

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LOS HORNOS
ATMOSFÉRICOS DE LA UNIDAD RECUPERADORA DE DILUENTE DE UN
MEJORADOR DE CRUDO EXTRAPESADO**

Realizado por:

JENNYFER DEL VALLE MILLÁN LÓPEZ

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial para
optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, mayo de 2025

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LOS HORNOS
ATMOSFÉRICOS DE LA UNIDAD RECUPERADORA DE DILUENTE DE UN
MEJORADOR DE CRUDO EXTRAPESADO**

Revisado y aprobado por:

Ing. Químico Arturo Rodulfo, M. Sc.
Asesor académico

Ing. Químico Sharon López
Asesor industrial

Puerto La Cruz, mayo de 2025

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LOS HORNOS
ATMOSFÉRICOS DE LA UNIDAD RECUPERADORA DE DILUENTE DE UN
MEJORADOR DE CRUDO EXTRAPESADO**

Jurado calificador

Ing. Químico Arturo Rodolfo, M. Sc.
Asesor académico

Ing. Químico Victoria Salazar, M. Sc.
Jurado principal

Ing. Químico Frank Parra
Jurado principal

Puerto La Cruz, mayo de 2025

RESOLUCIÓN

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE:

“Los trabajos son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario, para su autorización”.



DEDICATORIA

A Dios

A la Virgen Del Valle

A mi mamá y mi papá

A mi hermana

A mi familia

A la memoria de Alcibides Cedeño

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque desde el día uno me llevó de la mano y en todo momento de esta carrera me hizo sentir su amor, cercanía y compañía, y me brindó la fuerza, herramientas, entendimiento y valentía necesaria para llegar al final y lograr la meta. Sin Él nada hubiera sido posible y el llegar hoy a donde estoy es saber que Su tiempo es perfecto y que si lo dejamos hacer Su Voluntad en nuestra vida, todo se hace más sencillo pese a los obstáculos que se presenten en el camino.

A la Virgen del Valle, por interceder ante su Hijo por mí en esta etapa de mi vida que, en ocasiones, fue compleja. Sé que las veces que le pedí de su ayuda maternal, ella le hablaba a su Hijo de mí y Él actuaba en mi favor, concediéndome milagros, siempre que fuera Su voluntad. María no se cansa de rogar por nosotros y no se cansa de guiarnos para llevar una vida que nos acerque a Jesucristo.

A mis padres, por cada esfuerzo, cada sacrificio, por siempre motivarme con su amor y palabras de aliento, por las oraciones elevadas a Dios y por la educación que me dieron. Son mi pilar y siempre han sido combustible en mi vida para continuar y no parar en ninguna meta planteada. Dios me permita algún día retribuirle todo lo que han hecho y dado por mí, aunque nunca sería suficiente. Los amo y esto es por ustedes.

A mi hermana, por su apoyo y por estar para mí. Sus ocurrencias, sus risas y su esencia me han motivado a no rendirme. Hemos aprendido la una de la otra y seguiremos aprendiendo. Mi deseo es ser inspiración en su vida. Te amo.

A mis familiares cercanos, cada uno ha sido esencial en este proceso, sus bendiciones y oraciones, su interés por este proyecto, comprensión, disposición de ayudarme y brindarme apoyo fueron de gran aporte desde el día uno hasta esta etapa final, a Dios gracias por cada uno de ustedes, abuela, tías, tíos y primos. Son parte importante en mi vida.

A mi tutor académico, profesor Arturo Rodulfo, su profesionalismo, vocación por enseñar y ganas de ayudarnos a crecer como ingenieros (en mi caso, tanto en las materias como con esta tesis) fueron un gran aporte a mi vida profesional y cotidiana. No solo me brindo el conocimiento necesario sobre esta carrera tan bella pero exigente, sino que también me enseñó valores que son importantes aplicar en la vida y me inspiró a ser siempre perseverante en lograr cada objetivo planteado. Dios lo bendiga.

A mi tutora industrial, Sharon López, porque el día uno de mis pasantías me recibió con los brazos y poniendo a la orden todos sus conocimientos. Este proyecto no hubiera sido posible sin el aprendizaje adquirido gracias a ella, quién sin esperar nada a cambio, me enseñó y educó en materia. Te admiro y agradezco el apoyo y el estar para mí no solo el tiempo de pasantías, sino después de haber terminado esa etapa.

A todo el equipo del departamento de ingeniería de procesos de Petromonagas, en ustedes encontré grandes profesionales, con distintas personalidades pero que comparten algo en común y es las ganas de ofrecer sus conocimientos a los que entramos buscando un aprendizaje para nuestra formación profesional. Les abrazo y guardo conmigo todo lo que me enseñaron.

A mis compañeros de clases, ahora amigos, porque fueron uno de los más grandes apoyos que tuve. A algunos los conocí desde el primer semestre, a otros en algunos semestres después y otros incluso casi al final de la carrera, pero cada uno llegó en el tiempo justo y necesario y sé que fue por obra de Dios. De cada uno he aprendido tanto, a cada uno lo admiro y cada uno tiene un lugar especial en mi corazón. Los quiero y admiro mucho. (Rodma, Bethania, Paola S, Valeria, Paola R, Ysleidy, Gabriela, Gregory, Daniel, Jota, Argenis, y aquellos que llegaron al final de esta etapa pero que son igual de importantes)

A mis amigos, los que me regaló la vida parroquial, los que hice por mi hermana, los que me dejó el trabajo más divertido que he tenido y los que están desde mi infancia, gracias por siempre estar mí y ayudarme de tantas formas, muchos estuvieron conmigo en esta etapa de la universidad motivándome a no rendirme y enseñándome que si me caía, me debía levantar, sacudir y continuar. Sus oraciones y palabras de aliento fueron de mucha ayuda.

A la memoria de mi tío Alcibides Cedeño, por inculcarme que la educación es de mucha importancia en la vida de una persona. A cada miembro de mi familia le agradezco tanto y pero a su memoria lo hago de forma especial porque no se cansó de ser mi compañía cada mañana hacia la parada de bus y por recordarme que un título profesional abre muchas puertas y que para obtenerlo debía ser perseverante, constante y disciplinada y no estaba errado. Gracias por tanto.

A los profesores, por sus enseñanzas y porque, de una u otra forma, me ayudaron a crecer profesionalmente. Gracias especiales a la profesora Yraima Salas, por toda la labor que hace con nosotros en las aulas de clases, impartiendo conocimientos, y por ser el más grande apoyo en nuestra etapa de tesis/pasantías. Y a mis jurados calificadores, profesores Victoria Salazar y Frank Parra, por los conocimientos brindados y por dedicarle tiempo de lectura, correcciones y aportes a este proyecto.

A la universidad de oriente, por abrir sus puertas y permitirme formarme en la “Casa más alta” del oriente venezolano.

RESUMEN

Se evaluó el proceso de combustión en los hornos atmosféricos de la unidad recuperadora de diluyente (DRU) de un mejorador de crudo extrapesado. Primeramente se identificaron las variables operacionales que influyeron en el proceso de combustión en los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas, siendo estas la temperatura de entrada y salida del crudo diluido (DCO), la temperatura de los gases de combustión, la temperatura del metal de los tubos que conforman los hornos atmosféricos, la presión del DCO y del gas combustible, el cuál a las condiciones de operación actual se trató de gas natural, el tiro del dámper de los hornos atmosféricos y los flujos de entrada de DCO y de gas combustible. Todo esto se identificó con el uso de las herramientas PI. Process Book V.2.3 y Microsoft Excel y se obtuvo que la mayoría de las variables se encontraban alejadas de la condición de diseño debido a que la planta se encontraba trabajando a capacidad mínima de operación. Seguidamente se determinó la eficiencia térmica de los hornos atmosféricos a condición de operación actual por medio de un modelo de simulación de procesos usando Pro/II versión 2023, el cual fue validado para el caso diseño. Se obtuvo una eficiencia de 85,23% vs 82,3% que representa la eficiencia según la hoja de datos cuando se opera con gas de refinería como gas combustible. Mientras que a la condición de operación actual de la planta (carga mínima), la eficiencia obtenida (88,19%) se comparó con la eficiencia arrojada en una hoja de cálculos, utilizada en el mejorador de crudo para evaluar el comportamiento de los hornos, la cual reportó 84% para el 13 de noviembre del 2023, día en que la planta se encontraba operando de forma estable. Por último, en base a los resultados obtenidos con todo el estudio anterior, se propusieron mejoras para garantizar un proceso de combustión, en los hornos atmosféricos de la Unidad Recuperadora de Diluyente DRU, dentro de los rangos normales de operación. De forma específica éstas están orientadas en la realización de inspecciones y mantenimientos periódicos, así como en inversión de instrumentos de medición de forma que se permita un proceso de combustión adecuado y se eviten las malas lecturas de las variables y parámetros operacionales, a fin de garantizar la eficiencia de los hornos atmosféricos F-1101 A/B.

TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	viii
TABLA DE CONTENIDO.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
CAPITULO I.....	18
EL PROBLEMA.....	18
1.1 Planteamiento del problema.....	18
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo general.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Presentación de la empresa.....	20
1.4 Proceso de mejoramiento del crudo extrapesado.....	21
CAPITULO II.....	22
MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 Antecedentes.....	22
2.2 Hornos atmosféricos de crudo.....	23
2.3 Hornos de procesos (convencional).....	23
2.4 Secciones del horno.....	24
2.4.1 Sección de convección.....	24
2.4.2 Sección de radiación.....	24
2.4.3 Sección de combustión.....	24
2.5 Partes de un horno de procesos.....	24
2.6 Variables y parámetros operacionales de los hornos de procesos.....	25
2.6.1 Carga total (caudal total de fluido de procesos).....	25
2.6.2 Temperatura de entrada y salida de la carga total.....	25
2.6.3 Presión de entrada y salida de carga.....	26
2.6.4 Presión de combustible en el quemador.....	26
2.6.5 Temperatura de piel de tubos.....	26

2.6.6	Exceso de oxígeno (O ₂) en la combustión	26
2.6.7	Patrón de llamas	26
2.6.8	Dámper de chimenea	27
2.6.9	Temperatura de gases de combustión	27
2.6.10	Presión en el hogar – tiraje en tope de la sección radiante	27
2.6.11	Flujo de gas combustible consumido	27
2.7	Porcentaje de aire en exceso.....	27
2.8	Entonación.....	28
2.9	Eficiencia térmica de un horno.....	28
2.10	Poder calorífico inferior (PIC).....	28
2.11	Relación aire-combustible	29
2.12	Balance de energía asociado al proceso de combustión	29
2.13	Balance de masa asociado al proceso de combustión	29
2.14	Simulador de procesos PRO/II versión 2023.....	30
2.15	Eficiencia térmica de la reacción de combustión	30
CAPÍTULO III.....		31
DESARROLLO DEL TRABAJO.....		31
3.1	Variables operacionales que influyen en el proceso de combustión dentro de los hornos atmosféricos F-1101 A/B	31
3.1.1	Temperatura de salida (COT).....	32
3.1.2	Temperatura de gases de combustión	32
3.1.3	Temperatura de entrada (zona de convección)	33
3.1.4	Temperatura de metal de tubo (TMT)	33
3.1.5	Presión de brea.....	33
3.1.6	Presión de gas combustible	33
3.1.7	Tiro del horno	33
3.1.8	Flujo de entrada de crudo diluido (DCO)	34
3.1.9	Flujo de gas combustible.....	34
3.2	Determinación de la eficiencia térmica (diseño y actual) de los hornos atmosféricos F-1101 A/B.....	34
3.2.1	Construcción del diagrama del modelo de simulación.....	35
3.2.2	Selección del paquete termodinámico.....	36
3.2.3	Selección de los equipos y accesorios utilizados	37

3.2.4	Definición de las corrientes de alimentación	41
3.2.5	Simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B para el cálculo de la eficiencia a condición de operación actual	46
3.3	Propuestas de mejoras para garantizar un proceso de combustión eficiente en los hornos atmosféricos F-1101 A/B	47
CAPÍTULO IV		48
ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		48
4.1	Identificación de las variables operacionales de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad recuperadora de diluyente	48
4.1.1	Temperatura de salida (COT).....	48
4.1.2	Temperatura de gases de combustión	49
4.1.3	Temperatura de entrada del DCO al horno	51
4.1.4	Temperatura de metal de tubo (TMT)	53
4.1.5	Presión de brea.....	57
4.1.6	Presión de gas combustible	59
4.1.7	Tiro del horno	61
4.1.8	Flujo de entrada de crudo diluido (DCO)	62
4.1.9	Flujo de gas combustible.....	64
4.2	Determinación de la eficiencia térmica (diseño y actual) de los hornos atmosféricos F-1101 A/B.....	67
4.3	Propuestas de mejoras para garantizar un proceso de combustión eficiente en los hornos atmosféricos F-1101 A/B	69
4.3.1	Realización de inspecciones periódicas a los quemadores de los hornos atmosféricos F-1101 A/B	70
4.3.2	Realización de mantenimiento al dámper de chimenea de cada horno atmosférico (F-1101 A/B).....	73
4.3.3	Inversión en analizadores de oxígeno para mejorar la eficiencia de los hornos atmosféricos F-1101 A/B	74
4.4	Conclusiones	76
4.5	Recomendaciones	76
5	BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS		80
Anexo A.	Tablas de variables operacionales de los hornos F-1101A	81
Anexo B.	Tablas de variables operacionales de los hornos F-1101B	87

Anexo C.	Planos mecánicos de los hornos atmosféricos F-1101A/B (PID y PFD).....	93
Anexo D.	Hoja de cálculo para el balance de masa y energía y para la evaluación de las variables operacionales, realizadas por BEV, C.A para el mejorador de crudo Petromonagas, siguiendo los parámetros expuestos en la norma API ST 560	97
Anexo E.	Imágenes obtenidas de la inspección termográfica realizada a los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas....	105
Anexo F.	Tablas generadas después de la corrida de la simulación para los casos de diseño y actual de los hornos atmosféricos F-1101 A/B	109
Anexo G.	Resultado de la simulación del caso diseño utilizando, como gas combustible, el gas natural actual disponible en la planta	113
	METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Tags de los instrumentos de medición de las variables evaluadas en el horno atmosférico F-1101A	31
Tabla 3.2 Tags de los instrumentos de medición de las variables evaluadas en el horno atmosférico F-1101B	32
Tabla 3.3 Composición gas combustible, caso diseño y actual	43
Tabla 3.4 Parámetros importantes extraídos de la simulación.....	46
Tabla 3.5 Parámetros importantes extraídos de las tablas obtenidas en la simulación ..	47
Tabla 4.1 TMT promedio de entrada, punto medio y salida del haz tubular de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A.....	55
Tabla 4.2 TMT promedio de entrada, punto medio y salida del haz tubular de las celdas 3 y 4 del horno atmosférico F-1101B, durante el mes de octubre.....	56
Tabla 4.3 Flujo de gas natural promedio en Mscfd en cada celda de los hornos atmosféricos F-1101 A durante el tiempo en estudio (sep-oct de 2023)	67
Tabla 4.4 Porcentajes de desviación de los resultados obtenidos para los principales parámetros evaluados en la simulación del caso diseño	68
Tabla 4.5 Resultados obtenidos de los principales parámetros evaluados en la simulación del caso diseño con gas natural actual usado como gas combustible	68
Tabla 4.6 Resultados obtenidos de los principales parámetros, evaluados en la simulación del caso actual, vs los obtenidos mediante hoja de cálculo según la norma API 560.....	69
Tabla 4.7 Resultados de la inspección visual a los quemadores del horno atmosférico F-1101A (marzo 2024).....	71
Tabla 4.8 Resultados de la inspección visual a los quemadores del horno atmosférico F-1101B (marzo 2024).....	72
Tabla A.1 Variables de temperaturas (I) del horno atmosférico F-1101A, oct 2023.....	82
Tabla A.2 Variables de temperaturas (II) del horno atmosférico F-1101A, oct 2023.....	83
Tabla A.3 Variables de presión del horno atmosférico F-1101A, oct 2023	84
Tabla A.4 Variables en la zona de convección del horno F-1101A, oct 2023	85
Tabla A.5 Flujos de entrada del DCO a cada pase del horno F-1101A, oct 2023.....	86
Tabla B.1 Variables de temperaturas (I) del horno atmosférico F-1101B, oct 2023.....	88
Tabla B.2 Variables de temperaturas (II) del horno atmosférico F-1101B, oct 2023.....	89
Tabla B.3 Variables de presión del horno atmosférico F-1101B, octubre 2023	90
Tabla B.4 Variables en la zona de convección del horno F-1101B, oct 2023	91
Tabla B.5 Flujos de entrada de DCO a cada pase del horno F-1101B, oct 2023.....	92

Tabla F.1 Tabla generada de las propiedades y flujos de las corrientes, que conforman el diagrama de flujo de proceso del caso diseño	110
Tabla F.2 Resultados de parámetros generados por la calculadora CA1 para el caso diseño.....	110
Tabla F.3 Resultados generados para los reactores de conversión utilizados en la simulación del caso diseño	110
Tabla F.4 Calor absorbido en cada intercambiador de calor usado en la simulación para representar las zonas de radiación y convección así como las pérdidas de calor en el caso de operación de diseño	111
Tabla F.5 Tabla generada de las propiedades y flujos de las corrientes, que conforman el diagrama de flujo de proceso del caso actual	111
Tabla F.6 Resultados de parámetros generados por la calculadora CA1 para el caso actual.....	111
Tabla F.7 Resultados generados para los reactores de conversión utilizados en la simulación del caso actual.....	112
Tabla F.8 Calor absorbido en cada intercambiador de calor usado en la simulación para representar las zonas de radiación y convección así como las pérdidas de calor en el caso actual	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Diagrama del procedimiento seguido, en el simulador PRO/II.....	35
Figura 3.2 Diagrama de flujo de proceso realizado para la simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para el caso diseño	36
Figura 3.3 Selección del paquete termodinámico en la simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para los casos de operación de diseño y actual	37
Figura 3.4 Equipos seleccionados, dentro de PRO/II para el modelo de simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para el caso diseño	38
Figura 3.5 Reacciones de combustión hornos F-1101 A/B, para el caso diseño	39
Figura 3.6 Controlador para variar el flujo de aire estequiométrico especificado bajo la condición de operación de diseño	40
Figura 3.7 Especificación del "splitter" para separar, en dos, la corriente de gas combustible	41
Figura 3.8 Especificación de la corriente de DCO a la entrada del horno.....	41
Figura 3.9 Caracterización de la corriente DCO en el simulador, caso diseño	42
Figura 3.10 Especificación de la corriente de aire (AIR)	43
Figura 3.11 Pantalla mostrada en el simulador una vez convergido el modelo de simulación para el caso diseño.....	45
Figura 3.12 Diagrama de flujo de la simulación de los hornos caso actual.....	46
Figura 4.1 Temperatura de salida del horno atmosférico F-1101A	48
Figura 4.2 Temperatura de salida del horno atmosférico F-1101B	49
Figura 4.3 Temperatura del gas de chimenea en el horno atmosférico F-1101A.....	49
Figura 4.4 Temperatura del gas de chimenea en el horno atmosférico F-1101B.....	50
Figura 4.5 Infiltraciones de aire en los hornos F-1101	51
Figura 4.6 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101A (sep 2023)	51
Figura 4.7 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101A (oct 2023)	52
Figura 4.8 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101B (sep 2023)	52
Figura 4.9 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101B (oct 2023)	53
Figura 4.10 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101A celda 1 (oct 2023).....	54
Figura 4.11 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101A celda 2 (oct 2023).....	54
Figura 4.12 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101B celda 3 (oct 2023).....	55
Figura 4.13 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101B celda 4 (oct 2023).....	56
Figura 4.14 Termografía realizada a la zona de radiación del horno atmosférico F-1101A	57

