Tabla 10 VPN	51
Tabla 11 TIR.....	51
Tabla 12 Periodo retorno de la inversión (PRI)	52

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama entradas/salidas de la unidad de Demex	15
Figura 2 Esquema de la sección horizontal y vertical de la unidad Demex	17
Figura 3 Esquema de la unidad de Demex.....	19
Figura 4 Diagrama de flujo de la metodología	29
Figura 5 Variables relacionadas con la calidad del DMO	34
Figura 6 Carga de fondo de vacío	35
Figura 7 Carga circulante en la unidad	36
Figura 8 Carga al tren A de extracción horizontal.....	36
Figura 9 Producción de DMO producto.....	37
Figura 10 Producción de fondos Demex.....	37
Figura 11 Volumen de solvente por volumen de carga	38
Figura 12 Rendimiento DMO	38
Figura 13 Temperatura de fondos Demex	39
Figura 14 Nivel T2522.....	39
Figura 15 Nivel T2504.....	40
Figura 16 Esquema propuesto para el lavado de los trenes A o B al salir de operación	41
Figura 17 Isométrico de sistema de lavado con gasóleo.....	43
Figura 18 Lugar propuesto para construcción	43
Figura 19 Vista de campo	44
Figura 20 Presiones en el sistema de lavado con gasóleo.....	47

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Crudo Reconstituido	57
Apéndice B. Cambio de Corrida y Eventos Operacionales	58
Apéndice C. Data Sheet Bomba de Gasóleo de Lavado	59
Apéndice D. Curva de la Bomba de Lavado con Gasóleo	60
Apéndice E. Presiones en sistema de lavado con gasóleo	61
Apéndice F. Caída de presión en el sistema de lavado con gasóleo en la unidad de Demex	62

Resumen

Título: Estrategia operativa de disminución de carga de fondos de vacío, de 30 kbpd a 20 kbpd, durante la operación de la unidad de Demex de la GRB - Refinería del grupo Ecopetrol en Barrancabermeja*.

Autor: Juan Manuel Nieves Torres**

Palabras Clave: Demex, DMO, carbón Conradson, combustóleo

Descripción:

Ecopetrol S.A. debe reducir la producción de combustóleo y mejorar la calidad de sus productos en sus refinerías de acuerdo con las reglamentaciones de calidad de los combustibles marinos, por tal razón, ha optado por elaboración de crudos con fondos de vacío, a los cuales ha llamado crudos reconstituidos.

Por todo lo anterior, se han visto reducidos los fondos de vacío disponibles para procesar en la unidad de Demex de la refinería del grupo Ecopetrol en Barrancabermeja. Dicha unidad, produce como resultado un 48% de fondos pesados, que van hacia el proceso de viscorreducción térmica en Viscorreductora II y un 52% aceite desmetalizado DMO que va como carga a las unidades de craqueo catalítico.

Así mismo, esta unidad fue diseñada para una capacidad de procesamiento de hasta 45 kbpd de fondos de vacío, no obstante, en estos momentos la unidad ha sido adecuada para procesar alternadamente solo 30kbpd ó 20 kbpd. Para pasar de 20 kbpd a 30 kbpd, no hay inconveniente, es transparente, pero para pasar de 30 kbpd a 20 kbpd de fondos de vacío, se genera un lucro cesante debido a que hay que apagar la unidad, para lavar el tren fuera de servicio.

El presente trabajo busca proponer esquema de interconexión de tuberías que faciliten el lavado de la unidad en línea y evite el lucro cesante de tener que sacar la unidad de servicio, para lavar el tren que queda fuera. La metodología se desarrolla en tres etapas, en la primera, se realiza una justificación técnica o soporte; en la segunda, el diseño de líneas y facilidades asociadas y en la última etapa, una evaluación económica de la alternativa propuesta. Dentro de los principales hallazgos, se evidencia el potencial económico de la alternativa propuesta a través del análisis de indicadores financieros.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Giovanni Morales Medina. Codirectores: Mgr. Gabriel Antonio Morales Salazar, Mgr. Adrián Tristancho.

Abstract

Title: Operational strategy to reduce the load of empty bottoms, from 30 kbpd to 20 kbpd, during the operation of the Demex unit of the GRB - Refinery of the Ecopetrol group in Barrancabermeja*.

Author: Juan Manuel Nieves Torres**.

Keywords: Demex, DMO, Conradson Coal, Fuel Oil

Description:

Ecopetrol S.A. must reduce the production of fuel oil and improve the quality of its products in its refineries in accordance with the regulations on the quality of marine fuels, for this reason, it has opted to produce crude oil with vacuum bottoms, which it has called reconstituted crude.

Due to all the above, the vacuum funds available for processing in the Demex unit of the Ecopetrol group refinery in Barrancabermeja have been reduced. Said unit produces as a result 48% heavy bottoms, which go to the thermal visbreaking process in Viscoreductora II and 52% DMO demetallized oil that goes as a load to the catalytic cracking units.

Likewise, this unit was designed for a processing capacity of up to 45 kbpd of vacuum bottoms, however, at this time the unit has been adequate to alternatively process only 30 kbpd or 20 kbpd. To go from 20 kbpd to 30 kbpd, there is no problem, it is transparent, but to go from 30 kbpd to 20 kbpd of empty funds, lost profits are generated because the unit has to be turned off, to wash train B out of service.

The present work seeks to propose a pipe interconnection scheme that facilitates the washing of the unit online and avoids the loss of profit of having to remove the unit from service, to wash the train that is left out. The methodology is developed in three stages, in the first, a technical justification or support is made; in the second, the design of lines and associated facilities and in the last stage, an economic evaluation of the proposed alternative. Among the main findings, the economic potential of the proposed alternative is evidenced through the analysis of financial indicators.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering, chemical engineering school. Director: PhD. Giovanni Morales Medina. Co-directors: Msc. Gabriel Antonio Morales Salazar, Msc. Adrián Tristancho.

Introducción

La compañía ha tomado acciones en descarbonización y reducción de emisiones a la atmosfera enmarcadas en las exigentes normas internacionales, es así como tiene de foco prioritario la reducción de las emisiones de dióxido de azufre en combustibles marítimos como el combustóleo, propósito que es una directriz emitida por la Organización Marítima Internacional (OMI) en 2020 (OMI, s.f.). Para dar solución a esto, Ecopetrol S.A. se acogió al convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, “Marine Pollution” MARPOL por su sigla en inglés.

Ecopetrol en este convenio busca reducir la producción de combustibles marinos como el combustóleo e incrementar la calidad ajustando la dieta de crudos y llevando a cabo estrategias como lo ha sido la elaboración de crudos reconstituidos, lo que trae consigo, la reducción de los fondos de vacío (FDV) disponibles como carga para la unidad de desasfaltado DEMEX; y a su vez, disminuye la producción de combustóleo generado aguas abajo en la unidad Viscorreductora II y, finalmente, reduce la preparación total de combustóleo de la refinería (Apéndice A).

Por tal razón en trabajos preliminares se ha ideado la unidad de DEMEX en dos esquemas de operación diferentes, con 30 kbpd y 20 kbpd de fondos de vacío, idea que hoy se ha materializado a conformidad, quedando aún oportunidades de mejora a la hora de cargar 20 kbpd.

En la actualidad, cuando se cambia el modo de operación de 30 kbpd a 20 kbpd, es necesario sacar por un día toda la unidad de servicio, para la aplicación de lavado de todos los equipos que la conforman; lo anterior, debido a que no existe una facilidad para lavar sólo la parte que se necesita sacar de servicio, consumiendo recursos económicos, humanos, energéticos, de

tiempo y más grave aún, con posibilidades de daño a las personas, a la infraestructura y al medio ambiente.

En el presente documento, se expone el esquema de conexión de líneas, para facilitar la aplicación del esquema de disminución de carga de 30 kbps a 20 kbps de fondos de vacío, de manera segura y sin necesidad de tener que sacar la unidad de servicio.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Proponer una estrategia operativa de disminución de carga de fondos de vacío, de 30 kbpd a 20 kbpd, durante la operación de la unidad de Demex de la GRB - Refinería del grupo Ecopetrol en Barrancabermeja.

1.2. Objetivos Específicos

Argumentar una justificación técnica o soporte, para la disminución de carga y el lavado de sistemas que salen de operación, sin sacar la unidad de Demex de servicio, mostrando la factibilidad del cambio de carga 30 kbpd a 20 kbpd.

Desarrollar un diseño de las líneas y las facilidades implicadas en la disminución de carga y el proceso de lavado de sistemas que salen de operación, con base en cálculos hidráulicos y en la elaboración de isométricos, estableciendo una opción de cambio de carga sin sacar la unidad de Demex de servicio.

Evaluar económicamente el diseño de alineamiento para la disminución de carga y el lavado de los sistemas que salen de operación, por medio del cálculo del valor presente neto, definiendo los beneficios del cambio de carga sin sacar de servicio la unidad de Demex.

2. Marco Conceptual

2.1. Unidad U-2500 DEMEX

Según Ecopetrol (2015), la firma norteamericana Universal Oil Products (UOP) de Chicago diseñó la unidad de Demex en conjunto con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Ésta entró en operación el 17 de diciembre de 1979, con una carga de 35.000 BPD.

Luego, en 1986, FWUSA realizó un estudio de optimización para aumentar la carga a 45,000 BPD y al mismo tiempo mejorar el rendimiento. Este estudio incluía una sección de extracción vertical de dos torres tipo slat y sus equipos asociados, con el objetivo de operar en paralelo con los dos trenes de sedimentadores existentes.

En 1988 fue ampliada la capacidad a 37.000 BPD con la construcción de un tercer horno “H2501C”.

En 1992 comenzó la operación de la unidad, a 45,000 BPD, manejando una relación de solvente carga de 6/1. También se comenzó a diseñar el Sistema de Control Distribuido (DCS).

Hoy en día, como consecuencia de lineamientos ambientales y debido al propósito de optimizar los procesos, en aras de mejorar la conversión de la refinería y por ende aumentar el margen, la empresa ha puesto en marcha ideas que han ido reduciendo la carga de fondos de vacío hacia la U-2500, que han llevado la a la unidad a 30.000 BPD (Ecopetrol S.A., 2015).

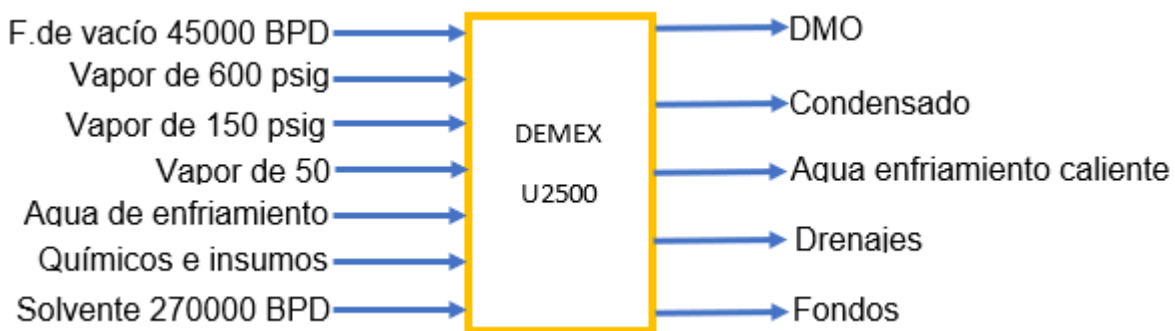
Cada día llegan a la refinería crudos más pesados y con mayor concentración de contaminantes, estos crudos son tratados y procesados en las unidades de destilación primaria, para extraer productos valiosos, quedando como desechos unos fondos de vacío que salen de las torres de destilación al vacío (Torre de Vacío T-131/253/2103/2003), con elevados contaminantes como metales, asfáltenos, azufre y carbón Conradson. Estos fondos de vacío, llegan a la unidad de

Demex y son sometidos a un proceso de extracción líquido-líquido, con un solvente que está compuesto mayormente por propano, normal-butano e iso-butano.

En el proceso de extracción de Demex, se obtiene un producto de cima, extracto o aceite desmetalizado (DMO) con bajas concentraciones de metales y asfáltenos y unos fondos que contienen gran cantidad de asfáltenos, metales y azufre; la Figura 1 presenta un diagrama entrada – salida en la unidad.

Figura 1

Diagrama entradas/salidas de la unidad de Demex



2.1. La Extracción en la Unidad de Demex

La extracción es la transferencia de masa de una sustancia de una fase a otra, llegando a ser las más frecuentes la extracción sólido-líquido y la extracción líquido-líquido entre dos sustancias inmiscibles; la extracción sólido-líquido se puede ver en la vida diaria por ejemplo al preparar un café, o una aromática. Por otra parte, la extracción líquido-líquido es una operación unitaria de transferencia de masa, importante en la separación de mezclas homogéneas líquidas. La transferencia de materia se consigue mediante el contacto directo entre las dos fases líquidas, la extracción liquido-liquido es la más usada en laboratorio y a nivel industrial y se fundamenta en la solubilidad, la cual depende de la estructura molecular.

La extracción depende de la distribución en el equilibrio, lo cual es determinado por la temperatura de extracción, la relación solvente carga y características fisicoquímicas de las sustancias. La fase liviana de extracción que sale por la cima en un proceso de extracción líquido-líquido se llama extracto (producto valioso), mientras que el refinato o refinado o fase pesada sale por el fondo (Tojo, 1966).