Figura 4.15 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101A (sep de 2023).....	57
Figura 4.16 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101A (oct de 2023).....	58
Figura 4.17 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101B (sep de 2023).....	58
Figura 4.18 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101B (oct de 2023).....	59
Figura 4.19 Presión de fuel gas en la entrada de las celdas 1 y 2 del horno F-1101A, durante septiembre y octubre de 2023	60
Figura 4.20 Presión de fuel gas en la entrada de las celdas 3 y 4 del horno F-1101B, durante septiembre y octubre de 2023	60
Figura 4.21 Comportamiento del tiro del dámper en el horno F-1101A, correspondiente a septiembre y octubre de 2023	61
Figura 4.22 Comportamiento del tiro del dámper en el horno F-1101B, correspondiente a septiembre y octubre de 2023	62
Figura 4.23 Flujo de entrada de DCO por celda del horno F-1101A (sep 2023)	62
Figura 4.24 Flujo de entrada de DCO por celda del horno F-1101A (oct 2023)	63
Figura 4.25 Flujo de entrada del DCO por celda del horno F-1101B (sep 2023)	63
Figura 4.26 Flujo de entrada del DCO por celda del horno F-1101B (oct 2023)	64
Figura 4.27 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A (sep 2023).....	65
Figura 4.28 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A (oct 2023).....	65
Figura 4.29 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 3 y 4 del horno atmosférico F-1101B (sep 2023).....	66
Figura 4.30 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 3 y 4 del horno atmosférico F-1101B (oct 2023).....	66
Figura C.1 Arreglo general de los hornos atmosféricos F-1101 A/B	94
Figura C.2 Serpent�n de tubos de la zona de radiación	95
Figura C.3 Serpent�n de tubos de la zona de convección.....	96
Figura D.1 Pantalla de inicio en Excel de la hoja de c�culos para el seguimiento de los hornos atmosféricos F-1101 A/B	98
Figura D.2 Página del balance de masa en la hoja de c�culos de excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 1).....	99
Figura D.3 Página del balance de masa en la hoja de c�culos de Excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 3).....	100
Figura D.4 Página del balance de masa en la hoja de c�culos de Excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 4).....	101

Figura D.5 Página del resumen del balance de masa en la hoja de cálculos de Excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 4)	102
Figura D.6 Esquema final de los resultados obtenidos en la hoja de cálculos de Excel del horno atmosférico F-1101A (parte final).....	103
Figura D.7 Esquema final de los resultados obtenidos en la hoja de cálculos de Excel del horno atmosférico F-1101B (parte final).....	104
Figura E.1 Imágenes y termogramas obtenidos de la termografía realizada en la zona de radiación del horno atmosférico F-1101A	107
Figura E.2 Imagen y termograma obtenido de la termografía realizada en la zona de convección del horno atmosférico F-1101A.....	108
Figura E.3 Imagen y termograma obtenido de la termografía realizada en la zona de convección del horno atmosférico F-1101B.....	108
Figura G.1 Diagrama y resultados obtenidos de la simulación para el caso diseño con gas natural actual	114

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El mejorador de crudo extrapesado Petromonagas ubicado en el complejo industrial, petroquímico y petrolero “General José Antonio Anzoátegui”, en la costa norte del estado Anzoátegui, es una planta que tiene como finalidad mejorar el crudo extrapesado de calidad de 8 °API, proveniente de Morichal, para obtener un crudo mejorado de 16° API, el cual es comercializado siguiendo los compromisos a los que está vinculado. Para lograrlo, se desea optimizar los recursos disponibles y tener el mínimo costo de inversión posible para maximizar las ganancias de la nación, las cuales serán retribuidas en planes a futuro.

El mejorador de crudo Petromonagas se encuentra estructurado en tres secciones (conocidas también como consolas): la primera es la sección de destilación y coque, la segunda es la sección de tratamiento e hidrotreatmento de nafta y la última sección es la encargada de los servicios industriales. La evaluación a realizar contempla la unidad recuperadora de diluyente (DRU) perteneciente a la sección 1.

La unidad recuperadora de diluyente, es la unidad encargada de recuperar el diluyente (nafta pesada) contenida en el crudo diluido (DCO) y, a su vez, obtener parte de los cortes que conforman el crudo mejorado (nafta liviana, kerosene, gasóleo atmosférico y residuo atmosférico). El proceso consiste en dos trenes de precalentamiento y un calentamiento final en los hornos de procesos donde el crudo alcanza la temperatura necesaria para poder lograr la destilación dentro de la torre atmosférica T-1101. La unidad DRU cuenta con dos hornos atmosféricos (F-1101 A/B), cada uno de dos celdas con dos pases por cada una de ellas, es decir, un total de 8 pases entre los dos hornos de manera de distribuir el flujo y garantizar un calentamiento óptimo.

La carga total del fluido que pasa a través de los hornos, es distribuida en dos partes, una mitad pasa a través del horno atmosférico F-1101A y la otra parte pasa a través del horno atmosférico F-1101B, entrando dicho fluido por la parte superior del horno respectivo, donde se encuentra la zona de convección del horno, en la cual se aprovechan los gases de combustión para calentar el crudo, antes de que los mismos salgan por la chimenea. Posteriormente, a medida que el crudo desciende, este aprovecha el calor que se desprende en la zona de radiación, al pasar el flujo de DCO por el banco de tubos expuestos a la llama, donde el calor desprendido (el cual, es absorbido por el DCO) es mayor en esta zona. Los hornos atmosféricos F-1101 A/B están diseñados para llevar a cabo el proceso de combustión con gas de refinería o gas natural.

En condiciones de operación de diseño, el flujo que pasa a través de cada horno es de 80.000 barriles por día (bpd) y están diseñados para una carga total entre ambos de 156.000 bpd, sin embargo, actualmente los hornos se encuentran operando a la capacidad de turndown de la unidad, siendo este de 80.000 bpd (40.000 bpd por cada horno), y la temperatura requerida a la salida de los hornos actualmente está entre 650 a

660 °F, y aun cuando el flujo actual a través de los hornos es el mínimo, se ha observado limitaciones en el proceso de calentamiento, evidenciándose que en la sección de convección, el DCO no está ganando el calor que debería absorber en esta zona. Por otro lado, se ha observado distorsión en las llamas, y debido a la carencia y fallas de instrumentos, no se ha logrado medir si existe deficiencia o exceso de oxígeno, o alto consumo de gas, impactando así, estos diferentes factores, en la operación de los hornos.

En vista de la problemática antes planteada, se realizó una evaluación del proceso de combustión en los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad recuperadora de diluyente con la intención de estimar la eficiencia térmica de dichos hornos y así dar propuestas que permitan ajustar las variables o parámetros necesarios para mejorar la operación en los mismos.

Para ello se identificaron, en primer lugar, las variables operacionales que pueden perjudicar el proceso de calentamiento. En segundo lugar, se realizaron balances de masa y energía, para posteriormente, determinar la eficiencia térmica actual para compararlas con las de diseño. Finalmente, se propusieron mejoras para garantizar un proceso de combustión, en los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU, dentro del rango recomendado por el fabricante y la literatura, en el mejorador de crudo Petromonagas.

Evaluar el proceso de combustión de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU, del mejorador de crudo Petromonagas, es importante ya que de esta manera es posible determinar la efectividad y eficiencia de los mismos durante el calentamiento del flujo de crudo diluido, a fin de garantizar que las temperaturas de salida (COT) del DCO en cada horno atmosférico se encuentre operando a las condiciones requeridas de entrada a la torre de destilación atmosférica T-1101, y así garantizar una operación óptima.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el proceso de combustión en los hornos atmosféricos de la unidad recuperadora de diluyente de un mejorador de crudo extrapesado.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar las variables operacionales de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad recuperadora de diluyente.
2. Determinar la eficiencia térmica (diseño y actual) de los hornos atmosféricos F-1101 A/B.
3. Proponer mejoras que garanticen un proceso de combustión, en los hornos atmosféricos de la unidad recuperadora de diluyente, dentro de los rangos normales de operación.

1.3 Presentación de la empresa

El mejorador de crudo extrapesado Petromonagas ubicado en el complejo industrial, petroquímico y petrolero General José Antonio Anzoátegui, en la costa norte del estado Anzoátegui (figura 1.1), es una planta que se encarga de mejorar el crudo extrapesado, de 8 °API, extraído del bloque Carabobo de la faja petrolífera del Orinoco perteneciente al centro de operaciones de Petromonagas (COPEM), convirtiéndolo en un crudo comercializable de aproximadamente 16 °API. Su misión es procesar hidrocarburos de manera eficiente, cumpliendo con los compromisos adquiridos, en armonía con el ambiente. Para ello mantiene su visión de optimizar los recursos asignados, y llevar al mínimo el costo de inversión para obtener el máximo de beneficios que serán retribuidos en planes para la nación.

La empresa se constituyó como Asociación Estratégica el 28 de octubre de 1997 bajo el nombre de Operadora Cerro Negro (OCN), momento en el cual se contaba con la participación adicional de la Corporación Estadounidense Exxon-Mobil, cuya representación accionaria era del 41% hasta el 1° de mayo de 2007 cuando el Estado venezolano, por intermedio de PDVSA, asumió el control operativo de todas las instalaciones que son afectadas por la ley de nacionalización, estableciéndose la empresa Petromonagas con un capital mixto cuyos accionistas son: PDVSA, con 84% y British Petroleum (BP), con 16%.



Figura 1.1 Complejo industrial, petroquímico y petrolero Jose Antonio Anzoátegui. (Petromonagas, 2007)

El mejorador Petromonagas está compuesto por varias unidades de proceso, entre ellas se encuentran: unidad 11, denominada como unidad recuperadora de diluyente (DRU) en la cual se recupera la nafta diluyente y se produce la alimentación a la unidad 13 denominada como unidad de coquización retardada (DCU), la cual se basa en el craqueo de las moléculas pesadas que provienen del fondo atmosférico para sacarle provecho en la operación en planta, por ejemplo, las moléculas pesadas pueden ser convertidas en gas (utilizado como gas combustible), nafta (para el sistema de diluyente) y gasóleos (para mezcla de crudo sintético).

Por su parte la unidad 12, que tiene por nombre unidad de sistema de desalación (DSU) cumple con el objetivo de remover las sales presentes en el crudo diluido (DCO), a fin de disminuir los problemas potenciales de corrosión y taponamiento en los equipos por donde fluye el DCO. Por último, se cuenta con la unidad 14, siendo esta la unidad de gas de coque (CGP), la cual se encarga del tratamiento de todo el gas que se genera durante el proceso operativo en las unidades DRU y DCU. Cabe destacar que, el gas generado durante la operación en planta y que luego es tratado en la unidad CGP se convierte en gas de refinería, siendo utilizado en las mismas unidades que generan gas (DCU y DRU) como combustible para el proceso de combustión en los hornos que las conforman.

Cada una de estas unidades cumple con una función importante que permite la producción del crudo mejorado, además de la recuperación de la nafta diluyente y de los gases generados durante el proceso en planta, minimizando los costos operativos en el mejorador de crudo Petromonagas.