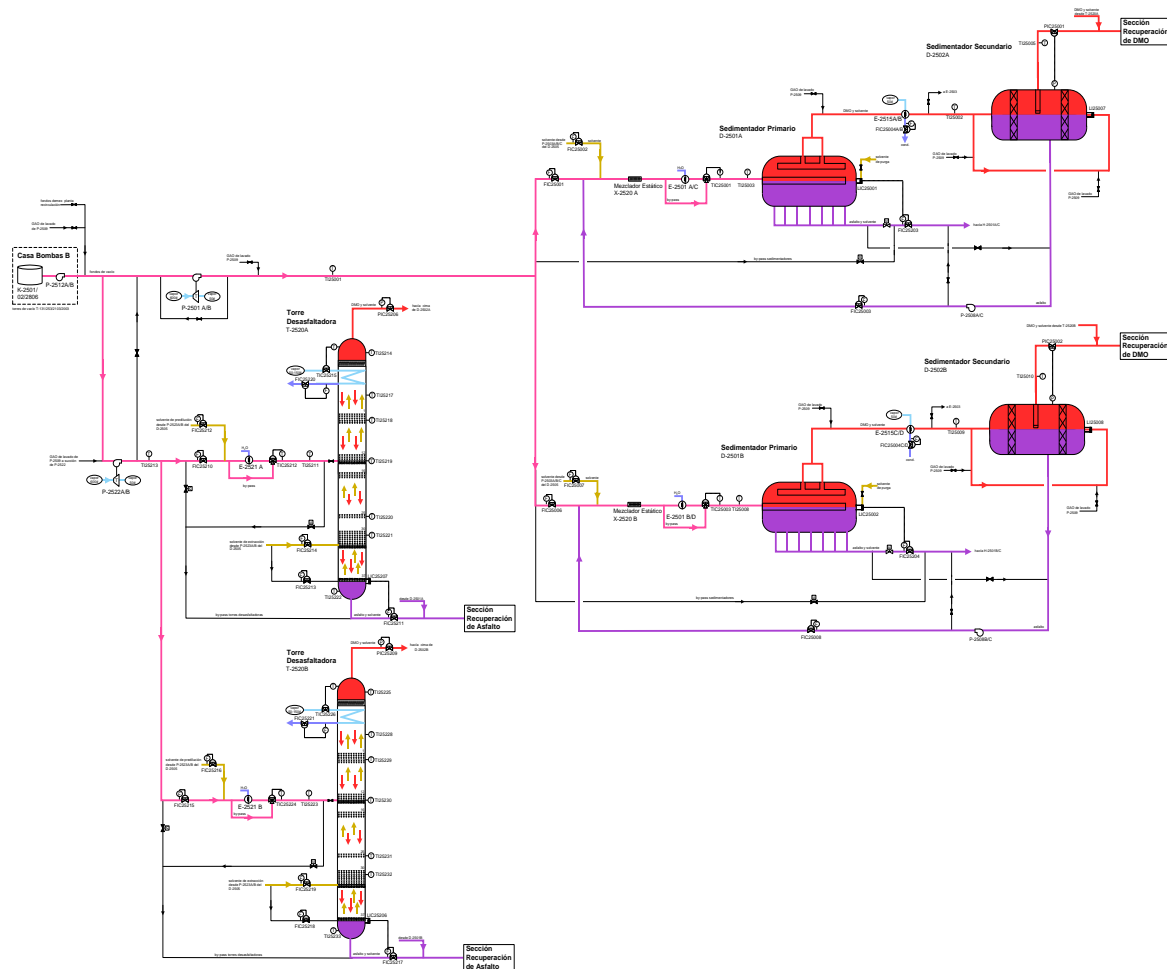
2.2. Desasfaltado en la Unidad de Demex

En la unidad de Demex, se procesan los fondos de vacío de los tanques K-2501/02/2806 “que poseen inventario de hasta 550.000 barriles” procedentes de las unidades de destilación primaria (Torre de Vacío T-131/253/2103/2003), mediante el proceso de extracción líquido-líquido, para extraer la fases más liviana y más valiosa, mediante el contacto de dichos fondos con un solvente (compuesto principalmente por propano y butanos), y según lo que se requiera, calidad o rendimiento, juegan un papel importante condiciones tales como: Composición del solvente, y en una relación solvente-fondos 6:1 regularmente, una temperatura dada “que es en todo caso inferior a la temperatura crítica del solvente” y a una presión fija cercana a 400 psig, para garantizar fase líquida de las dos corrientes y así, el contacto entre ambas.

Dichos fondos de vacío entran a la unidad a la sección de extracción horizontal y vertical (Figura 2). Al entrar a la sección de extracción horizontal se pasan por mezcladores estáticos tipo tubo concéntrico con orificios, donde se mezclan, la corriente de carga, solvente y recirculación de asfáltenos, luego, la mezcla entra a los sedimentadores primarios donde ocurre la separación a una temperatura que puede oscilar entre 190 a 280 °F dependiendo de la composición del solvente, del rendimiento requerido y la calidad deseada a una presión constante y cercana a 400 psig.

Figura 2

Esquema de la sección horizontal y vertical de la unidad Demex



En los sedimentadores primarios se da una separación tipo flash, por la parte superior sale el DMO o extracto más el solvente, el cual es enviado a la sección de recuperación de DMO, donde se va a terminar de separar el solvente del DMO, pasando por la sección de rectificación con temperatura, que es aumentar en 30 o 40 °F la temperatura del efluente, por medio de calentadores con vapor para retirar gran parte de los contaminantes, junto a la precipitación de los asfáltenos presentes en la corriente de DMO más solvente, que al chocar con la malla coalescedora en los

sedimentadores secundarios, se van reteniendo los asfáltenos y luego precipitan por gravedad, estos se recirculan nuevamente a la carga antes de los mezcladores estáticos.

Por el fondo del sedimentador primario salen el refinado o fondos Demex más solvente, que también son enviados a la sección de recuperación de asfalto, pasando por los hornos H2501A/B/C para ganar temperatura hasta 420 °F y así facilitar la separación del solvente del refinado para luego enviar a tanques de fondos Demex, de donde son cargados posteriormente a la unidad de Viscorreductora II.

Un total de 10.000 barriles de fondos de vacío también pueden ser cargados en la unidad de extracción vertical, la cual consiste en dos trenes A y B idénticos en sus funcionalidades, con capacidad de carga iguales, compuestos por un tren de precalentamiento y una torre, la cual tiene integrada la sección de rectificación con serpentines con vapor.

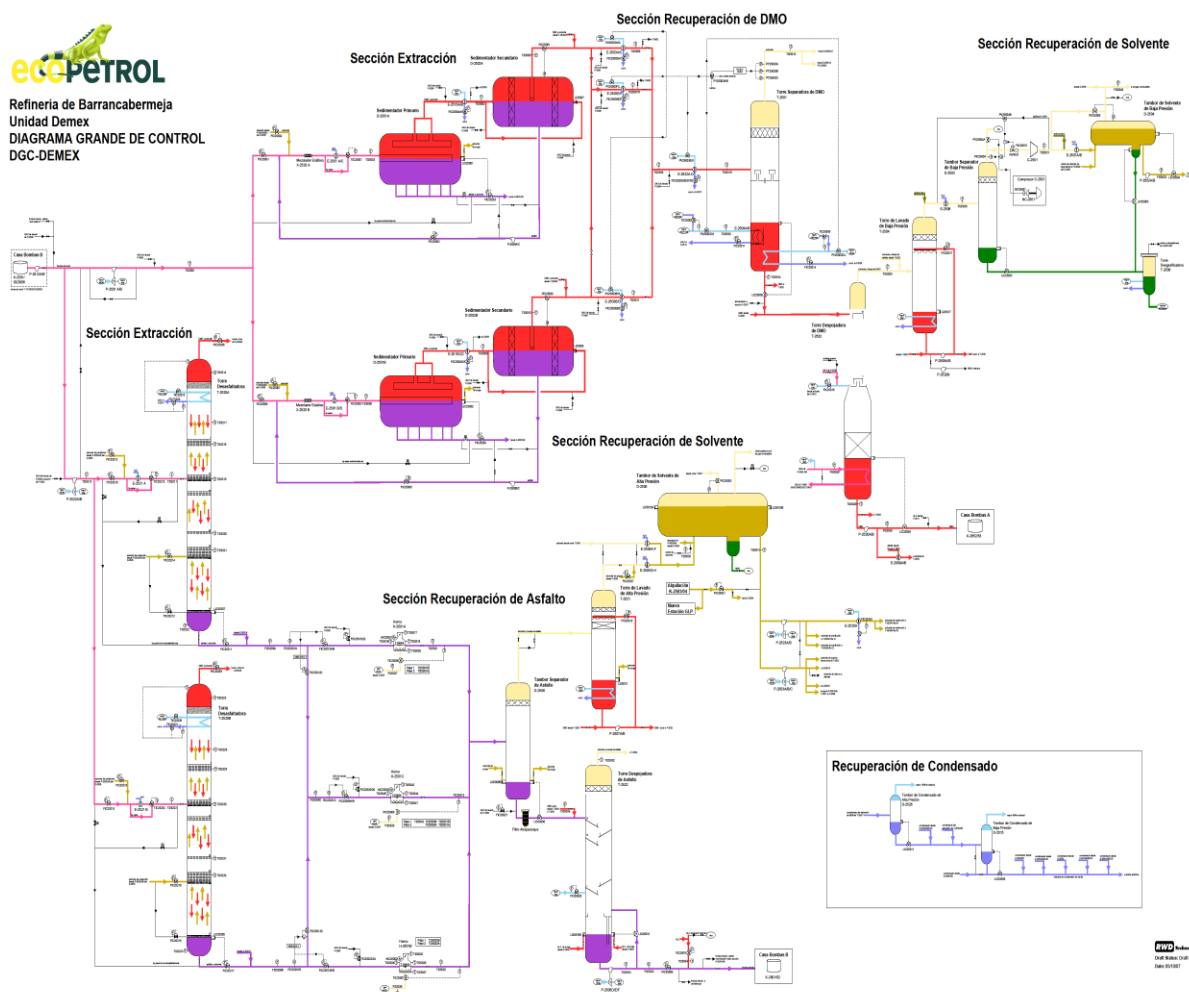
A la llegada de la carga se le inyecta solvente de pre-dilución, en una relación solvente-carga de 1-1, el cual tiene la función de mejorar el contacto entre las fases, así como disminuir la temperatura y viscosidad de la carga; no es necesario un mezclador debido a que el flujo de carga a estas etapas es menor, que en las etapas horizontales; la temperatura de extracción es controlada por una válvula de tres vías al igual que la sección de extracción horizontal, la cual hace pasar flujo por un enfriador de carcasa y tubos y by-pasea un poco, lo necesario para llevar la temperatura de extracción a la deseada.

Luego, por la zona inferior de las torres T2520A/B, se inyecta el solvente de extracción, en una proporción de cuatro veces el solvente de pre-dilución, el cual hace contacto con la mezcla pre-diluida que desciende a través de la torre. El DMO extraído sale por la parte superior y va ganando temperatura hasta unirse con el DMO de la sección Horizontal; del mismo modo que los fondos Demex salen por el fondo de las torres y van a los hornos a unirse con los fondos Demex

de la sección horizontal. Finalmente, el solvente recuperado en las distintas secciones del proceso es condensado y enfriado por enfriadores con agua de carcaza y tubos y luego almacenado para así comenzar el ciclo nuevamente.

Figura 3

Esquema de la unidad de Demex



Para tener los resultados esperados en la unidad de Demex, se debe operar regidos por las principales variables, que son, la relación solvente /carga, que es ajustada en un rango entre 5-6 barriles de solvente por barril de fondo de vacío, para obtener un rendimiento esperado entre 50%

y 55% y una temperatura de extracción que va a ser ajustada de acuerdo a los parámetros de calidad que se requiera, teniendo en cuenta la composición del solvente.

La solubilidad del DMO en un solvente aumenta hasta un límite de temperatura determinado (T_e); al aumentar esta temperatura, la solubilidad del DMO disminuye; Por eso de acuerdo con la composición del solvente y la temperatura crítica del solvente, se define la temperatura de extracción. Para la temperatura de extracción se recomienda el valor medio entre el rango de operación, desde una temperatura máxima (T_{max}) que corresponde a la temperatura crítica del solvente menos 50 °F, hasta una temperatura mínima (T_{min}) que es 60°F por debajo de la temperatura máxima (Ecopetrol S.A., 2008). En la Tabla 1, se presenta la composición más adecuada del solvente para la extracción en la unidad (Carrillo et al., 1996).

Tabla 1

Composición volumétrica del solvente para la extracción

Componente	Composición	Temperatura Crítica [°F]
Etileno	0.019	48.6
Etano	0.246	90.1
Propeno	0.132	197.3
Propano	3.374	206.1
i-Butano	35.26	274.9
i-Buteno	0.019	292.5
1-Buteno	0.123	295.6
1,3 Butadieno	0.179	305.3
n-Butano	54.748	305.7
Cis2-Buteno	5.927	324.4
Tr2-Butene	0.132	311.9
n-pentano	0.094	385.6
Temperatura Crítica [°F]		292.71
Temperatura máxima de extracción [°F]		242.71
Temperatura mínima de extracción [°F]		182.71

Nota. Adaptado de Carrillo et al., 1996.

Así pues, el DMO producto debe enviarse dentro parámetros de calidad, metales y carbón Conradson, puesto que es la carga a las unidades de craqueo catalítico y se debe proteger la integridad de los catalizadores utilizados.

Por otro lado, los metales se deben retirar porque tapan los poros activos del catalizador y el valor del carbón conradson no debe ser muy bajo, porque se pierde temperatura en el riser ni muy alto por integridad del catalizador. En la Tabla 2, se presentan los parámetros de calidad del DMO producto.

Tabla 2

Parámetros de calidad de DMO

Parámetros	Calidad
Gravedad API	18° - 19°
Azufre	1,26% peso
Carbón Conradson	5 – 6% peso
Níquel	12 - 15 ppm
Vanadio	12 – 15 ppm

2.2. Estado del Arte

2.2.1. Proceso de Disminución de Carga de 30 kbpd a 20 kbpd en la U-2500 y Lavado de Equipos Fuera de Servicio en Línea

Desde que se construyó la primera refinería en 1745 Ukhta en Rusia y la construcción de la primera refinería moderna en el campo petrolero Pechelbronn de Francia, en 1857 y hasta nuestros días, la industria del petróleo y en especial las unidades de proceso de las refinerías, han sido objeto de constantes cambios por la búsqueda de mejores y mayores beneficios económicos principalmente.

Las primeras refinerías construidas, se hicieron pensando en procesar crudos livianos, con poca porción pesadas, es decir, fueron pensadas para alta conversión de medios y con generación de pocos fondos o parte pesada. Al pasar el tiempo, dichos crudos livianos comenzaron a disminuirse y fueron apareciendo crudos cada vez más pesado, para lo cual, las refinerías debieron realizar modernizaciones y ensanchamiento de las plantas de procesamiento de residuos pesados, hasta llegar a ser el cuello de botella de las unidades de proceso; porque se tenía que estar constantemente ampliando sus capacidades por los inventarios crecientes o trabajando las unidades a su capacidad máxima o lo que es peor reduciendo la carga a las refinerías lo que se traduce en menores utilidades.

Es por tal razón, que las refinerías empezaron a buscar otros mecanismos que les ayudaran a darle tratamiento a estos residuos, encontrando estrategias tan buenas y rentables, que llevaron entonces a las unidades al otro extremo de no tener disponibilidad de residuos pesados para procesar.

Las refinerías son complejos industriales que están constantemente cambiando, tal es el caso de la refinería de Barrancabermeja, que no se escapa del común denominador en variaciones en los inventarios, lo cual ha hecho necesarias modificaciones, buscando la continuidad de sus operaciones y el mejor aprovechamiento de la materia prima.

El departamento de refinación de fondo hace parte de la refinería de Barrancabermeja y está integrado por las unidades de generación de hidrogeno balance, HCM, Viscorreductora II y Demex, donde al igual que el resto de las 60 unidades de proceso de la refinería de Barrancabermeja, ha sido sometida a cambios, que se pueden citar entre los más importantes los siguientes:

En el 2016 se realizó modificaciones en el esquema de operación de Viscorreductora II, que fue básicamente la construcción y conexiones de líneas a equipos existentes, para operarla como unidad de destilación primaria.

En el 2017 la planta de hidrogenación de DMO (Unibon), creada para retirar Carbón Conradson y retener metales del DMO, fue cambiada a HCM fase 1 mediante un proceso de cambio de esquema de operación e interconexiones de líneas y equipos ya existentes.

En el 2020 a HCM se le realizó la fase 2, que consistió básicamente entre otros cambios, en el rediseño de la torre Absorbadora de H₂S con amina, cambio de platos y la escogencia del tipo de líquido absorbente.

Para el 2023, se tiene pendiente fase 3 de HCM en la cual se busca mejorar el tren de precaliente y la instalación de un enfriador para bajar la temperatura de los gases a la torre Absorbadora.

Otra de las plantas del departamento es la unidad de Demex, esta unidad ha sido afectada por lineamientos ambientales, que han llevado a la empresa a buscar solución para mejorar la calidad de los combustibles.

Ecopetrol buscando alternativas para dar solución a estos lineamientos, se enfocó además de mejorar dicha calidad, también en reducir la cantidad de combustóleo que se produce en el departamento de refinación de fondos, así como en todo el que se produce en la refinería.

Ecopetrol ha logrado reducir la producción de combustóleo, mejorado la dieta de crudos a la refinería (blending de crudo), como también por la creación de iniciativas como lo es el logro de la elaboración de crudos reconstituidos a partir de fondos de vacío (Apéndice A).

Debido a los altos volúmenes de fondos de vacío disponibles en la refinería, nació la necesidad de construir la sección de extracción vertical para procesar 10 kbpd, de fondos de vacío, con la misma relación solvente carga, que la sección de extracción horizontal.

Sin embargo, la sección de extracción vertical fue la primera en entrar en desuso, una vez se dio comienzo a la estrategia para la reducción inventario de fondos de vacío en el año de 2017. Demex continuó operando con 40 Kbpd con solo la sección de extracción horizontal.

En el 2018 Ecopetrol S.A realizó un estudio energético y de capacidad para trabajar la unidad a baja carga, se realizó estudios de flujos mínimos de equipos rotativos y estáticos, arrojando como resultado que podría bajar la carga hasta 30 Kbpd, ya que es el flujo mínimo de la bomba de carga, por otro lado manejando una relación 6 a 1 se logra además, cumplir el flujo mínimo de la unidad que son 210 kbpd de la mezcla, con lo que se evitan ensuciamiento de los equipos.

Por su parte, Karen Brausin (2021), realizó una evaluación de la carga de fondos de vacío, en el que concluyó que la unidad podía presentar estabilidad operacional en el procesamiento con baja carga de FDV, es decir que la unidad podía trabajar con 20 kbpd de fondo de vacío, trabajando el tren B de la sección de extracción horizontal con relación 5 de solvente por 1 de carga, recirculando 10 kbpd de fondos de vacío para cumplir el flujo mínimo de la bomba de carga y circulando 70 kbpd de solvente por el tren A.

Debido a los inconvenientes antes mencionados se somete la unidad de Demex a dos fases de modificación:

Fase 1: Trabajar el tren A de la sección horizontal con 20 kbpd de fondos de vacío/100 kbpd de solvente, y en tren B, 70 kbpd de solvente. Para esta fase se realizaron los siguientes cambios:

- Se realizó estudio de integración energética, para minimizar el gasto de energía, al trabajar con una parte de los equipos instalados, con menor flujo de solvente total, dejando sin peso la premisa de carga mínima de la unidad 210 kbpd, pero manteniendo una relación solvente/fondos de vacío superior a la de diseño de la unidad.
- Se construyó facilidad de recirculación de la bomba de fondos de vacío P2501 A/B, evitando trabajar el equipo por debajo del flujo mínimo. Esta facilidad se construyó sólo en el tren B, por lo que con la estrategia de 20 kbpd únicamente se puede cargar por el tren A y no por el B.
- Se concretó Trabajar el tren A con los 20 kbpd de fondos de vacío, más 100 kbpd de solvente, para una relación 5 a 1 y el tren B, con “70 kbpd” de solvente, para cumplir el flujo mínimo de dos de las bombas P2503A/B/C.
- Se instaló válvula cheque en salida del horno H2501B para trabajar solo con dos de los tres Hornos H2501A/B/C de la unidad.

Oportunidades de mejora que aún se evidenciaban:

- Construir facilidad para el cambio de modo de operación de la unidad de 30 kbpd a 20 kbpd sin necesidad de sacar la unidad de servicio.
- Construir facilidad de recirculación en el tren A para poder trabajar cualquiera de los trenes A o B, ya que con lo existente sólo se puede trabajar con carga el tren A y necesariamente tiene que haber circulación parcial de solvente por el tren B.
- Construir facilidad de recirculación de solvente en las bombas P2503A/B/C, para poder trabajar con un solo tren en servicio, es decir sin circulación de solvente por el tren B.

Nace entonces la fase 2, que le da razón de ser a este proyecto de proponer Estrategia operativa de disminución de carga de fondos de vacío, de 30 kbpd a 20 kbpd, durante la operación

de la unidad de Demex de la GRB - Refinería del grupo Ecopetrol en Barrancabermeja sin tener la necesidad de parar la unidad, para lavar los circuitos que quedan fuera de servicio, es decir, proponer facilidad de lavado de los circuitos sacados de servicio, evitado un lucro cesante de un día de operación de la unidad:

Fase 2: Proponer facilidades de lavado para los sistemas que son sacados de servicio en la estrategia de disminución de carga de fondos de vacío, de 30 kbpd a 20 kbpd, durante la operación de la unidad de Demex, sin necesidad de detener la operación. Esta iniciativa da solución a la primera oportunidad de mejora citada anteriormente, donde se analizará en campo la mejor opción de conexión para lavar los circuitos que salen de servicio sin tener la necesidad de parar la unidad en el cambio de 30 kbpd a 20 kbpd de fondos de vacío, el cual es el propósito de este trabajo llamado: Estrategia operativa de disminución de carga de fondos de vacío, de 30 kbpd a 20 kbpd, durante la operación de la unidad de Demex de la GRB - Refinería del grupo Ecopetrol en Barrancabermeja.

3. Metodología

De acuerdo con el alcance de los objetivos, la estrategia operativa de disminución de carga de fondos de vacío de 30 kbpd a 20 kbpd, durante la operación de la unidad de Demex de la GRB - Refinería del grupo Ecopetrol en Barrancabermeja, será un trabajo de grado ante la Universidad Industrial de Santander para el programa de pregrado de Ingeniería de Procesos de Refinación y Petroquímicos del convenio UIS-ECOPETROL y a su vez será entrada para la ingeniería conceptual necesaria en el marco de optimización de costos y confiabilidad en la unidad de

Demex de la Refinería de Barrancabermeja. En aras de cumplir con los objetivos trazados en este trabajo se pactan las siguientes actividades:

3.1. Etapa 1. Justificación Técnica o Soporte

En esta etapa, se hará la justificación técnica o soporte para la disminución de carga y se expondrá la necesidad de una facilidad para el lavado de sistemas que salen de operación, sin sacar la unidad de Demex de servicio, para ello se analizará el equipo rotativo existente y disponible para poder determinar su potencial para ser utilizado, se tomará como base, los datos históricos de la unidad con carga mínima de 20 kbpd y superiores para poder mostrar que la unidad trabaja satisfactoriamente dentro de los parámetros esperados, teniendo en cuenta las variables representativas del proceso, los datos operacionales de la unidad y datos heurísticos, considerando las guías y ventanas operativas de los equipos estáticos y rotativos, además de la seguridad de procesos y operacional.

3.1.1. Seguimiento y Revisión en Campo

Se realizará seguimiento y revisión en campo para definir las posibilidades de interconexión de líneas, posteriormente se hará el análisis de alternativas y finalmente se realizará el diagrama con la interconexión de líneas sugeridas y se presentará a ingeniería de procesos.

3.2. Etapa 2. Diseño de Líneas y Facilidades

Esta etapa, incluye las siguientes proposiciones que buscan realizar el diseño de líneas y facilidades implicadas en la disminución de carga y el proceso de lavado de sistemas que salen de operación, sin sacar la unidad de Demex de servicio

3.2.1. Recopilación, Mención y Análisis del Espacio Disponible

Se comenzará con la recopilación, mención y análisis del espacio disponible para el diseño y construcción del alineamiento.

3.2.2. Proposición de Alternativas

Se hará la proposición de alternativas de tuberías y accesorios para el alineamiento.

3.2.3. Balance de Energía Mecánica

Se aplicará el balance de energía mecánica de tuberías y accesorios en la alternativa escogida, ya que las otras dos alternativas fueron descartadas en la fase preliminar por ingeniería de procesos, debido a su mayor consumo energético y mayores requerimientos de mantenimiento y operacionales futuros.

3.3. Etapa 3. Evaluación Económica de la Alternativa

En esta etapa, se realizará una evaluación económica de la alternativa de alineamiento para la disminución de carga y el lavado de los sistemas que salen de operación, en la unidad de Demex.

3.3.1. Cálculo de CAPEX

En esta actividad, se realizará el cálculo de los CAPEX para poder determinar los costos de inversión implicada en la construcción de la facilidad de lavado propuesta.

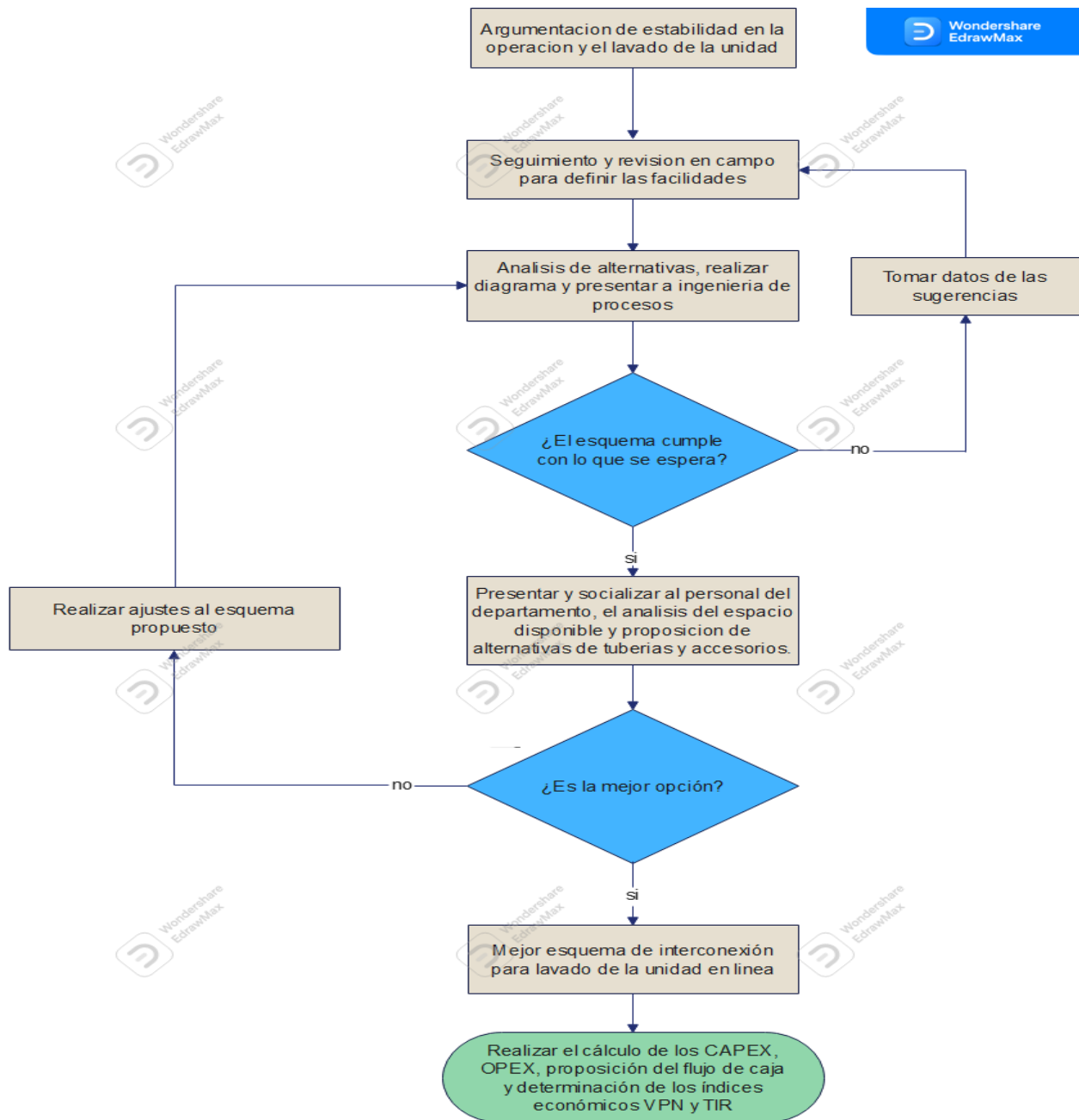
3.3.2. Cálculo de OPEX

Se realizará el cálculo de los OPEX para saber el costo permanente para la operación de la unidad de Demex en el escenario de Demex con 20 kbpd y el proceso de lavado sin sacar la unidad de servicio.