1.4 Proceso de mejoramiento del crudo extrapesado

El proceso de mejoramiento del crudo extrapesado de Petromonagas, representado en la figura 1.2, se inicia en la etapa de extracción realizando la inyección de nafta diluyente de 50 °API a la corriente del crudo proveniente de los pozos, con el fin de facilitar su transporte por oleoductos hasta la planta desaladora del COPEM donde se extrae parte de las sales, agua y gas asociado. Seguidamente, el crudo diluido es trasladado a la planta de mejoramiento en José. Aquí se vuelve a desalar y se lleva a un proceso de destilación atmosférica donde se retira el diluyente que es enviado nuevamente al COPEM. Una parte del residuo de esta destilación es procesada por la unidad de coquización retardada (DCU), mientras que la otra parte es mezclada con los líquidos que resultan del DCU. De esta manera se ajustan las propiedades fisicoquímicas del crudo mejorado de 16° API, dando cumplimiento a las exigencias de los mercados internacionales. Del proceso se obtienen, además subproductos como coque, azufre y gas de combustión, también comercializables.

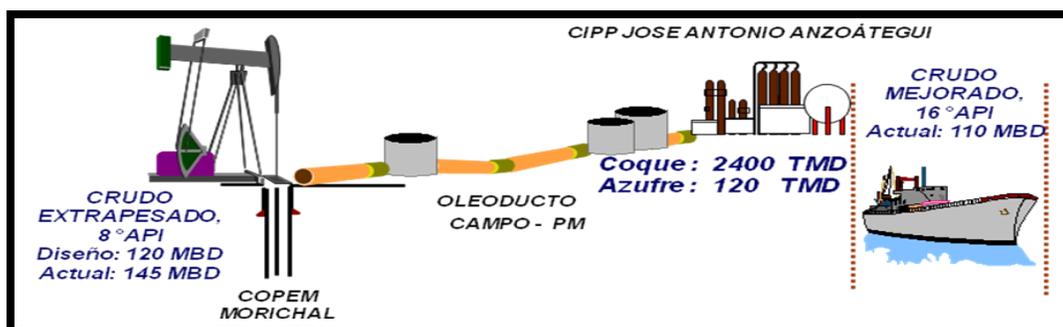


Figura 1.2 Proceso general de mejoramiento del crudo extrapesado en Petromonagas. (Petromonagas, 2007)

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Costa, Díaz, Biset y Bosani (2016), pusieron en marcha la práctica recomendada para hornos de proceso, desarrollada por las refinerías de YPF La Plata, ANCAP Uruguay, para contribuir en primer lugar, a determinar la eficiencia energética en el área del downstream (antes de la extracción), dado que esta es una variable crítica que debe ser optimizada a fin de reducir el consumo de combustibles; y en segundo lugar, para minimizar las emisiones de gases de combustión, lo que se traduce en menores gastos de operación. Para ello presentaron los indicadores clave para la optimización energética, enfocados en los parámetros de diseño y los objetivos de operación.

Adicional a ello, señalaron pruebas particulares que deben realizarse en los hornos de proceso, tales como el test para la determinación mínima de capacidad de O₂, determinación de entradas parásitas de aire con el horno en operación y fuera de servicio, procedimiento para la realización de test de humo y, finalmente, el test de largo de llamas, todo esto a fin de lograr una buena eficiencia energética en los hornos de procesos de crudo.

Vega (2014) llevó a cabo una optimización de los procesos de combustión del horno petrolero de la refinería de Iquitos-Petroperú, para mejorar su eficiencia, debido a que tenía un alto consumo de combustible. Para ello optó por hacer un análisis del proceso de combustión, que permitiera determinar el consumo de energía, sus pérdidas y su eficiencia, y con ello, se planteó propuestas de ahorro y de mejora en la eficiencia del horno. Para lograr lo mencionado, el autor, recolectó los datos e información necesaria para tabular y determinar el rendimiento del horno y su combustión, identificando sus principales problemas y proponiendo posibles soluciones para mejorar significativamente el proceso de calentamiento de crudo para la destilación.

Para conseguir el ahorro evaluó la eficiencia inicial del horno, que era de 74,6% en promedio, y 9.381,7 bpd, con un consumo de 94,5 bpd de Fuel Oil y 8,9 bpd de Fuel gas; a partir de ello, planteó elevar la eficiencia, significativamente, programando el mantenimiento rutinario y realizando, en paralelo, el análisis y la optimización del proceso de combustión. Además, evaluó el exceso de aire consiguiendo un punto óptimo entre 28 y 29% de exceso de aire. Con todos estos parámetros, adecuados al estudio realizado, logró elevar la eficiencia hasta 79,9% de eficiencia efectiva y procesar 9.526 bpd de petróleo crudo, haciendo uso de 93,6 bpd de Fuel Oil y 14 bpd de kerosene. Comparando con los consumos iniciales, se determinó que se consiguió un ahorro considerable en el consumo de combustible, lo que se traduce en mayores ganancias para la empresa.

Luna (2010), para atender a la disminución de la eficiencia energética presentada en los hornos de la planta topping-1 de la empresa ENAP Refinería Ancagua, llevo a cabo un proyecto en el cual realizó un modelo predictivo de la operación de dichos hornos, a fin de solucionar tal problemática. Para ello, estudió el comportamiento de los hornos con

lo que se obtuvo un registro de las variables operacionales más influyentes, así como las pérdidas energéticas mediante el funcionamiento del horno. Por otra parte, mediante un procedimiento de cálculo para obtener las propiedades termodinámicas del crudo, se realizaron balances de masa y energía que permitieron determinar el calor absorbido por el mismo.

Los balances de masa y energía se desarrollaron, también, para la corriente de proceso, la combustión y el vapor, a fin de determinar la eficiencia teórica del horno B-130 y mediante el uso de los métodos API 560 y el software HTRI, se verificaron los resultados obtenidos de calores y eficiencias determinados por los mismos (con el método Lobo-Evans), reafirmando que los resultados obtenidos son satisfactorios. Además, partiendo de los balances y en conjunto con las ecuaciones de transferencia de calor, se logró el desarrollo de una metodología de cálculo para predecir las variables principales del horno. Finalmente, realizó un análisis de sensibilidad considerando la eficiencia fija para el horno, donde se pudo ver que a mayor porcentaje de exceso de aire se necesita más combustible, lo que repercute en un aumento en el costo de producción, por lo que se debe cuidar el exceso de aire y así como evitar la formación de monóxido de carbono (CO) y no aumentar los costos del producto.

Los proyectos citados sirvieron de guía y fuente de información para conocer cuáles han sido los avances logrados, con el transcurrir del tiempo, en el estudio, evaluación y/o mejora de los procesos de combustión en los hornos de procesos, utilizados en la industria de refinación y mejoramiento de crudo. Además, fue posible comparar, con los resultados obtenidos, en los mismos, si el proceso llevado a cabo en otras empresas arroja un resultado similar a los que se logren en este proyecto.

2.2 Hornos atmosféricos de crudo

El horno atmosférico es un horno de calentamiento que es parte del sistema de destilación de crudo, donde se obtienen diferentes productos destilados, como gasolina, diesel y queroseno, mediante su calentamiento y fraccionamiento del crudo a presión normal. La estructura del horno de calentamiento atmosférico es básicamente similar a la del horno de calentamiento general, que se dividen en dos tipos: un horno cilíndrico y un horno de caja. Cada horno está compuesto por una cámara de radiación y una cámara de convección. (CCEWOOL Insulationfiber, 2021).

2.3 Hornos de procesos (convencional)

Es un intercambiador de calor en el que el fluido de procesos fluye dentro de tubos, y se calienta por radiación procedente de una llama de combustión y por convección, desde los gases calientes de las mismas. Son hornos que proveen calor, el cual es usado en los equipos agua abajo del horno. Algunos ejemplos (típicos) de estos hornos son los usados para calentar el crudo antes de pasar a una columna de destilación, precalentadores de reactores (hidrotratamiento y termoreactores) y rehervidores. Los sistemas de calentamiento indirecto, tales como sistemas de aceite caliente o sistemas “dowtherm”, también usan hornos de procesos. (PDVSA, 1995).

2.4 Secciones del horno

El patrón usual de flujo del fluido en el proceso es en contracorriente con el de los gases de combustión, esto significa que el fluido pasa primero a través de la sección de convección y luego a través de la sección de radiación del horno, mientras que los gases de combustión van en sentido opuesto, permitiendo así una mayor eficiencia, (es decir, la temperatura del gas en la chimenea es más baja) que la que se obtendría si el flujo fuera en paralelo. (PDVSA, 1995)

2.4.1 Sección de convección

Los tubos están fuera del alcance de la llama, recibiendo calor de los gases de combustión (de escape caliente), principalmente por convección. Después que todo el calor ha sido transferido al fluido de proceso (dentro del banco de tubos), el gas de combustión deja el horno y pasa a través de una chimenea para salir a la atmósfera. (PDVSA, 1995).

2.4.2 Sección de radiación

Los tubos están en presencia de la llama, la cual transfiere calor al fluido dentro de los tubos por radiación y por la alta temperatura de los gases de combustión. Los gases de combustión a medida que transfieren calor se enfrían, y, por lo tanto, la transferencia de calor por radiación progresivamente requiere de más área en los tubos, lo cual llega a ser poco atractivo desde el punto de vista económico. Por esta razón, la transición a la sección de convección es hecha mientras el gas de combustión aún está relativamente caliente (PDVSA, 1995).

2.4.3 Sección de combustión

Se refiere a la estructura que circunda los serpentines radianes y dentro de la cual se localiza los quemadores (PDVSA, 1995).

2.5 Partes de un horno de procesos

- Caja

Consiste en un conjunto de cuatro paredes, un suelo y un techo generalmente de acero con aislamiento interior de ladrillos refractarios. En la parte superior de la caja se encuentra la zona de convección y seguidamente se monta la chimenea. A lo largo de las paredes se ubican los tubos de la sección de radiación. La llama se genera a través de los quemadores ubicados debajo de la zona de radiación (Operador petrolero, 2015).

- Arco del horno

Parte superior de la zona, radiante donde empieza el escudo. En este punto los gases calientes comienzan a acelerarse hacia la zona de convección (Macadán y Brito, 2018).

- Quemador

Es el equipo encargado de introducir una cantidad de combustible y aire de forma simultánea al horno, a velocidad, turbulencia y concentración deseada, a fin de establecer y mantener una mezcla, ignición y combustión apropiada para lograr los resultados deseados de intercambio de calor (API, 2007).