3.3.3. Proposición del Flujo de Caja

En esta fase, se hará proposición del flujo de caja y determinación de los índices económicos VPN y TIR para evaluar la inversión y calcular el rendimiento esperado con lo que nos llevó a saber la tasa de descuento y rentabilidad del negocio

En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo de la metodología que se realizó para cumplir con todos los objetivos del proyecto.

Figura 4*Diagrama de flujo de la metodología*

4. Análisis de Resultados

4.1. Justificación Técnica o Soporte

A continuación, se presenta la justificación técnica o de soporte para la disminución de carga y el lavado de sistemas que salen de operación, esto, sin sacar la unidad de Demex de servicio.

4.1.1. Argumentación Técnica o Soporte

La argumentación técnica o de soporte de la operación estable de la unidad de Demex con la carga de 20 kbps, ya ha sido demostrada como puede apreciarse desde la figura 5 hasta la figura 15, donde se evidencian largos periodos de operación sin oscilaciones, que traducen estabilidad. En dichas graficas también están representadas las variaciones que son producto de paro de emergencia, cambio de volumen de carga y paradas técnicas.

Por otro lado, está la demostración de la estabilidad de la unidad en el proceso de lavado con un tren en servicio, que se espera sea inyectado por la facilidad propuesta en el próximo turn around, que se estima, sea para la siguiente reparación programada para el próximo mes de marzo del 2023. El punto de partida para este trabajo fueron los datos históricos de la unidad, que fueron bajados a través de la herramienta PI system, además, también se observó la simulación desarrollada por Morales (2017); donde el autor compara los resultados con los obtenidos en las diferentes corridas de la unidad; de la misma manera que se espera el buen desempeño de la unidad operando con un tren en servicio, mientras el otro está en proceso de lavado, máxime que en la planta ya se ha experimentado la recirculación completa de la unidad con solo gasóleo de lavado cada vez que la unidad sale de servicio.

Finalmente, se espera que esta propuesta contribuya a reducir el volumen de combustóleo, ya que al no estar parando y arrancando la unidad a cada momento, se generan menos productos fuera de especificación, derivado del lavado, que finalmente son dirigidos a combustóleo, con lo que se le va dando cumplimiento al acuerdo de MARPOL, que busca reducir la producción de combustóleo e incrementar la calidad.

Por las citadas razones, ha sido necesario la transformación de la filosofía de operación de la unidad Demex, la cual se ha venido adecuando fase tras fase, para procesar los excedentes de fondos de vacío una vez elaborados los crudos reconstituidos, manteniendo los mismos parámetros de calidad, tales como, retiro de metales y azufre, retiro de carbón Conradson y manteniendo el mismo rendimiento del DMO.

Son los anteriores lineamientos ambientales, empresariales y económicos, que han llevado a la transformación de la unidad para cargar de manera alternada 30 kbpd o 20 kbpd de fondos de vacío, donde ha jugado un papel importante las ingenierías hechas por Ecopetrol S.A y los aportes hechos por todos sus colaboradores como Morales y Brausin, como por citar algunos.

Para este trabajo, las variables tenidas en cuentas para la evaluación, fueron 17, que son las que describen el comportamiento de la unidad, las cuales fueron extraídas por PI System y son presentadas en la tabla 3; estarán nombradas por el TAG del sistema DCS y reflejarán el estado de operación en el que se encuentre la unidad, en un instante dado, que, de no haber cambios significativos con respecto al tiempo, se puede asegurar, que la unidad opera en estado estable.

Tabla 3*Variables observadas*

N°	Descripción de la variable	TAG variable	Unidad
1	Totalizador de carga a la unidad	U2500-FQ25001	BPD
2	Relación solvente/carga	U2500-FQ25005	Adm
3	Flujo de carga tren A	U2500-FIC25001	BPD
4	Flujo solvente tren A	U2500-FIC25002	BPD
5	Temperatura de entrada D2501A	U2500-TIC25001	°F
6	Temperatura de entrada D2502A	U2500-TI25002	°F
7	Flujo de carga tren B	U2500-FIC25006	BPD
8	Flujo solvente tren B	U2500-FIC25007	BPD
9	Temperatura de entrada D2501B	U2500-TIC25003	°F
10	Temperatura de entrada D2502B	U2500-TIC25009	°F
11	FLUJO DMO producto	U2500-FT25030	BPD
12	Flujo fondos Demex	U2500-FI25033	BPD
13	Rendimiento DMO	U2500-FQ25004	% V
14	Carbón Conradson	T-2502 DMO (8 H)-MICROCARB	% w
15	Temperatura salida fondos Demex	U2500-TI25033	°F
16	Nivel fondos Demex	U2500-LIC25010	% V
17	Nivel torre T2504	U2500-LI25017	% V

Las anteriores variables observadas, descritas en la Tabla 3, fueron consultadas en un periodo de tiempo de un año de operación, comprendido desde el 15 de septiembre del 2021 al 15 de septiembre del 2022. Para estas variables de operación se tomó mediciones cada 8 horas, lo cual nos lleva a un total 1096 muestras; la Figura 5 muestra todo el periodo sin hacer ningún descarte de datos, sin embargo, como en la unidad se realizaron 14 cambios de carga en el periodo muestreado, hay datos que no hacen parte de la operación estable de la unidad, sino que son producto de cambio de carga, disparo de equipos y parada de planta programada y no programada (shutdown); los datos reportados en el sistema distribuido DCS en estos eventos durante el periodo de tiempo analizado, fueron eliminados, quedando sólo 953 muestras, las cuales son representados en la Figura 15.

La Figura 5, representa el comportamiento de las variables que impactan la calidad del DMO y que son gran indicador de la estabilidad de la operación, las más representativas son: el contenido de carbón Conradson, la temperatura de extracción, la relación solvente/carga, el rendimiento, la composición del solvente y la temperatura de extracción. Las tendencias muestran distintas fluctuaciones, producto de los diferentes cambio de carga programadas por programación de la producción (en volumen y/o composición), también muestran la ocurrencia de disturbios operacionales, relacionados con paros por emergencias (shutdown) y mantenimiento programado de equipos, el apéndice B; muestra los cambios de carga en el periodo de tiempo estudiado; sin embargo también se pueden evidenciar largos periodos de operación sin oscilaciones, lo que soporta el concepto de estabilidad de la unidad tanto trabajando con carga cercanas a su valor de diseño, como con mínima carga de 20 kbpd de fondos de vacío, con relación solvente/carga de 5/1 por el tren que se opera (tren A) y 70 kbpd de solvente por el tren B para el tema de manejar la velocidad espacial en la unidad y evitar ensuciamiento de los equipos, como también trabajando con carga superior.

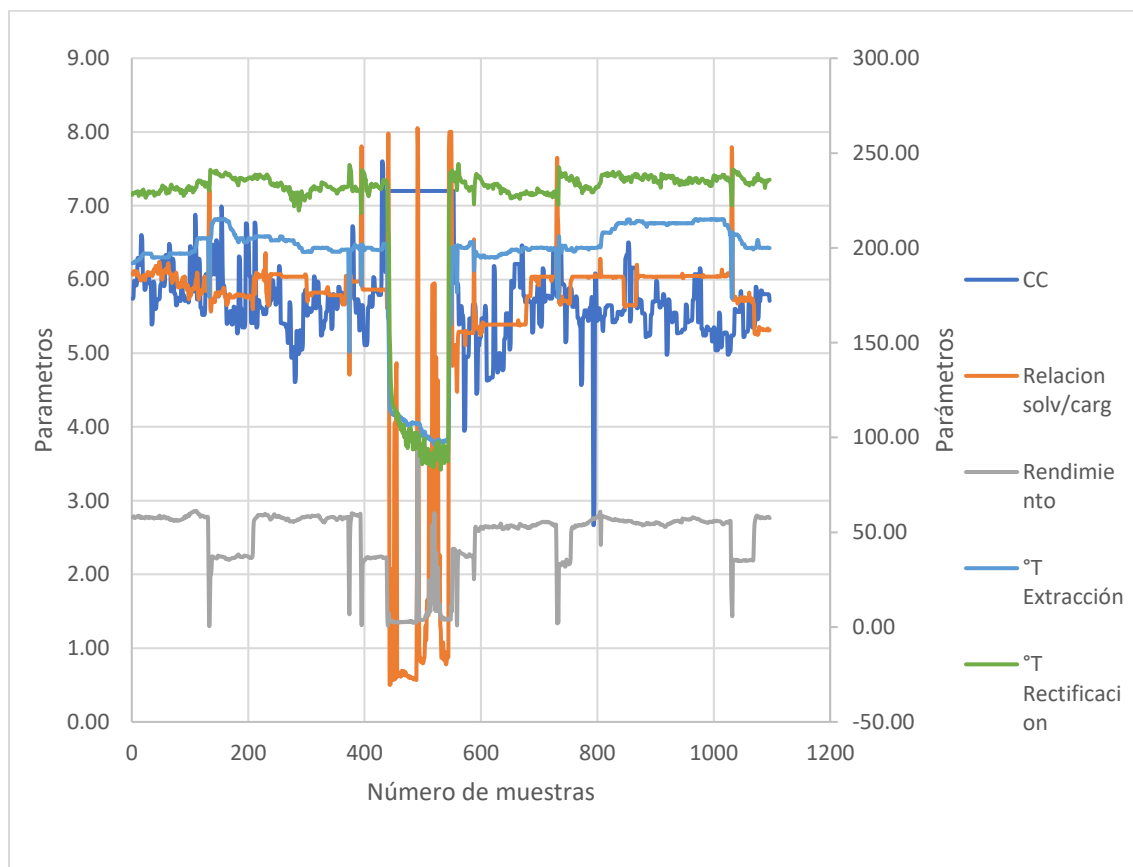
En la Figura 6, se evidencia la tendencia de carga al tren A, aquí se contabiliza mejor el volumen cargado por la unidad, mejor que en el totalizador, ya que este último, contabiliza los 10 kbpd que se recirculan a la bomba de carga de fondos de vacío, cuando se está en modo de 20 kbpd, así que cargar 20 kbpd o 30 kbpd indica el mismo valor en el totalizador; en cambio en el tag de carga al tren A contabiliza 15 kbpd cuando cargamos 30 kbpd de fondo de vacío; 15 kbpd de fondos de vacío por el tren A y 15 kbpd por el tren B, en conclusión si se tiene operación 20 kbpd se visualizan los 20 kbpd por este tren A, puesto que por el tren B no se admite carga.

En la Figura 6, además, hay variaciones que son producto de disturbio operacional y por aumento de carga, pero la operación es transparente para llevar la carga de 20 kbpd a 30 kbpd y

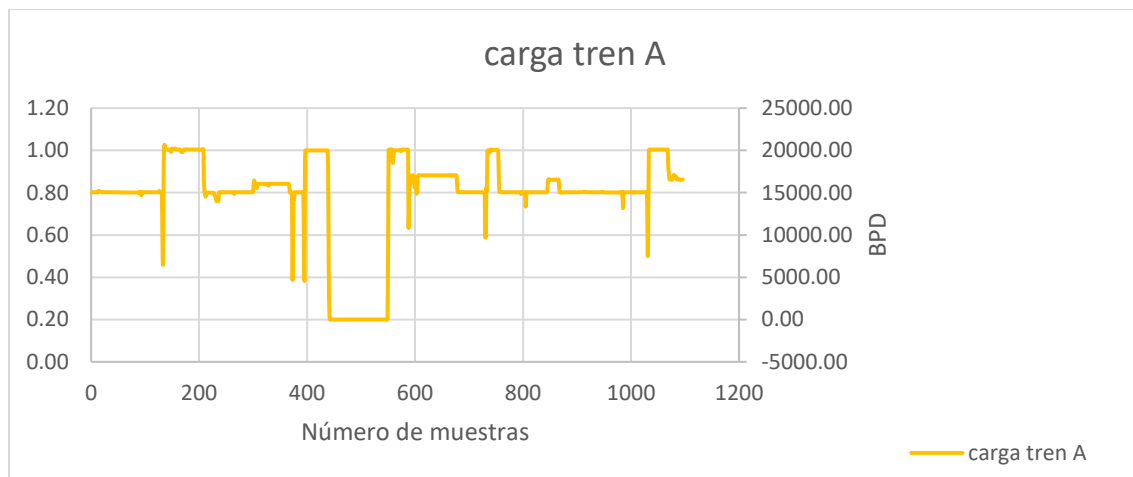
sin sacar la unidad para lavar, solo se realizan los ajustes correspondientes para llevar la carga a lo planeado; por el contrario cuando se pasa de 30 Kbpd a 20 Kbpd de carga, se tiene que parar la unidad para poder lavar y la indicación no cae a cero, sino que muestra flujo cercano a 6 Kbpd que son de gasóleo del proceso de lavado, contrario a cuando es paro de emergencia o por alguna revisión por mantenimiento.

Figura 5

Variables relacionadas con la calidad del DMO



Nota. Tendencias sin descarte de datos.

Figura 6*Carga de fondo de vacío*

Nota. Tendencias sin descarte de datos.