- **Carcasa**

Es la envolvente metálica del horno, usualmente de acero al carbono. La carcasa se protege de los gases calientes internos por aislamiento térmico. La carcasa debe ser hermética de manera de evitar infiltraciones de aire parásito hacia el interior del horno. (Macadán y Brito, 2018).

- **Celda**

Es una parte de la sección de radiación separada de otras celdas por tubos o por una pared con refractario. También son llamadas “zonas o secciones”. (PDVSA, 1995).

- **Chimenea**

Es un conducto cilíndrico de acero, revestido con concreto o ladrillos el cual traslada el gas de escape a la atmósfera y provee el tiro necesario para hacer fluir, adecuadamente, los gases de combustión a través del horno y permitir la disposición de los mismos. (PDVSA, 1995).

- **Paso**

Es el serpentín que transporta el fluido del proceso desde la entrada hasta la salida del horno. El fluido total del proceso puede ser transportado a través del horno por uno o más serpentines. La carga total del fluido es la suma del caudal por cada paso. (PDVSA, 1995).

- **Dámper**

Compuertas que permiten regular el caudal de aire que ingresa a la cámara de combustión y de los gases de combustión que egresan por la chimenea. Su función principal es regular el tiro dentro del horno. (PDVSA, 1995).

2.6 Variables y parámetros operacionales de los hornos de procesos

2.6.1 Carga total (caudal total de fluido de procesos)

El caudal total circulado y las temperaturas de entrada y salida expresan cuál es el requerimiento térmico puntual que demanda el horno. En caso que el equipo posea más de un paso y no tenga medición individual, se tomará la carga total, con la precaución de observar que la distribución sea uniforme. (Costa et al., 2016).

2.6.2 Temperatura de entrada y salida de la carga total

Las temperaturas de entrada y salida de la corriente que es calentada en el horno determinan la carga térmica del mismo. Ambas temperaturas, de entrada y salida de la carga deben tener registro continuo para saber si el horno está operando de acuerdo a los parámetros de diseño. En caso que el equipo posea más de un paso, se tomará la temperatura de un punto único de salida total, con la precaución de observar que la distribución sea uniforme. Un valor bajo de la temperatura de salida (COT) en un horno de crudo causará una vaporización insuficiente en la zona de vaporización instantánea, y aumentará la cantidad de producto liviano en el residuo atmosférico. Por otra parte, un alto valor de COT, causa alteraciones en la calidad de los productos subsiguientes de la torre de destilación, contaminándolos con producto pesado, además que tiene como consecuencia una coquización prematura en los tubos del horno. (Macadán y Brito, 2018).

2.6.3 Presión de entrada y salida de carga

La caída de presión en cada paso debe ser monitoreada en conjunto con los caudales parciales circulados y las temperaturas de salida, para detectar cualquier bloqueo de paso que a la larga dañaría los tubos. Es importante notar si alguno de ellos exhibe mayor pérdida de carga, ya que podría estar obstruido parcialmente por carbón o excesiva vaporización (Costa et al., 2016).

2.6.4 Presión de combustible en el quemador

La presión con la que llega el combustible (gaseoso o líquido) al quemador, es la variable que permite asegurar una mezcla entre el combustible y el aire, para realizar y mantener la estabilidad de la llama y asegurar, así, una correcta combustión en el quemador. Las variaciones en la presión del combustible se pueden producir por problemas de operación o suministro del combustible, o por un cambio importante en la composición de este. Un aumento de la presión del combustible causa un aumento en el flujo del combustible y, por tanto, un aumento en el flujo calórico, produciendo así daños tanto en los quemadores como en los componentes de los hornos. Un aumento significativo, puede producir el apagado de la llama debido a una mezcla insuficiente aire/combustible. Por el contrario, una disminución de la presión del combustible, se traduce a una disminución de su flujo, lo que puede causar el apagado de la llama en el quemador. (Luna, 2010).

2.6.5 Temperatura de piel de tubos

Es la temperatura de la cara externa de los tubos expuesta a las llamas y los gases de combustión, en las zonas de radiación y convección respectivamente. (Macadán y Brito, 2018).

2.6.6 Exceso de oxígeno (O₂) en la combustión

Se debe controlar el O₂ de la combustión para maximizar la eficiencia térmica. Para realizar el muestreo óptimo se recomienda tomar, como punto de muestra, la salida de gases de la zona radiante, ya que es posible que en la zona de convección ingresen corrientes de “aire parásito” (que no participan de la combustión) lo que puede llevar a un análisis erróneo de exceso de O₂, concluyendo en un falso exceso de O₂. (Costa et al., 2016).

2.6.7 Patrón de llamas

Durante las inspecciones realizadas a los hornos de proceso, uno de los indicativos importante a visualizar es el patrón de llama dentro del mismo, observándose también los siguientes parámetros (Costa et al., 2016):

- Altura de la llama
- Ancho de la llama
- Inclinación
- Estabilidad
- Distancia entre llamas y tubos

- Uniformidad de llama entre quemadores

2.6.8 Dámper de chimenea

Se debe revisar el porcentaje de apertura del dámper del horno de proceso. Además, se debe informar al personal sobre el funcionamiento del dámper y se asentará en observaciones las desviaciones o variaciones que presente el mismo. Con el tiempo suelen quedar bloqueados o averiados (por falta de mantenimiento), lo cual llevará a un mal funcionamiento general del horno. (Costa et al., 2016).

2.6.9 Temperatura de gases de combustión

Indica el contenido entálpico de los gases de combustión del horno. Es una variable crítica para medir la eficiencia del equipo dado que representa una gran parte del calor que se pierde. Cuanto mayor sea la misma, menor será la eficiencia y viceversa. Conviene compararla regularmente con el valor de diseño para investigar los motivos de un eventual incremento en el consumo de combustible, así como para prever algunos problemas que podrían ocurrir en el equipo. De forma general, el monitoreo de este parámetro proporciona información útil para mantener o incrementar la eficiencia operativa y asegurar, así, una buena operación del equipo. (Costa et al., 2016).

2.6.10 Presión en el hogar – tiraje en tope de la sección radiante

Es la presión negativa (vacío) que se genera dentro del horno. Este vacío permite el ingreso de aire al hogar y evita que los gases calientes escapen por otro lado que no sea la chimenea. Normalmente se expresa en milímetros (mm) o pulgadas de columna de agua.

El tiraje mínimo admisible en el punto de mínimo tiraje (tope de zona radiante), debe ser $-0,08 \text{ inH}_2\text{O}$ (valor de diseño recomendado por la norma API 560). Igualmente, el valor de referencia debe ser el indicado en la hoja de datos del horno y definido por el diseñador/fabricante. El tiraje en el tope de zona radiante y el porcentaje de O_2 en la zona de combustión son los principales parámetros para el control de la operación de un horno y por tanto merecen medición y registro continuos. El tiraje debe medirse en la zona de mínimo tiraje, donde tiende a ser cero y antes del punto donde el horno pudiera presurizarse. (Costa et al., 2016).

2.6.11 Flujo de gas combustible consumido

El caudal de combustible consumido por el horno es un parámetro de control que debe registrarse continuamente ya que, junto con el poder calorífico (relacionado con la composición), determina el calor liberado en el equipo y la eficiencia térmica del mismo, considerando el duty (efecto útil) y las pérdidas de calor a través de los gases de combustión y la estructura del horno. El monitoreo del consumo de combustible le indica al operador qué cambios están ocurriendo en el equipo. (Costa et al., 2016).

2.7 Porcentaje de aire en exceso

El aire (u oxígeno) en exceso es la cantidad de aire que se encuentra por encima de la cantidad requerida, de la misma, para lograr una combustión completa. (API, 2007)

$$\% \text{ aire en exceso} = \frac{\text{moles de aire alimentado} - \text{moles de aire teórico}}{\text{moles de aire teórico}} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En los sistemas reales de combustión (calderas, hornos de proceso, etc.) la mezcla entre combustible y comburente no es uniforme. Es decir que, debido a los grandes volúmenes de gases manejados por estos equipos, y a pesar de la turbulencia producida por dispositivos diseñados para tal fin, no siempre se consigue una mezcla ideal. Entonces, para compensar esta imperfección y garantizar la combustión completa del combustible, en la práctica se emplea una cantidad de aire en exceso con relación a la calculada estequiométricamente. (Jiménez G y Jiménez M, comunicación personal, 2008).

2.8 Entonación

Es la optimización del proceso de combustión, es decir, una mejora de las variables y parámetros operacionales (desviadas), con el fin de obtener mayor eficiencia térmica, manteniendo las mismas en especificación. (Jiménez y Jiménez, 2008). Por otra parte, Jiménez (s.f), en su artículo referido a la entonación continua de hornos de procesos, dice que la entonación se logra a través del control del aire, el tiro y la disminución de las infiltraciones, si las hubiera.

2.9 Eficiencia térmica de un horno

Es la relación entre el calor total absorbido y el calor total entregado, derivado de la combustión del combustible incluyendo el calor sensible del aire, del combustible y del medio atomizador (ecuación 2.2). Un incremento en la eficiencia térmica equivale a ahorro de combustible y menores emisiones de CO₂. (American Petroleum Institute [API], 2007).

$$\eta = \frac{Q_{absproc}}{Q_{totalgen}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

El calor absorbido por el proceso se determina con la ecuación 2.4, mientras que el calor generado se calcula con la ecuación 2.3.

$$Q_{totalgen} = \frac{GN_{alim} \times PCI_{GN}}{1.000.000} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

$Q_{total\ gen}$: calor generado por la combustión del gas combustible (Btu/h)

GN_{alim} : flujo de gas de combustible en millones de pies cúbicos estándar por hora (MMscfh)

PCI_{GN} : poder calorífico inferior (Btu/ft³)

2.10 Poder calorífico inferior (PIC)

Es el calor de combustión teórico del combustible, cuando no se toma en cuenta el calor de condensación del agua en los gases de combustión. También es llamado poder calorífico neto y se expresa en MJ/kg (BTU/h). (PDVSA, 1995).

2.11 Relación aire-combustible

La relación aire-combustible debe monitorearse frecuentemente para evitar que los quemadores operen de forma no adecuada y afecten la combustión. Otra manera de monitorear esta relación es midiendo los gases de combustión. (Nutec Bickley, 2019).

2.12 Balance de energía asociado al proceso de combustión

El balance de energía del proceso de combustión tiene por objetivo la determinación del calor de reacción. La reacción de combustión es exotérmica, es decir, desprende calor. Este calor desprendido es el calor de reacción que depende tanto de las sustancias reaccionantes, combustibles y aire u oxígeno, así como de sus estados. El balance de energía es una excelente herramienta de diagnóstico que permite cuantificar la energía perdida y aprovechada en cada sección del horno.

De forma específica, el balance de energía asociado a los hornos de procesos (en estudio) del mejorador de crudo Petromonagas es:

$$Q_{ABS} = Q_G - Q_{RAD} - Q_{CH} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

dónde:

Q_{ABS} : calor absorbido por el proceso.

Q_G : calor total generado.

Q_{RAD} : calor perdido por radiación.

Q_{CH} : calor perdido por chimenea.

El calor perdido por radiación se calcula con la ecuación 2.5, mientras que las pérdidas por la chimenea con la ecuación 2.6.

$$Perdidas_{rad} = 0,015 \times Q_{totalgen} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$Pérdidas_{chimenea} = \frac{\sum(Q_{CO_2} + Q_{H_2O} + Q_{N_2} + Q_{aire})}{1.000.000} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

dónde:

Q_{CO_2} : calor perdido por el dióxido de carbono (CO_2).

Q_{H_2O} : calor perdido por el vapor de agua (H_2O).

Q_{N_2} : calor perdido por el nitrógeno (N_2).

Q_{aire} : calor perdido por el aire.

2.13 Balance de masa asociado al proceso de combustión

El balance de materia de un horno es una contabilidad exacta de todos los materiales que entran, salen, acumulan o se agotan en el curso de un intervalo de tiempo de operación dada. Un balance de materia es, de cierto modo, una expresión de la ley de conservación de la masa teniendo en cuenta aquellos términos. Los hornos que trabajan en estado estacionario, donde no existe acumulación de material y no se consideran los términos de generación y consumo, toman la forma de un balance de ingreso-salida, es decir:

Ingreso de masa/moles al horno = Salida de masa/moles del horno (Ec. 2.7)

En tal sentido, no interesan los detalles internos del horno, sino el paso de materiales a través de las fronteras de los mismos y el cambio global de materiales en dicho horno.

2.14 Simulador de procesos PRO/II versión 2023

El simulador Aveva Pro/II mejora el diseño de procesos, el análisis operativo y realiza estudios de ingeniería para optimizar el rendimiento de las plantas. Es diseñado para realizar cálculos rigurosos de calor y balance de materiales para una amplia gama de procesos químicos, este simulador ofrece una gran variedad de modelos termodinámicos a prácticamente todas las industrias. (Aveva, 2021-2025)

Aveva Pro/II, ofrece, además, entre sus ventajas que permite pronosticar a precisión el comportamiento de las plantas en todas las condiciones de funcionamiento y maximizar la eficiencia de la ingeniería al aumentar el rendimiento de la planta y la rentabilidad global. En resumen, el simulador de Aveva Pro/II es un simulador en estado estacionario que optimiza el rendimiento de la planta. (Aveva, 2021-2025)

2.15 Eficiencia térmica de la reacción de combustión

Es una medida de cuanto se aproximan las condiciones reales a la reacción de combustión completa con H₂O y CO₂ como únicos productos de la combustión. En un buen diseño, se requieren eficiencias de mínimo 98%.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 Variables operacionales que influyen en el proceso de combustión dentro de los hornos atmosféricos F-1101 A/B

En esta sección se estudiaron las diferentes variables operacionales de los hornos atmosféricos F-1101 A/B. La operación actual del Mejorador de Crudo Petromonagas se basa en el procesamiento de un crudo extra pesado (XP) diluido con nafta (DCO), para que una vez recuperada el diluyente, el crudo XP se mezcla con otras corrientes para la producción del denominado Merey 16; lo anterior llevó a un cambio en su filosofía operacional que requiere operar los hornos con una temperatura de salida (COT) entre 650 a 690 °F, el cual va a depender de la calidad del crudo de alimentación y a su vez de la inyección de vapor a la torre atmosférica T-1101, variando con ellos el COT para alcanzar la temperatura deseada en la torre atmosférica.

A continuación, se describen las diferentes variables operacionales de los hornos atmosféricos F-1101 A/B que fueron monitoreadas y evaluadas constantemente para garantizar el correcto funcionamiento de los mismos. El seguimiento realizado a cada variable de los datos extraídos, se hizo a través del programa PI. Process Book V.2.3 y de la herramienta Microsoft Excel, durante los meses de septiembre y octubre del año 2023, el cual fue el tiempo de estudio para cada variable. Para tal seguimiento en los programas o herramientas mencionados se necesitó conocer de los tags (etiquetas) de cada instrumento que aportó información de cada variable descrita, es por ello que en las tablas mostradas a continuación se almacenan los mismos.

Tabla 3.1 Tags de los instrumentos de medición de las variables evaluadas en el horno atmosférico F-1101A

Variable	F-1101A			
	Celda 1		Celda 2	
	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
Temperatura de salida del DCO (COT)	TIC_11044.P V	TIC_11044.P V	TIC_11057.P V	TIC_11057.P V
Temperatura de entrada del DCO (convección)	TI_11022.PV	TI_11022.PV	TI_11022.PV	TI_11022.PV
Temperatura de metal de tubo (TMT) entrada	TI_11040.PV	TI_11047.PV	TI_11053.PV	TI_11060.PV
Temperatura de metal de tubo (TMT) medio	TI_11041.PV	TI_11048.PV	TI_11054.PV	TI_11061.PV
Temperatura de metal de tubo (TMT) salida	TI_11042.PV	TI_11049.PV	TI_11055.PV	TI_11062.PV
Presión de brea (DCO)	PI_11003.PV	PI_11004.PV	PI_11005.PV	PI_11006.PV
Presión de gas combustible	PIC_11032.P V	No aplica	PIC_11034.P V	No aplica
Flujo de entrada del DCO	FIC_11016.P V	FIC_11018.P V	FIC_11020.P V	FIC_11022.P V
Flujo de gas combustible	FIC_11056.P V	No aplica	FIC_11057.P V	No aplica
Temperatura de gases de combustión	TI_11132.PV			
Tiro del horno	PIC_11079.PV			

Tabla 3.2 Tags de los instrumentos de medición de las variables evaluadas en el horno atmosférico F-1101B

Variable	F-1101B			
	Celda 3		Celda 4	
	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
Temperatura de salida del DCO (COT)	TIC_11070.P V	TIC_11070.P V	TIC_11083.P V	TIC_11083.P V
Temperatura de entrada del DCO (convección)	TI_11065.PV	TI_11072.PV	TI_11078.PV	TI_11085.PV
Temperatura de metal de tubo (TMT) entrada	TI_11066.PV	TI_11073.PV	TI_11079.PV	TI_11086.PV
Temperatura de metal de tubo (TMT) medio	TI_11067.PV	TI_11074.PV	TI_11080.PV	TI_11087.PV
Temperatura de metal de tubo (TMT) salida	TI_11068.PV	TI_11075.PV	TI_11081.PV	TI_11088.PV
Presión de brea (DCO)	PI_11007.PV	PI_11008.PV	PI_11009.PV	PI_11010.PV
Presión de gas combustible	PIC_11036.P V	No aplica	PIC_11038.P V	No aplica
Flujo de entrada del DCO	FIC_11216.P V	FIC_11218.P V	FIC_11220.P V	FIC_11222.P V
Flujo de gas combustible	FIC_11058.P V	No aplica	FIC_11059.P V	No aplica
Temperatura de gases de combustión	TI_11167.PV			
Tiro del horno	PIC_11108.PV			

3.1.1 Temperatura de salida (COT)

La temperatura de salida (COT) de los hornos atmosféricos F-1101 A/B es una variable importante a medir, ya que permite determinar si el crudo alimentado está alcanzando la temperatura requerida, antes de ingresar a la torre de destilación T-1101. La temperatura de salida de los hornos atmosféricos de la unidad DRU ha variado los últimos meses por lo que se llevó a cabo un monitoreo de su comportamiento, bajo el modo de operación actual de la planta Petromonagas, denominada “modo mezcla”, durante el mes de octubre de 2023, siendo este el tiempo de estudio, considerado, para la evaluación de esta variable.

Las COT’s reportadas, correspondientes a cada pase de los hornos atmosféricos, se encuentran en la tabla A.1, ubicada en la sección A de los anexos. A partir de los datos obtenidos, se graficó la tendencia de la temperatura de salida de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, y las mismas se encuentran en la figura 4.1 (ubicada en el capítulo 4). Con estas gráficas, se pudo observar, analizar y comparar el comportamiento (actual vs. diseño) presentado por la COT durante el mes en estudio, obteniéndose que la misma se encontraba en un valor promedio de 670°F en cada horno atmosférico.

3.1.2 Temperatura de gases de combustión

La temperatura de los gases de combustión, llamada también temperatura de chimenea, se refiere a la temperatura de salida, por la zona de convección, de los gases producidos por la combustión. Su importancia radica en el hecho de que una baja temperatura de gases de combustión puede traducirse ya sea, en una deficiencia del proceso de combustión o en un exceso de aire dentro de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, que enfrían los gases de combustión, disminuyendo la capacidad de calentamiento del crudo.

3.1.3 Temperatura de entrada (zona de convección)

La carga de crudo, antes de entrar a los hornos atmosféricos F-1101 A/B, pasa por dos trenes de precalentamiento, en los cuales gana calor hasta alcanzar una temperatura de 498 °F, por diseño. Resulta importante cumplir con tal requerimiento, ya que una baja temperatura de entrada del crudo a los mencionados hornos, implica un incremento en el consumo de gas (necesario para llevar a cabo el proceso de combustión).

3.1.4 Temperatura de metal de tubo (TMT)

La temperatura de piel de tubos hace referencia a la temperatura del metal exterior de los tubos que conforman el haz tubular de cada horno atmosférico F-1101 A/B, por donde fluye el crudo, resultando importante monitorear esta variable, puesto que los tubos transfieren parte del calor (absorbido por las llamas y gases de combustión, en las zonas de radiación y convección, respectivamente) al DCO que, como se mencionó, pasa a través de ellos.

3.1.5 Presión de brea

La presión que genera el fluido a través de los pases de los hornos atmosféricos F-1101A/B, denominada como presión de brea, es un parámetro muy importante, y que debe ser monitoreado eventualmente, para evitar la coquización dentro de los tubos del horno, así como una vaporización súbita.