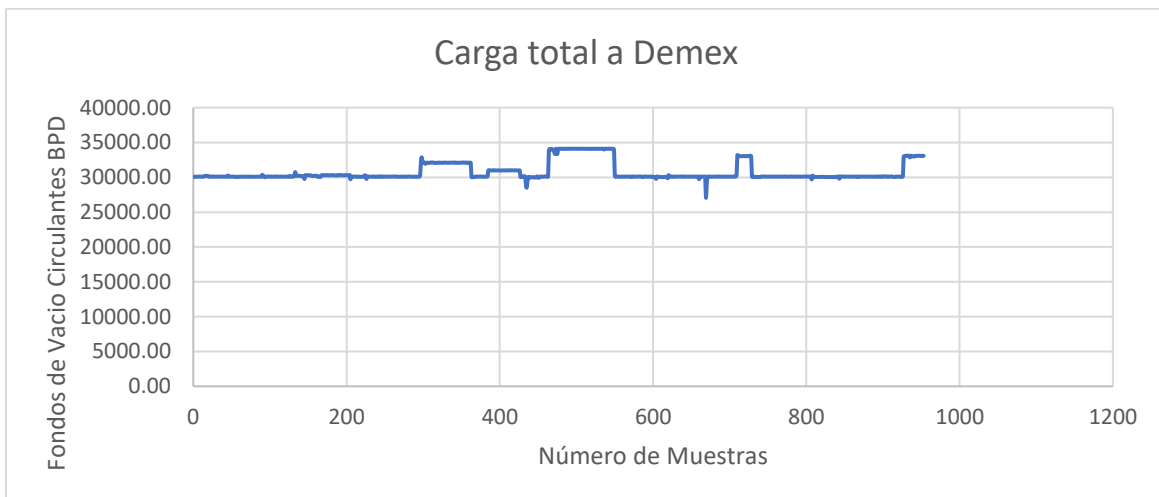
La Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15, muestran las tendencias de las variables ya descartados los eventos de parada de planta, cambio de corrida, parada por emergencias (shutdown) y paradas programadas (turnaround), en las que se puede evidenciar con más detalles la estabilidad de la operación desde la carga mínima de 20 kbps, hasta 34 kbps de fondos de vacío.

Todas las tendencias mostradas en las figuras mencionadas, justifican el concepto de estabilidad en la operación de la unidad de Demex, la cual está representada en los largos periodos en los que se muestran pocos cambios aparentes a través del tiempo; las oscilaciones aun percibidas, son producto de efecto tardío, es decir, se reflejan en estos indicadores momentos después de haberse presentado el disturbio en las variables más directas, como se ve en la la Figura 9 y Figura 12; que muestran un sobre paso mínimo llegando a cero, momento después de la alteración a la unidad. En la Figura 10 y Figura 13, sucede porque una vez se presenta el evento, hay un tiempo de retardo hasta tanto se monta el lavado. Por su parte, la Figura 15, muestra que le llegó nivel, esto se da por pérdida de eficiencia del equipo rotativo para sacar los fondos Demex hacia tanque por cambio de

viscosidad, por taponamiento de las líneas a la salida de la unidad, por error de confiabilidad humana del operador del DCS o por avería de los medidores de nivel. El nivel mostrado en la Figura 15 se dio por fallas en el nivel de la T2522.

Figura 7

Carga circulante en la unidad



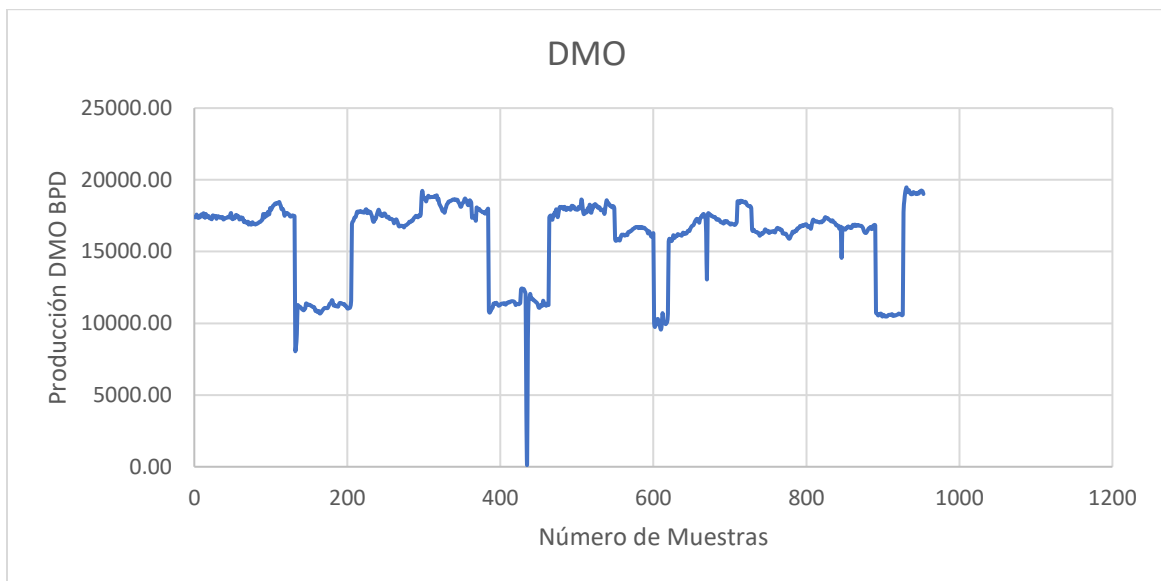
Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 8

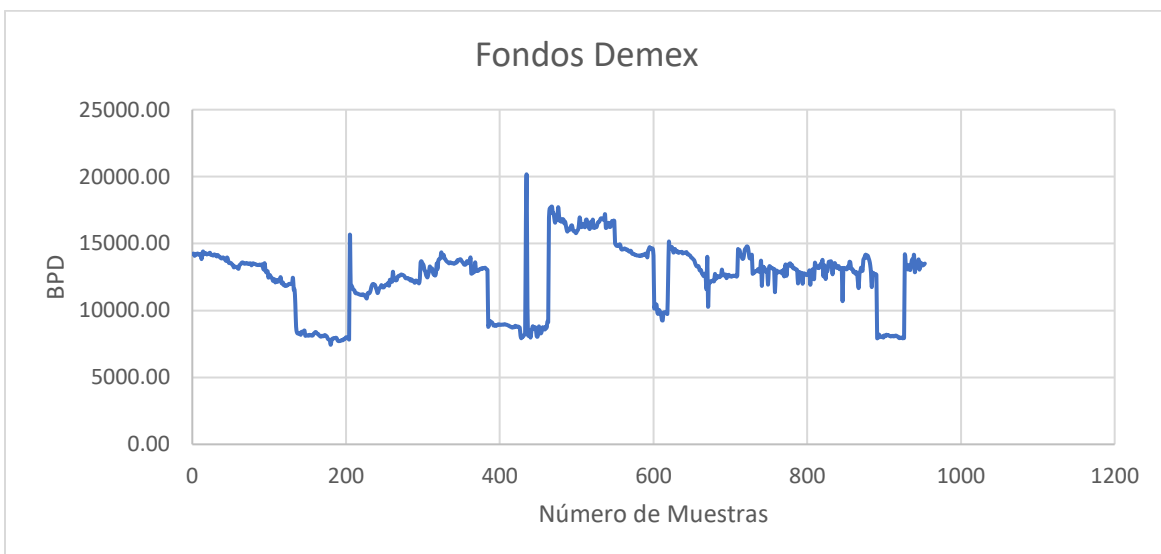
Carga al tren A de extracción horizontal



Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 9*Producción de DMO producto*

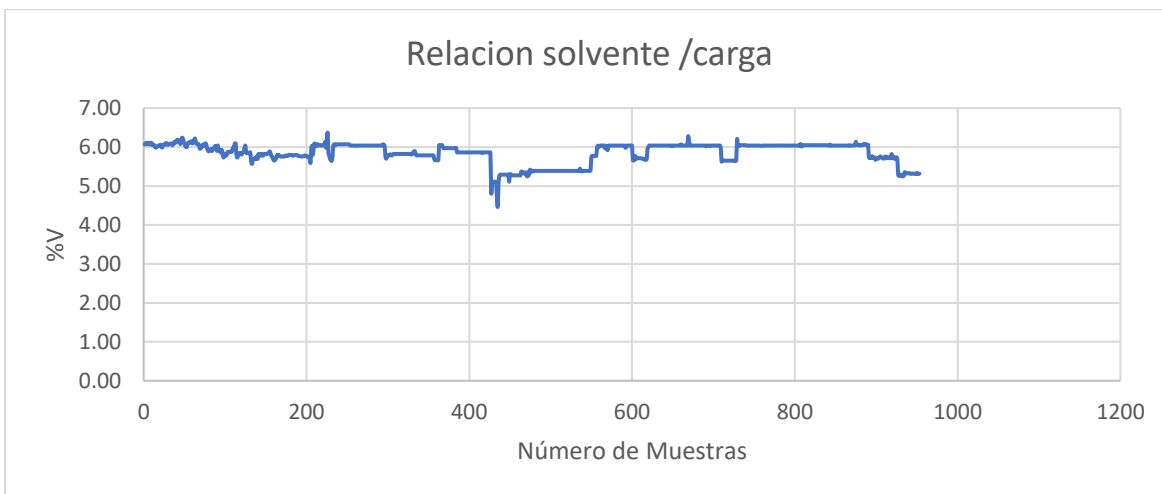
Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 10*Producción de fondos Demex*

Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 11

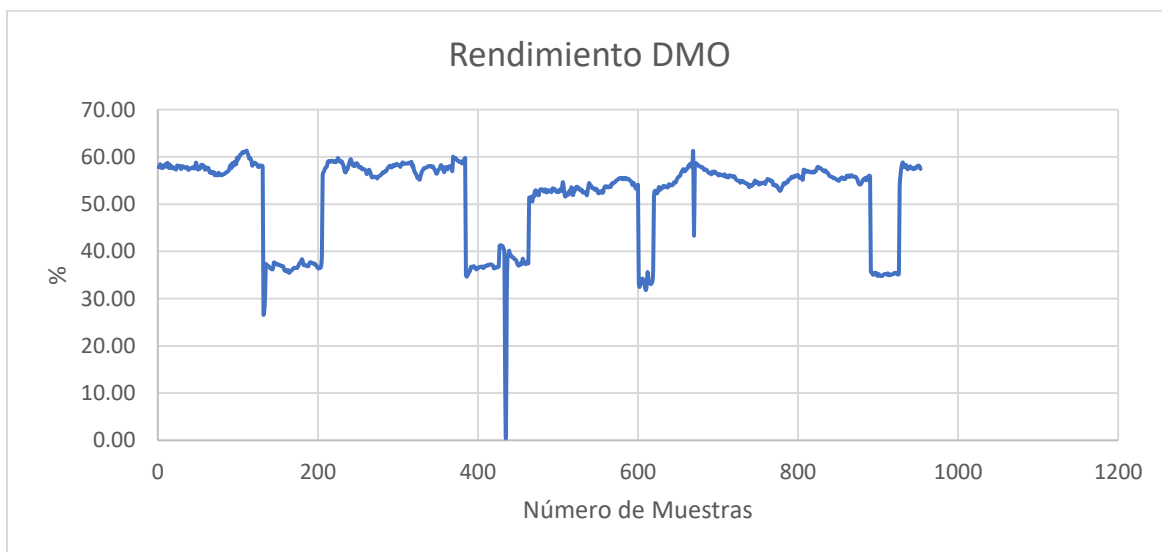
Volumen de solvente por volumen de carga



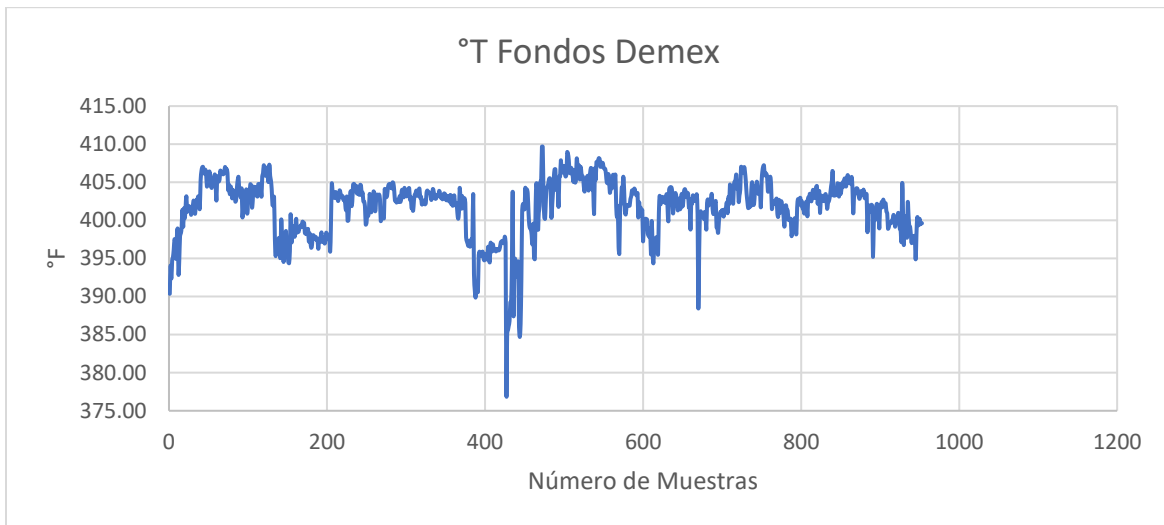
Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 12