3.1.6 Presión de gas combustible

El gas combustible, que para el estudio es el gas natural, tiene una presión establecida por diseño de 15 psig, la cual debe ser medida en la línea por donde fluye el gas natural, antes ser distribuido (uniformemente) a los quemadores de cada horno atmosférico (F-1101 A/B), para determinar si el valor medido se encuentra dentro del requerido por diseño. La importancia de esta variable radica en que la presión del combustible es un indicativo de que tan alta o baja se encuentra, la misma, de acuerdo a la cantidad de quemadores en servicio, en cada horno atmosférico de la unidad DRU.

Para su evaluación, al igual que en todas las variables, se graficó su comportamiento y estas gráficas se encuentran en las figuras 4.8 y 4.9, para cada horno atmosférico respectivamente.

3.1.7 Tiro del horno

El tiro del horno se considera como una de las variables operacionales que deben ser evaluadas, ya que permite garantizar la combustión óptima en los hornos atmosféricos F-1101 A/B, por ello se hizo un registro del comportamiento de este parámetro para los meses de septiembre y octubre en cada horno. Estos valores se encuentran almacenados en los anexos A.4 y B.4, para dichos hornos, respectivamente. Con el seguimiento de esta variable, se pudo observar gráficamente el comportamiento que presentaba el tiro del dâmpner durante septiembre y octubre.

3.1.8 Flujo de entrada de crudo diluido (DCO)

La carga de DCO que entra a los hornos atmosféricos F-1101 A/B debe ser lo más equitativa posible entre ambos y pasar la misma cantidad de flujo por cada celda de los mismos, a fin de obtener un calentamiento uniforme del crudo. Es por ello que se monitoreó, identificó y graficó dicha variable, durante un periodo de tiempo que comprende los meses de septiembre y octubre de 2023, tal como se presenta en las gráficas de las figuras 4.12 y 4.13, mostradas más adelante. La carga de flujo que debe pasar por cada celda de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, por diseño, y en base a las condiciones de operación actual de la planta (es decir, capacidad mínima), es de 20 Mbpd.

3.1.9 Flujo de gas combustible

Los hornos atmosféricos F-1101 A/B son diseñados para trabajar, principalmente, con gas de refinería como gas combustible, sin embargo, puede trabajar adecuadamente con gas natural. Actualmente, el proceso de combustión se lleva a cabo utilizando este último como gas combustible debido a la filosofía operacional actual de la planta del mejorador de crudo Petromonagas. Esta variable es medida en los primeros pases de cada celda de los F-1101 A/B (es decir, celdas 1 y 2 y celdas 3 y 4, respectivamente) ya que se trata de una línea, por la cual fluye el gas combustible, que luego se ramifica a los demás pases que conforma cada horno atmosférico.

Por tal razón, se evaluó y graficó el comportamiento del flujo de gas natural consumido en los pases de cada celda de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, durante el tiempo de estudio establecido para cada variable (y que ha sido detallado al principio de este objetivo), a fin de compararse con el flujo de gas natural y gas de refinería establecidos por diseño y así determinar si el proceso de combustión se está llevando a cabo adecuadamente.

3.2 Determinación de la eficiencia térmica (diseño y actual) de los hornos atmosféricos F-1101 A/B

Para llevar a cabo la determinación de la eficiencia térmica de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas, primeramente, se elaboró un modelo de simulación del caso diseño, de los mencionados hornos, utilizando el simulador de procesos PRO/II versión 2023, siendo este suficientemente adecuado a los parámetros con los que se contaba para el estudio. Cabe destacar que ambos hornos atmosféricos son idénticos y es por ello que solo se simuló uno de los dos, es decir, la caracterización dada en la simulación se basó en los datos de un horno atmosférico (F-1101A) y los resultados obtenidos aplicaron para ambos.

Lo primero fue realizar el diagrama de flujos de proceso, con todo lo anterior, y luego se procedió a ingresar en el simulador los datos necesarios y correspondientes a cada corriente y equipo, extraídos de la hoja de datos del fabricante (data sheets). Posteriormente, se corrió la simulación para validar si los resultados obtenidos coincidían con los reportados en su hoja de datos y por los documentos de los hornos atmosféricos F-1101 A/B que se encontraban en el mejorador de crudo Petromonagas.

Luego de validado el modelo de simulación para el caso diseño, se utilizó el mismo pero ahora con los datos actuales de operación a fin de determinar la eficiencia térmica de

los hornos atmosféricos a condición actual y así comparar que tanto difiere esta (en la actualidad y a la condición del turndown) de la eficiencia establecida por diseño, para con ello, poder dar propuestas de mejora en el proceso de combustión de los hornos atmosféricos pertenecientes a la unidad DRU.

Es importante resaltar, también, que los resultados que se obtuvieron para el caso de operación actual se validaron con los resultados arrojados por una hoja de cálculos (de balance de masa y energía) de Excel, utilizada en el mejorador de crudo Petromonagas, la cual diariamente registra el comportamiento de las principales variables operacionales que afectan el proceso de combustión en los hornos atmosféricos, así como la eficiencia térmica de los mismos, todo esto basándose en la norma API 560 y en los datos descargados del programa PI. Process Book V.2.3. El día seleccionado para tal comparación fue el 13 de noviembre de 2023, ya que fue uno de los días donde la planta se encontraba operando dentro de rango o especificación. En los anexos se muestra esta hoja de cálculos y los resultados más importantes de ella para la fecha mencionada.

La elaboración del modelo de simulación se llevó a cabo siguiendo un procedimiento que permitiera la convergencia del modelo. En la figura 3.1 se describe, brevemente, el procedimiento seguido para la determinación de la eficiencia térmica, en los mencionados hornos atmosféricos, a través del simulador PRO/II versión 2023.

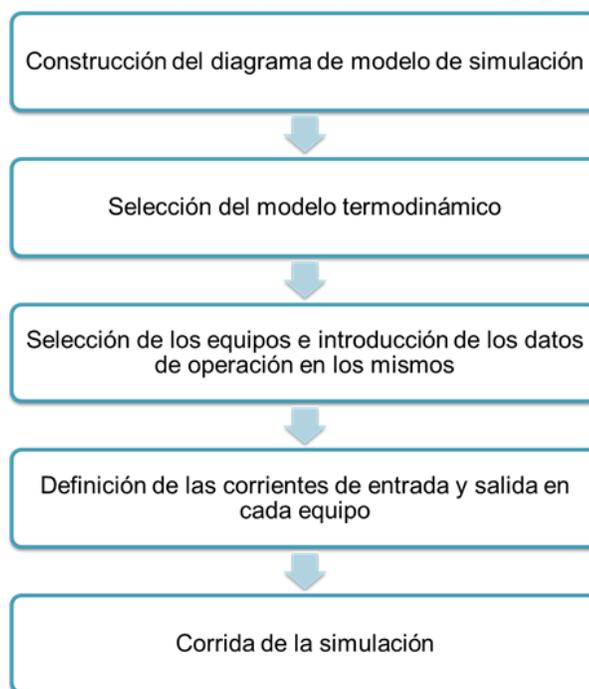


Figura 3.1 Diagrama del procedimiento seguido, en el simulador PRO/II

3.2.1 Construcción del diagrama del modelo de simulación

Para esta etapa del procedimiento, se llevó a cabo primeramente una revisión, lectura e interpretación de los diagramas de flujo de procesos que se encuentran en las instalaciones del mejorador de crudo Petromonagas (y que se pueden observar en los

anexos C), en el cual se detallaron las secciones que conforman cada horno atmosférico, así como los flujos de entrada y salida de cada sección de los mismos.

Cabe destacar que, para fines de la simulación, se utilizaron como representación de cada zona del horno atmosférico, el intercambiador de calor simple ofrecido por PRO/II a fin de obtener el calor absorbido (duty) por el crudo diluido que fluye desde la zona de convección hasta salir del horno por la zona de radiación. De esta forma, se evidenciaron también algunas variables operacionales por zonas como lo son la temperatura del fluido a la salida de cada sección del horno, hasta llegar a la temperatura de salida del crudo de cada horno, es decir, la COT.

Al diagrama realizado en el simulador, se le anexó, además, un valor agregado (valga la redundancia) que permitió obtener algunos resultados que fueron necesarios e importantes para lograr, no solo la convergencia del modelo, sino también el cálculo del flujo de aire estequiométrico, para luego con el porcentaje de oxígeno manejado en los hornos atmosféricos, especificarla como variable operacional. La figura 3.2 muestra el diagrama de procesos realizado, como modelo de simulación, para el proceso de combustión en los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU, y se evidencian los equipos seleccionados dentro del simulador para lograr tal diagrama.

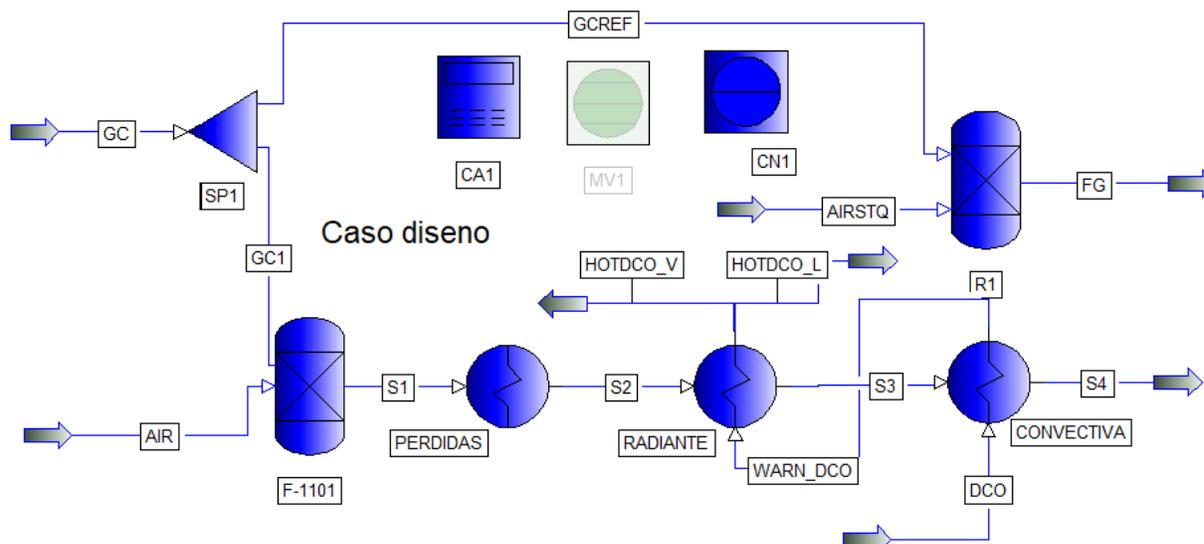


Figura 3.2 Diagrama de flujo de proceso realizado para la simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para el caso diseño

3.2.2 Selección del paquete termodinámico

El simulador de procesos PRO/II ofrece una serie de paquetes termodinámicos para los cálculos de la simulación; se seleccionó Grayson-Streed tal como muestra la figura 3.3.