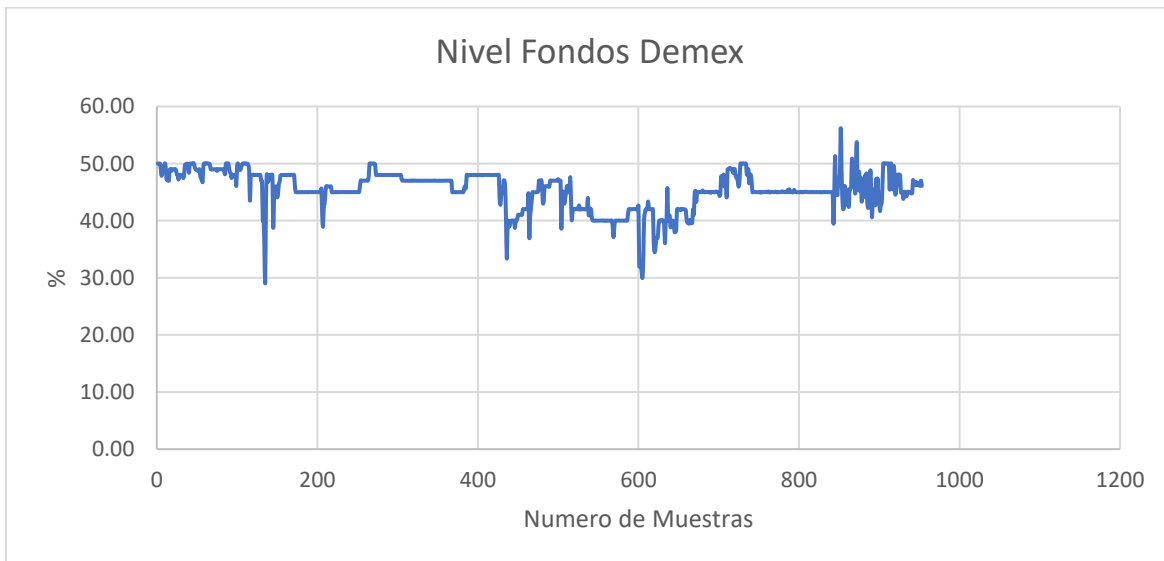
Rendimiento DMO



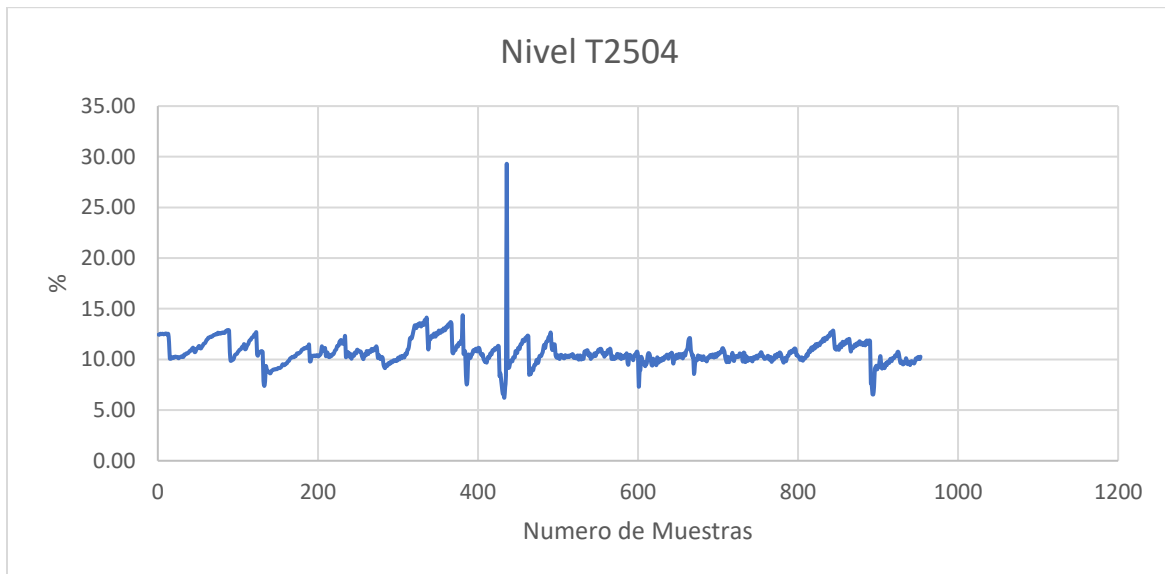
Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 13*Temperatura de fondos Demex*

Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 14*Nivel T2522*

Nota. Tendencias con descarte de datos.

Figura 15*Nivel T2504*

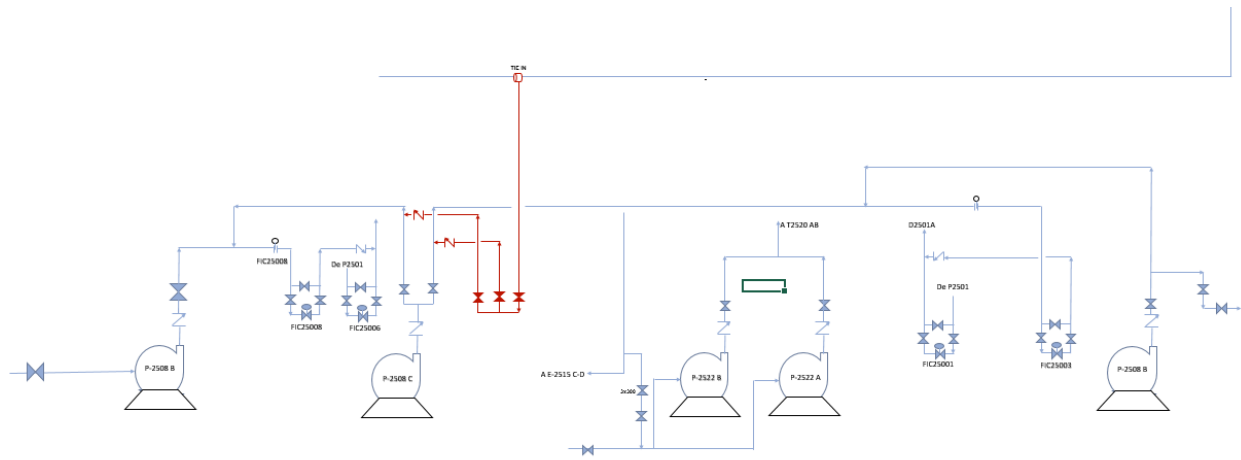
Nota. *Tendencias con descarte de datos.*

4.1.2. Evaluación del Seguimiento y Revisión en Campo

Se realizó la revisión en campo de las posibilidades de interconexión de líneas, aprovechando los equipos ya existentes, encontrándose tres propuesta, de las cuales, después de realizar el análisis de viabilidad respectivo con ingeniería de procesos, basado principalmente en el consumo energético, la operatividad y la mantenibilidad de los equipos, se escogió la mostrada en la figura 16, para evaluar en la herramienta hysys, si el equipo rotativo es apto o no para efectuar el lavado con la unidad en servicio, puesto que la presión máxima diferencial de la bomba es de 340 psig en su punto de mejor eficiencia; pero se determinó, que es posible, aumentar su presión, si se mueve su operación hacia el lado izquierdo de la curva, consiguiendo aumentar la cabeza hasta 940 ft y por ende, la presión de descarga hasta 379 psig, cumpliendo con el flujo requerido para el lavado de 175 gpm o lo que es lo mismo 6 k bpd, como se puede evidenciar en el Apéndice D.

Figura 16

Esquema propuesto para el lavado de los trenes A o B al salir de operación



4.1.3. Análisis de Documentos y Estudios Previos que Soportan el Cambio de Carga

Para el desarrollo de este proyecto se partió del trabajo hecho por Morales (2017), quien desarrolló un análisis estadístico y una simulación del desempeño operacional de la planta DEMEX de la GRB, en el que analizó varios escenarios para la definición de una mezcla de solvente adecuada según la carga y las condiciones definidas en la unidad, Según Morales, los resultados de su trabajo en Aspen Hysys son comparables con los reportados por la literatura y concuerdan con los resultados obtenidos en planta.

Además, se estudió el trabajo realizado por Brausin (2021), en el que concluye que se puede operar la unidad con baja carga de 20 kbpd de fondo de vacío, para lo cual se debía operar un sólo tren, ella recomendó el B para realizar la extracción con relación solvente/carga de 5,4/1 y en el tren A con circulación de solvente, con el objetivo de aumentar la relación circulante en la unidad.

También, se han estudiado los resultados de las corridas operacionales que ya se han realizado en la unidad de Demex con 20 kbpd, en donde se puede concluir que la unidad es estable

operando con esta mínima carga, como se puede constatar desde la Figura 5 hasta la Figura 15 del presente documento.

Así pues, todos los trabajos anteriores concuerdan con la afirmación que la estabilidad en la unidad, la define la relación solvente/carga, la composición del solvente, y la temperatura de extracción.

Entonces, es de esperar que, al mantener las mismas condiciones en las variables influyentes, se tenga estabilidad en la operación de la unidad con el lavado con gasóleo en línea, inyectado por la facilidad propuesta en este trabajo.

4.2. Diseño de Líneas y Facilidades

El sistema propuesto es requerido en el marco de la disminución de carga, para evitar tener que sacar la unidad de servicio, cuando hay baja disponibilidad de inventarios en tanque, entonces, se hace necesario bajar a la mínima de 20 kbpd, según lo ya discutido anteriormente, facilitando la operación continua de la unidad y con ello menor desgaste y daños en los equipo estáticos y rotativos, que al averiarse traen consigo perdida de contención que impactan a las personas, al medio ambiente y a los activos de la empresa; además, operar la unidad de manera continua, evita lucro cesante de un día de operación, ya que no es necesario sacar la unidad de servicio para lavar y por ende, se ahorraría la cantidad de diluyente que hoy se utiliza y que puede ser usada en otras unidades, en la generación de valor.

4.2.1. Medición y Análisis del Espacio disponible para el Diseño y Construcción del Alineamiento

El lugar que más reúne las condiciones para poder materializar esta propuesta es el mostrado en la Figura 17, Figura 18 y Figura 19, por accesibilidad, facilidad para la mantenibilidad y no es obstáculo en el sitio para el acceso al área.

Figura 17

Isométrico de sistema de lavado con gasóleo

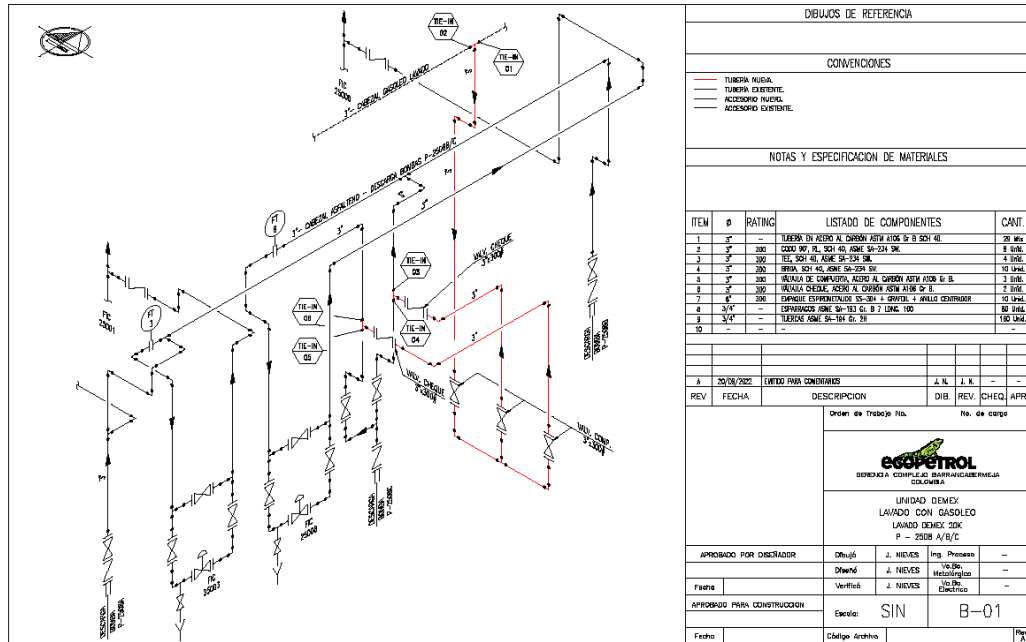


Figura 18

Lugar propuesto para construcción

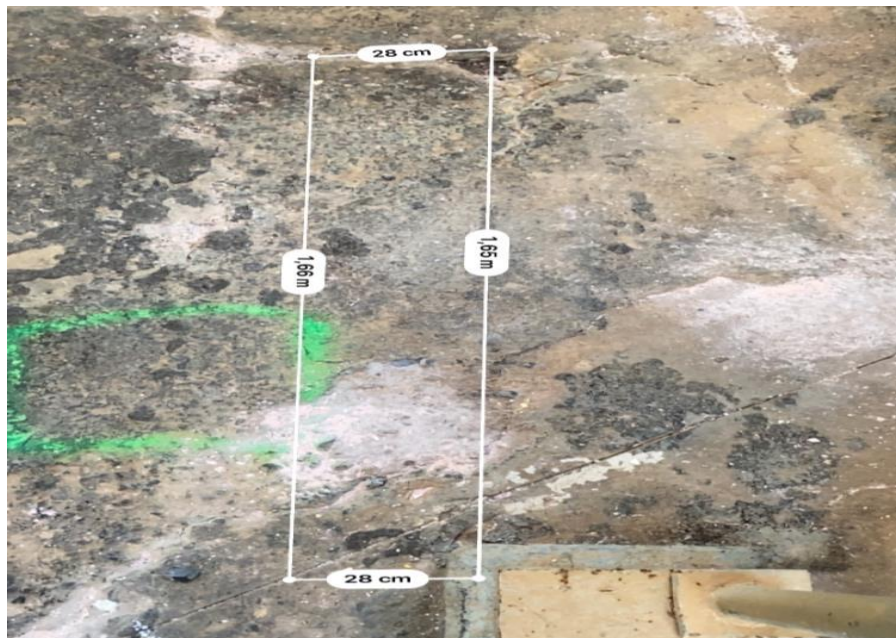


Figura 19*Vista de campo***4.2.2. Proposición de Alternativas de Tuberías y Accesorios para el Alineamiento**

Puede calcularse el diámetro de una tubería siguiendo el proceso matemático siguiente:

Velocidad del flujo	C	[m/s]
Volumen específico	v	[m ³ /Kg]
Caudal másico	m	[Kg/s]
Caudal volumétrico	Q	[m ³ /s]

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{t} \quad \text{ó} \quad Q = m \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] * v \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

El volumen en una porción de tubería está dado por:

$$V = Ad \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde A es la sección transversal de la tubería y d, el ancho de la porción del fluido.

$$\Rightarrow Q = A \frac{d}{t} \Rightarrow C = \frac{d}{t} \Rightarrow Q = AC \Rightarrow A = \frac{Q}{C}$$

$$\frac{\pi * D^2}{4} = \frac{Q}{C} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * C}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Como se cuenta con un cabezal de lavado que es la descarga de las bombas NP2509 con una velocidad de fluido ya establecida como se puede ver en el Apéndice C.

Presión de descarga 345 psig

Diámetro de la tubería 3 in

Caudal volumétrico= 250 GPM

$$0,01577 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se puede calcular la velocidad del fluido en el cabezal despejando la C de la ecuación 3:

$$C_{\text{cabezal}} = 3,464 \text{ m/s}$$

Como ya se tiene la velocidad del fluido en el cabezal se puede calcular el diámetro de la sección de tubería del sistema de lavado con gasóleo aplicando la ecuación 4:

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,01104}{\pi * 3,464}} = 0,063 \text{ m} = 6,3 \text{ cm} = 2,48 \text{ in}$$

Sirve 2 ½ in de diámetro, pero se decide selecciona tubería de 3 in diámetro por requerimientos futuros

En la Tabla 4 se presenta las medidas de las tuberías y accesorios que se requieren para esta propuesta, no es necesario equipos de control, debido a que el esquema propuesto utiliza el sistema de circulación de asfáltenos, el cual cuenta con sus válvulas de control, su platina de orificio, su transmisor, su controlador y todo su sistema de control funcionando.

Tabla 4*Medidas de tuberías y accesorios*

ITEM	Φ [in]	RATING	LISTADO DE COMPONENTES	CANT.
1	3	-	TUBERÍA DE ACERO AL CARBÓN ASTM A A106 Gr. B SCH 40	29 m
2	3	300	CODO DE 90°, RL, SCH 40 ASME S.A 234 SW	8 UNIDADES
3	3	300	TEE SCH 40 ASME S.A 234 SW	4 UNIDADES
4	3	300	BRIDA, SCH 40 ASME S.A 234 SW	10 UNIDADES
5	3	300	VALVULA DE COMPUERTA, ACERO AL CARBON, ASTM A A106 Gr. B	3 UNIDADES
6	2	300	VÁLVULA CHEQUE, ASTM A A106 Gr. B	2 UNIDADES
7	6	300	EMPAQUE ESPIRO METÁLICO SS-304 + GRAFOIL + ANILLO CENTRADOR	10 UNIDADES
8	3/4	-	ESPÁRRAGO ASME SA-193 Gr. B 7 LONG. 100	80 UNIDADES
9	3/4	-	TUERCA ASME SA-194 Gr. 2H	160 UNIDADES

4.2.3. Aplicación del Balance de Energía Mecánica en cada una de las Alternativas

Se aplicó la ecuación de energía al sistema de lavado con gasóleo en la unidad de Demex en su modo de operación 20 kbpd, utilizando el software Aspen hysys y se determinó una pérdida de presión del sistema de 54 psig, como lo muestra la figura 20.

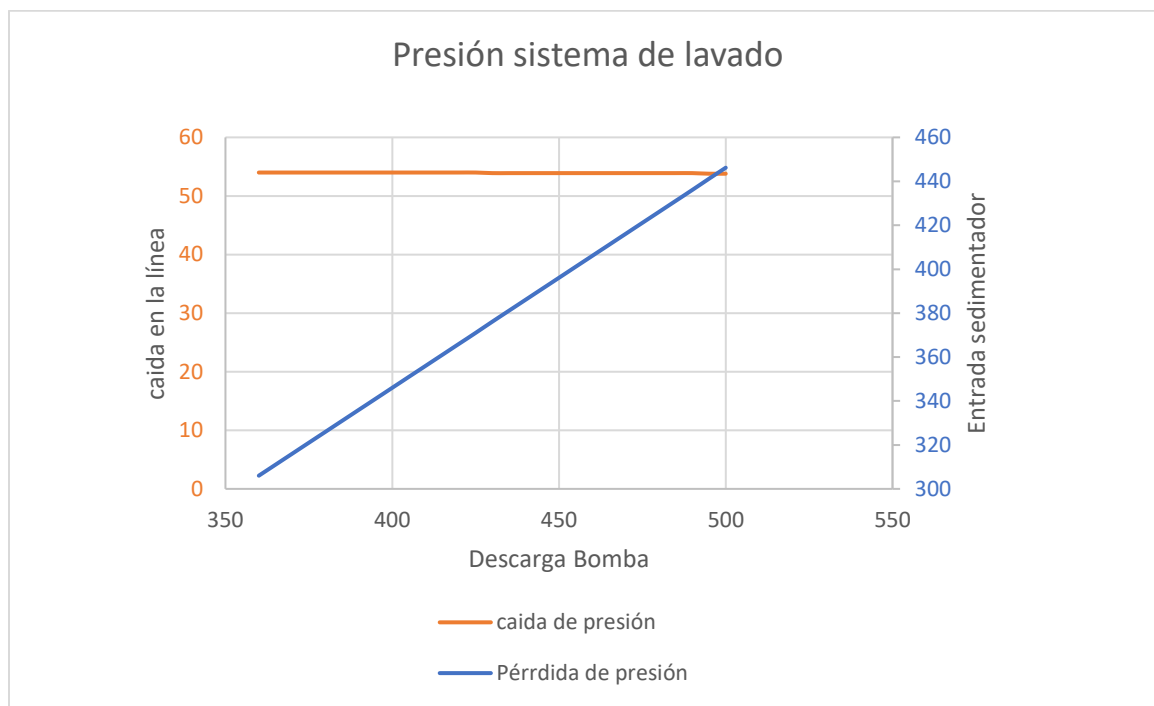
Como ya se mencionó anteriormente, la bomba se puede llevar a tener el flujo necesitado de 6 kbpd, con lo cual se consigue una presión de descarga de 378.56 psig, Apéndice D, el sistema tiene una pérdida de presión de 54 psig, que hace que la presión de la corriente de gasóleo de lavado a la entrada del proceso que está a 360 psig sea de 324 psig, lo que quiere decir que dicha presión no es suficiente para entrar al sistema y no es posible con este equipo rotativo realizar el lavado con gasóleo en las actuales condiciones de presión de la unidad.

En la gráfica 20 se muestra que, para realizar el lavado del sistema, se necesita un equipo rotativo que pueda dar una presión de descarga de 460 psig mínimamente, para tener a la entrada de proceso 406 psig, 46 psig por encima de la presión del proceso.

En el Apéndice F, se puede observar la gráfica que arroja el sistema mediante la herramienta de Aspen hysys.

Figura 20

Presiones en el sistema de lavado con gasóleo



4.2.4. Selección de la Mejor Alternativa con Base en el Menor Consumo Energético

Cuando se expuso las tres posibles alternativas a ingeniería de proceso, fueron descartadas dos y fue validada la alternativa de la figura 11, su escogencia se debió precisamente por el consumo energético, por la confiabilidad y mantenibilidad del sistema.

4.3. Evaluación Económica de la Alternativa

Evaluando la alternativa propuesta se evidencia el potencial económico de la misma a través del análisis de indicadores financieros y se construye de forma preliminar el presupuesto del CAPEX y OPEX. Cabe destacar que se realiza una evaluación financiera aislada de la alternativa propuesta, dejando otras variables del negocio ajenas a la evaluación, pues se considera que se mantienen estables, tales como costos administrativos, corporativos, o concernientes a actividades operativas de otras áreas productivas. A su vez, se asumen niveles de producción estables para un horizonte de planeación de 5 años.

4.3.1. Cálculo del CAPEX

El Plan de Inversiones de Capital (CAPEX) y su financiamiento, son insumos esenciales para estimar la depreciación y el retorno del capital. El Plan de Inversiones de Capital también es importante para la eficiencia operacional y la cobertura de la propuesta.

Para este caso, está representado por el costo de la infraestructura requerida y su mantenimiento. La infraestructura incluye el costo de los materiales, andamios y mano de obra. Estos componentes se desagregan en las siguientes tablas.

Tabla 5

Costos materiales

Ítem	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Tubería 3"	\$ 89.020,00	100	\$ 8.902.000,00
Codos 3" SW	\$ 81.713,00	8	\$ 653.704,00
T 3" SW	\$ 2.462.579,00	4	\$ 9.850.316,00
Brida 3" SW	\$ 342.343,00	10	\$ 3.423.430,00
Válvula Compuerta 3*300 RF	\$ 1.457.469,00	3	\$ 4.372.407,00
Válvula Cheque 3*300 RF	\$ 1.005.489,00	2	\$ 2.010.978,00
Empaques 3*300 espirotálicos	\$ 5.114,00	10	\$ 51.140,00
Espárragos de 3/4 *7"	\$ 4.217,00	80	\$ 337.360,00
Tuerca 3/4"	1.750	160	\$ 280.000,00
		TOTAL	\$ 29.881.335,00

Tabla 6*Costos infraestructura.*

Ítem	Costo Total
Materiales	\$ 29.881.335
Mano de Obra	\$ 99.604.450
Andamios	\$ 9.347.148
Total Infraestructura	\$ 138.832.933

Tabla 7*Cálculo CAPEX (Adicional a la operación actual)*

Ítem	VALOR	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Infraestructura	\$ 138.832.933	\$138.832.933					
Mantenimiento (total)	\$ 1.500.000.000		\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000
TOTAL	\$ 1.638.832.933	\$ 138.832.933	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000

De tal forma, el CAPEX está representado por un valor de infraestructura de \$ 138.832.933, y un valor de mantenimiento total de \$ 1.500.000.000, prorrateado de forma equivalente para cada uno de los años del horizonte de evaluación(\$300.000.000 por año).

4.3.2. Cálculo del OPEX

En cuanto al OPEX, los costos administrativos o corporativos no son tenidos en cuenta para la evaluación de la propuesta de inversión, pues no variarían con respecto a la operación actual. Así, únicamente variaría el “Cash Cost” derivado de la nueva operación, estimados en un 5% de la producción asociada, entendiendo que desde el punto de vista operativo, la capacidad requerida de operarios y de insumos bajo los dos modelos no varía considerablemente.

Tabla 8*Cálculo OPEX (Adicional a la operación actual)*

OPEX	Valor/mes	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Cash Cost	\$69.259.552,50	\$ 831.114.630	\$ 831.114.630	\$ 831.114.630	\$ 831.114.630	\$ 831.114.630
TOTAL		\$ 30.418.795.458				

4.3.3. Proposición del Flujo de Caja y Determinación de los Índices Económicos VPN y TIR

Para la estimación del flujo de caja, se asume una producción estable para los años de evaluación. También, se tiene en cuenta la pérdida del valor comercial del gasóleo empleado para los lavados, dado que después de su uso, no puede ser empleado sino solamente para la elaboración de combustóleo, impidiendo su uso en la elaboración de ACPM, gasolina entre otros.

Tabla 9*Flujo de caja estimado de la propuesta*

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$16.622.292.600	\$ 16.622.292.600	\$16.622.292.600	\$16.622.292.600	\$16.622.292.600
Ahorro gasóleo (ahorro por no pérdida de valor del producto)		\$ 362.306.937,75	\$ 362.306.937,75	\$ 362.306.937,75	\$ 362.306.937,75	\$ 362.306.937,75
OPEX (-)		\$ 831.114.630	\$ 831.114.630	\$ 831.114.630	\$ 831.114.630	\$ 831.114.630
CAPEX (-)	\$ 138.832.933	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000
Depreciación (-)	\$ 69.416.466,50	\$ 13.883.293,30	\$ 13.883.293,30	\$ 13.883.293,30	\$ 13.883.293,30	\$ 13.883.293,30
TOTAL	-\$ 208.249.400	\$ 15.839.601.614	\$ 15.839.601.614	\$ 15.839.601.614	\$15.839.601.614	15.839.601.614

Con los flujos de caja estimados para cada año, se evalúa el VPN de la propuesta a una tasa de oportunidad de 19%, teniendo en cuenta un DTF de 10,9% y una tasa de riesgo del sector del 7%.

Tabla 10*VPN*

Año	Valor
Año 0	-\$ 208.249.400
Año 1	\$ 15.839.601.614
Año 2	\$ 15.839.601.614
Año 3	\$ 15.839.601.614
Año 4	\$ 15.839.601.614
Año 5	\$ 15.839.601.614
Tasa de descuento.	19%
VPN	\$ 40.947.983.022

Como se observa el valor del VPN es positivo, por tanto, es atractivo y viable para invertir.

A su vez.

Tabla 11*TIR*

Año	Valor
Año 0	-\$ 208.249.400
Año 1	\$ 15.839.601.614
Año 2	\$ 15.839.601.614
Año 3	\$ 15.839.601.614
Año 4	\$ 15.839.601.614
Año 5	\$ 15.839.601.614
TIR	7606%

Por otro lado, la TIR de la alternativa propuesta es muy superior a la tasa de oportunidad, lo que indica que es rentable para invertir. La TIR es de 7606%. Este valor es altamente atractivo, y corresponde a que, de implementarse, el CAPEX asociado a la propuesta se recupera en los primeros días de la nueva operación.

Finalmente, el período de recuperación de la inversión (PRI), representa cuánto tardará la empresa en generar los recursos monetarios suficientes para pagar el monto original de la inversión.

La fórmula para calcular el PRI es:

$$a + \frac{b - c}{d} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

a = Año inmediato anterior en que se recupera la inversión.

b = Inversión Inicial.

c = Flujo de Efectivo Acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión.

d = Flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión.

Tabla 12

Periodo retorno de la inversión (PRI).

PRI 0 años 0 meses 5 días

Para la empresa, el periodo de recuperación de la inversión (bajo las condiciones mencionadas y planteadas), es de tan solo 5 días de operación. Esto indica que es altamente atractiva desde el punto de vista financiero y es evidenciable en los valores de VPN y TIR notablemente altos.

5. Conclusiones

La línea de lavado propuesta en el presente documento, como estrategia operativa para la disminución de carga de fondos de vacío de 30 kbpd a 20 kbpd, resultó factible tanto técnica como económicamente, manteniendo la unidad en servicio y evitando el lucro cesante ocasionado por un día de parada de planta.

La revisión realizada a las corridas de evaluación soporta la operación íntegra de la unidad con una carga de 20 kbpd. Asimismo, no se presenta ningún impedimento en la aplicación del lavado que se realiza con sólo gasóleo, lo cual soporta la ejecución de esta limpieza mientras la unidad se encuentre en operación.

Según los cálculos realizados, un diámetro adecuado de la línea de lavado puede ser de 3 in, lo cual corresponde con la misma dimensión del circuito de lavado preexistente. De igual manera, los isométricos establecidos conducen a una línea de limpieza sin inconvenientes de cortes de conexión con otras tuberías.

Asimismo, según lo determinado, el equipo rotativo disponible para el sistema de lavado no cuenta con la capacidad necesaria para realizar el lavado de tren que queda fuera de servicio.

De acuerdo al análisis financiero realizado, la alternativa propuesta es altamente viable, tanto así, que la inversión realizada por la empresa, se recupera en tan solo 5 días de operación. De tal forma, los valores de VPN y TIR para evaluar la inversión son bastante atractivos.

6. Recomendaciones

La materialización de la línea de lavado para la unidad DEMEX conceptualizada en el presente documento es sugerida, ya que beneficiaría a Ecopetrol S.A y al medio ambiente. La propuesta va de la mano con la reducción en 2500 BPD de gasóleo, que de ser utilizados irían a combustóleo, y dificultaría el cumplimiento del acuerdo suscrito entre Ecopetrol S.A y la organización marítima internacional.

Se recomienda hacer la evaluación de la unidad mediante simulación por Aspen hysys, para determinar la presión más baja a la cual se puede llevar al tren que está fuera de servicio, tal que, nos permita tener 70 kbpd de circulación de solvente y además, sea suficiente para evacuar el nivel de fondos estando el otro tren en operación normal con 395 psig.

Debido a que se va a utilizar el circuito ya construido de circulación de asfáltenos, se debe sacar de servicio dicho equipo que opera para el tren que sale de servicio, lavar y bloquear succión y descarga de la bomba, antes de poner en operación el sistema de lavado propuesto.

Se recomienda hacer mantenimiento preventivo menor de engrase de válvulas y revisión de prensa-empaques, al menos, cada seis meses; para preservar el buen estado de la facilidad de lavado propuesta.

De no implementársela alternativa no se solucionaría una problemática que afecta la competitividad de la compañía al subemplear las instalaciones, generar reprocesos y emplear insumos (gasóleo) en actividades de lavado que no aportan significativamente en la cadena de valor de la empresa y pierden valor comercial

Se debe asegurar que el nuevo equipo rotativo escogido para realizar el lavado con gasóleo del tren que queda fuera de servicio, en el proceso de reducción de carga de fondos de vacío de 30

kbpd a 20 kbpd, con el otro tren en servicio, tenga cabeza de descarga mínima de 1008 Ft con 175 GPM en su zona de mayor eficiencia.

Referencias Bibliográficas

- Brausin, K. A. (2021). Evaluación operacional de la carga de fondos de vacío en la unidad Demex de la GRB, mediante simulación de Aspen Hysys.
- Carrillo, J. A., Cáceres, J., Vela, G., & Bueno, H. (1996). SOLVENTES DE DESASFALTADO. *CT&F - Ciencia, Tecnología Y Futuro*, 1(2), 67–76. Bucaramanga: Instituto Colombiano de Petróleo. <https://doi.org/10.29047/01225383.599>
- López, X., Choque, X., & Zenón, C. (2019). Proceso Desasfaltado (PDA). Bolivia: U. Juan Misael Saracho
- Ecopetrol (2008). Manual de Descripción del Proceso de la Unidad de Demex. Revisión. 2008.
- Morales, G. A. (2017). Análisis estadístico y por simulación del desempeño operacional de la planta DEMEX de la GRB. Bucaramanga: Uis
- Organización Marítima Internacional (OMI). (s.f.). Sulphur 2020. Recuperado el 5 de 10 de 2020, de <http://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur2020.aspx>
- Picón, J. T. (2012). Simulación del proceso de desasfaltado de fondos de vacío modificando la composición del solvente. Researt Gate.
- Tojo, J. O. (1966). Problemas de ingeniería química, Operaciones básicas. Madrid, Barcelona


Apéndice A. Crudo Reconstituido

CRUDO CASTILLA NORTE				
CRUDO ISLA VI	NAFTA	FDV	GAO	TOTAL
✓	✓	✓	0.00	✓

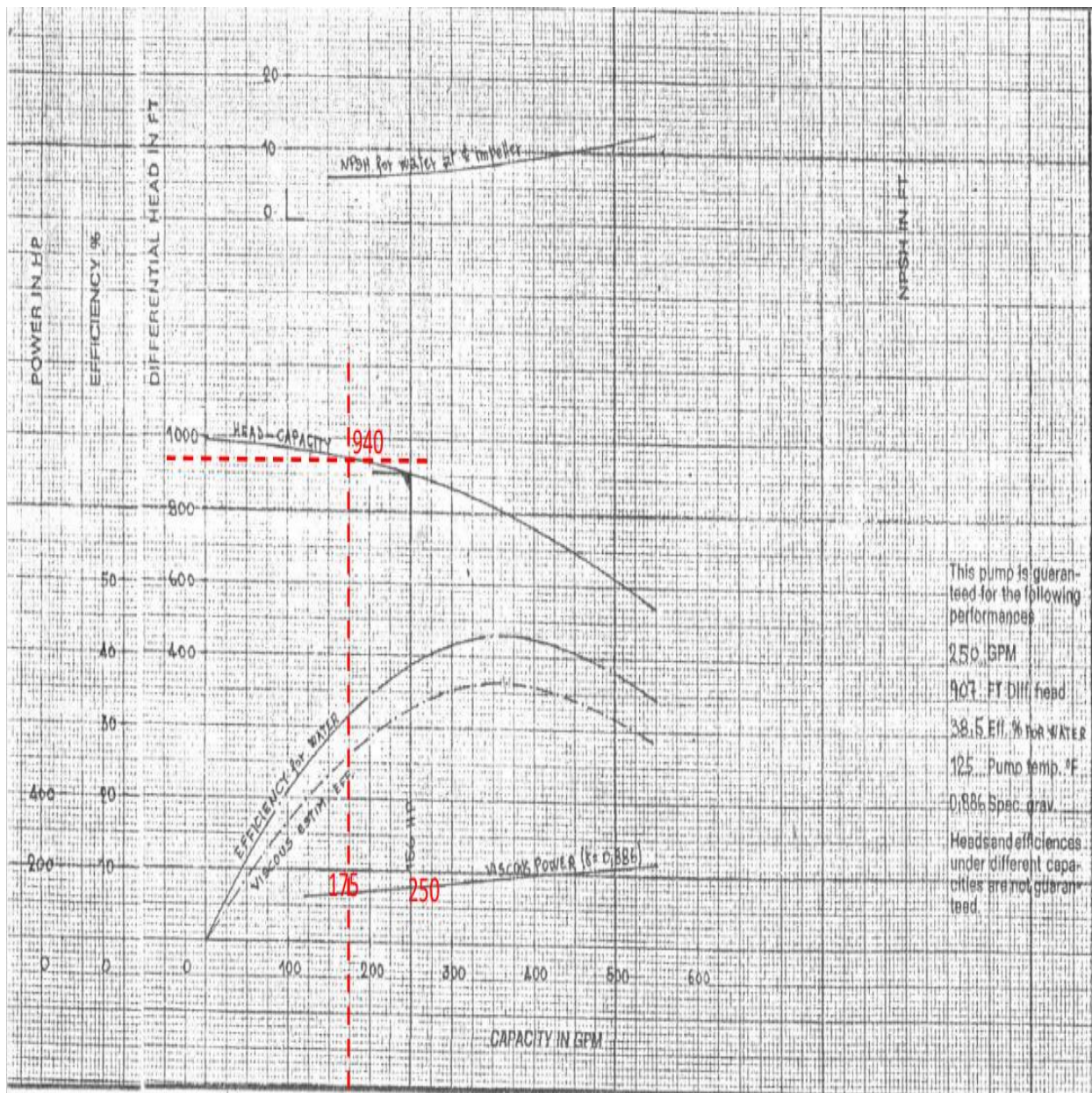
Apéndice B. Cambio de Corrida y Eventos Operacionales

CORRIDA	INICIO	FINAL	DESCRIPCIÓN
30 kbpd	15/09/21 6:58	28/10/21 14:58	Operación normal
		32 h	
20 kbpd	29/10/21 22:58	23/11/21 6:58	Operación normal
		16 h	
30 kbpd	23/11/21 22:58	23/12/21 22:58	Operación normal
		30 Dias	
32 kbpd	24/12/21 6:58	14/01/22 22:58	Operación normal
		16h	
30 kbpd	15/01/22 14:58	16/01/21 22:58	Parada técnica de la unidad
		40 h	
30 kbpd	18/01/22 14:58	23/01/22 22:58	Operación normal
		32 h	
20 kbpd	25/01/22 6:58	07/02/22 22:58	Touraround
		37 Dias 16 h	
20 kbpd	17/0322	29/03/22 14:58	Operación Normal
		24 h	
32 kbpd	30/03/22 14:58	30/03/22 22:58	Aumento de carga
		8 H	
34 kbpd	31/03/22 6:58	28/04/22 14:58	Operación Normal
		16 h	
30 kbpd	29/04/22 6:58	16/05/22 22:58	Operación Normal
		56 h	
20 kbpd	18/05/22 6:58	24/05/22 6:58	Operación Normal
		16 h	
30 kbpd	24/05/22 22:58	23/06/22	Operación Normal
		24 h	
33 kbpd	24/06/22 14:58	30/06/22 14:58	Operación Normal
		16h	
30 kbpd	01/07/22 6:58	23/08/22 22:58	Operación Normal
		32 h	
20 kbpd	25/08/22 6:58	05/09/22 22:58	Operación normal
		16 h	
33 kbpd	06/09/22 14:58		

Apéndice C. Data Sheet Bomba de Gasóleo de Lavado

		DATA SHEET FOR CENTRIFUGAL PUMPS				PIT-00-F-014	
PROYEC.	UNIT: 2500	DOC.TYPE:	PROGR:	REV.	SHEET 1	OF 1	DATE: ABR-2001
For FLUSH OIL PUMP				No. Req. d. 1	Item P-2509		
Main/Driver 1/STEAM TURBINE		Spare/Driver		MFR 0910.01			
Pump MFR NUOVO PIGNONE		Size and Type T 4x2x15-13 TC		<input checked="" type="checkbox"/> Horiz.	<input type="checkbox"/> Vert.	<input type="checkbox"/> In-line	
OPERATING CONDITIONS				PERFORMANCE			
Service FLUSH OIL		Location <input type="checkbox"/> Indoor <input checked="" type="checkbox"/> Outdoor		Proposal Curve No. 501/74-6 REV 1			
Disch Press. Psig 345		GPM at PT Norm. 250 Rated 250		NPSH Req.d. (water) Ft 6.8			
Diff. Press. Psi 340		Suct. Press Psig Max. 5 Rated 5		No. of Stages 1 rpm 3550			
Diff. Head. Ft 907 (1)		NPSH Avail. Ft 10		Rated Power (BHP) 156 Eff % 32.5			
LIQUID				Max Power Rated Impeller Hp 224			
Type of liquid <input checked="" type="checkbox"/> Liquid <input type="checkbox"/> Hazardous <input type="checkbox"/> Flammable		Name of liquid HYDROCARBO		Suction Specific Speed 13329			
Sp. Gr. at PT 0.886		PT °F 125		Min. Continuous Flow (GPM) 70			
Vis at PT cSt 42.5		V. Press. at PT psia 10		Allowable Operating Region (GPM) 175-300			
Corr./Eros. caused by				Max. Head Rated Imp. Ft 998			
Flow Controlled by: <input type="checkbox"/> LC <input type="checkbox"/> TC <input type="checkbox"/> PC <input type="checkbox"/> FC				Rotation Facing Coupling end C.C.W			
CONSTRUCTION				Max Sound Press. Level. Requird			
Applicable standard <input type="checkbox"/> API 610 8th Edition <input type="checkbox"/> API 682 1rs Edition				Cooling Water NO Plan			
Casing Mounting <input checked="" type="checkbox"/> Centerline <input type="checkbox"/> Foot <input type="checkbox"/> Bracket				Total Water l			
<input type="checkbox"/> Vertical <input type="checkbox"/> In line				Flushing YES Plan 11-61			
Split <input type="checkbox"/> Axial <input checked="" type="checkbox"/> Radial				External Fluid Seal Flush:			
Type <input checked="" type="checkbox"/> Single Volute <input type="checkbox"/> Double Volute <input type="checkbox"/> Diffuser <input type="checkbox"/> Staggered				Aux. Piping by MFR <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Aux. Accessory by MF			
Tapped Openings <input checked="" type="checkbox"/> Vent <input checked="" type="checkbox"/> Drain <input type="checkbox"/> Gage				Stuffing Box Pressure psig			
				Starting Torque Curve			

Apéndice D. Curva de la Bomba de Lavado con Gasóleo



Apéndice E. Presiones en sistema de lavado con gasóleo

	Presiones en sistema de lavado con gasóleo [Psig]		
	Descarga bomba	Entrada a proceso	Pérdidas en tuberías
Case 1	360	306	54
Case 2	365	311	54
Case 3	370	316	54
Case 4	375	321	54
Case 5	380	326	54
Case 6	385	331	54
Case 7	390	336	54
Case 8	395	341	54
Case 9	400	346	54
Case 10	405	351	54
Case 11	410	356	54
Case 12	415	361	54
Case 13	420	366	54
Case 14	425	371	54
Case 15	430	376.1	53.9
Case 16	435	381.1	53.9
Case 17	440	386.1	53.9
Case 18	445	391.1	53.9
Case 19	450	396.1	53.9
Case 20	455	401.1	53.9
Case 21	460	406.1	53.9
Case 22	465	411.1	53.9
Case 23	470	416.1	53.9
Case 24	475	421.1	53.9
Case 25	480	426.1	53.9
Case 26	485	431.1	53.9
Case 27	490	436.1	53.9
Case 28	495	441.2	53.8
Case 29	500	446.2	53.8

Apéndice F. Caída de presión en el sistema de lavado con gasóleo en la unidad de Demex