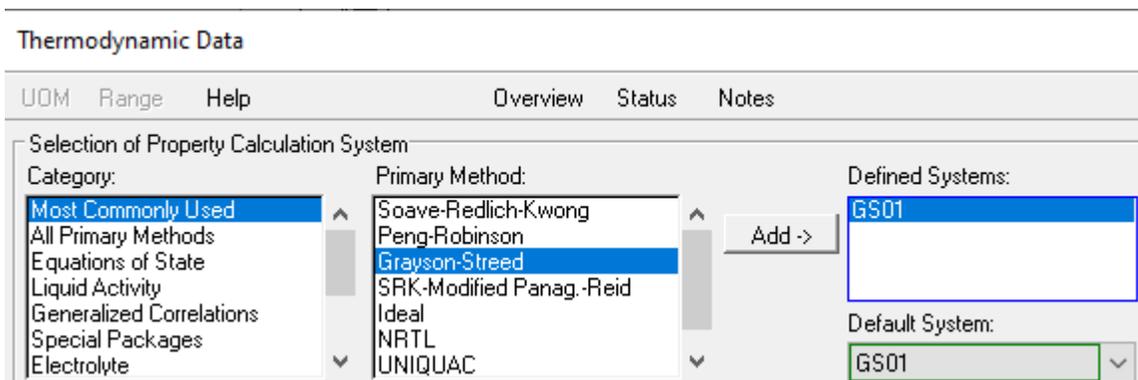


Figura 3.3 Selección del paquete termodinámico en la simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para los casos de operación de diseño y actual

Según la guía de ayuda de Aveva Pro/II 2023, el paquete de Grayson-Streed se recomienda para cortes pesados obtenidos en columnas de refinerías tales como torres de crudo, vacío, fraccionadores, FCC y columnas del "coker".

3.2.3 Selección de los equipos y accesorios utilizados

El simulador PRO/II ofrece distintas herramientas para la determinación de la eficiencia térmica en equipos calentadores como los hornos de procesos, sin embargo, se optó por realizar el esquema de simulación basándose en las secciones que conforman a los hornos atmosféricos de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas, a fin de obtener algunos parámetros de forma explícita a la salida y/o entrada de cada una, tal como se muestra en la figura 3.4.

Para la simulación por secciones, de los hornos atmosféricos de F-1101 A/B, se utilizaron los equipos, mencionados, identificados y descritos a continuación, y señalados en la figura 3.4:

- Intercambiador representativo de la zona de convección
- Intercambiador representativo de la zona radiante
- Intercambiador denominado pérdidas
- Reactor de conversión denominado F-1101
- Reactor de conversión denominado R1
- Separador SP1

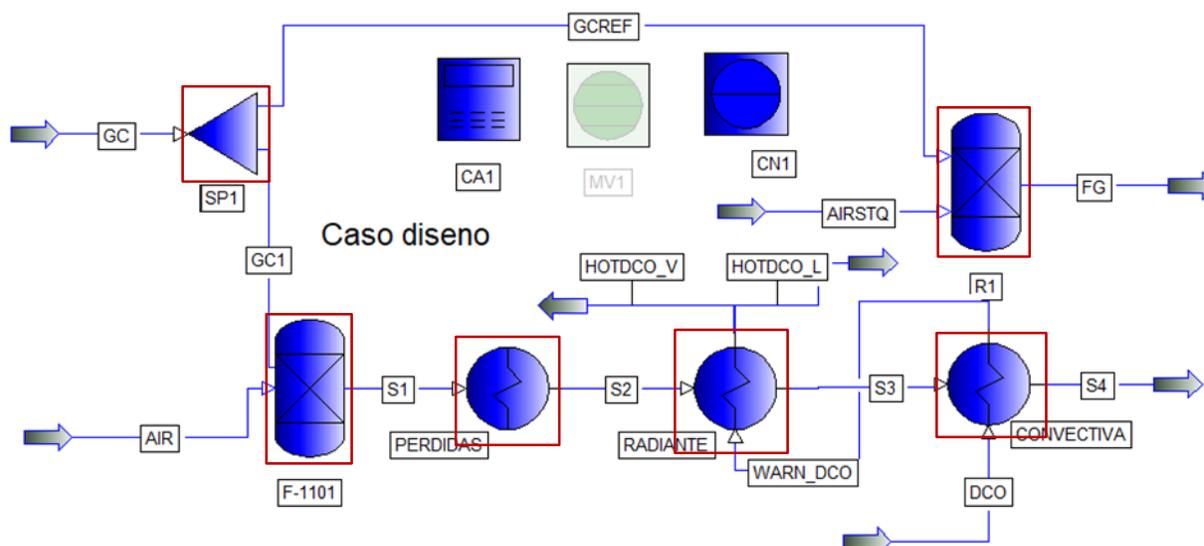


Figura 3.4 Equipos seleccionados, dentro de PRO/II para el modelo de simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para el caso diseño

3.2.3.1 Intercambiador representativo de la zona de convección

La zona de convección en los hornos atmosféricos F-1101 A/B es la sección por la cual, como se ha mencionado anteriormente, entra el DCO que se desea calentar previo a su ingreso en la torre de destilación T-1101. Para simular esta zona se utilizó un intercambiador de calor simple, por el cual entran dos corrientes que representan el flujo de DCO entrando al horno por la zona de convección (corriente denominada DCO), a una temperatura de 498,2 °F y el flujo de gases de combustión que entró a la zona de convección (proveniente de la zona de radiación) a una temperatura de 1666 °F (corriente S3), y que salen del horno por la chimenea, la cual se encuentra por encima de dicha zona.

Para fines de la simulación la corriente de crudo se introdujo al intercambiador (que representa la zona de convección) por el lado tubo, ya que es por donde circula dentro del horno (dentro de un serpentín), mientras el flujo de gases de combustión se introdujo en el intercambiador por el lado de la coraza, ya que es la que libera energía. Es decir, la corriente que representa el flujo de gases de combustión cede energía al crudo y así, este, gana calor antes de entrar a la zona de radiación.

Como resultado, se logró obtener la temperatura del crudo y la temperatura de la corriente de salida de los gases de combustión (corriente S4) la cual fue especificada, de forma tal que, al converger la simulación, ésta fuese de 670 °F a condición de diseño.

3.2.3.2 Intercambiador representativo de la zona de radiación

La zona de radiación es donde se produce la transferencia de calor al DCO, principalmente por radiación, a partir de las llamas producidas por la reacción de combustión en los quemadores. El calor desprendido por los gases de combustión (corriente S2), que en esta zona se encuentran muy caliente, se utilizan para elevar la temperatura a la salida del DCO.

Para modelar esta zona, se seleccionó otro intercambiador de calor simple. Las corrientes que intercambiaron calor en esta sección son: la corriente denominada “S2”, que representó los gases de combustión, y que entró al intercambiador por la coraza; y la corriente denominada “Warn_DCO”, que se introdujo al intercambiador por el lado tubo y que representó el flujo de crudo a la salida de la zona de convección. Como resultado se obtuvieron tanto la temperatura de gases de combustión a la salida de la zona de radiante denominada en el diagrama de flujo de la simulación como corriente “S3”, así como la temperatura del crudo a la salida de la zona radiante (o lo que es lo mismo, a la salida del horno) denominada como “Hot DCO”, siendo esta de 730,3 °F.

3.2.3.3 Intercambiador denominado pérdidas

Este intercambiador es un artificio que permite incluir en la simulación, las pérdidas de calor al ambiente. Tiene como corriente de entrada a la corriente S1, que representa los gases de combustión entrando a la zona de radiación, y se especificó con una transferencia de calor de 1,5% del calor liberado en el horno (reactor F1101) tal como se reporta en la hoja de datos de diseño del horno. Simular estas pérdidas resultó importante puesto que esto influyó en el cálculo del duty del proceso y por lo tanto en la eficiencia térmica de los hornos atmosféricos de la unidad DRU.

Cabe destacar que dentro del horno el flujo de gases de combustión asciende desde la zona de radiación hasta la zona de convección para salir a la atmósfera por la chimenea, mientras que, el flujo de crudo, desciende desde la zona de convección hacia la zona de radiación por donde sale de los mismos, y es por esto que este flujo fue simulado en contra corriente con los gases de combustión tal como se aprecia en el diagrama de flujo de la simulación de los hornos atmosféricos de la unidad DRU.

3.2.3.4 Reactor de conversión denominado F-1101

Este equipo modela la zona de combustión de los hornos F-1101 A/B, donde reaccionan el oxígeno atmosférico con el gas combustible, que para la condición de diseño se trató de gas de refinería, que da pie a la formación de gases de combustión (conocidos también como gases de chimenea). En la figura 3.5 se muestran las reacciones de combustión que se dan en el horno y como fueron configuradas en el modelo.

Name	Definition
1	$2.00 O_2 + CH_4 = CO_2 + 2.00 H_2O$
2	$3.50 O_2 + C_2H_6 = 2.00 CO_2 + 3.00 H_2O$
3	$5.00 O_2 + C_3H_8 = 3.00 CO_2 + 4.00 H_2O$
4	$6.50 O_2 + C_4H_{10} = 4.00 CO_2 + 5.00 H_2O$
5	$H_2 + 0.50 O_2 = H_2O$
6	$4.50 O_2 + C_3H_6 = 3.00 CO_2 + 3.00 H_2O$
7	$3.00 O_2 + C_2H_4 = 2.00 CO_2 + 2.00 H_2O$
8	$8.00 O_2 + C_5H_{12} = 5.00 CO_2 + 6.00 H_2O$
9	$9.50 O_2 + C_6H_{14} = 6.00 CO_2 + 7.00 H_2O$

Figura 3.5 Reacciones de combustión hornos F-1101 A/B, para el caso diseño

La importancia de simular esta zona, a la condición de operación de diseño y actual, se debe a que permitió reflejar en el modelo la corriente de gases de combustión para calcular y evaluar la temperatura de salida y entrada los mismos, como variable que influye en la eficiencia térmica de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU. Para el modelo de simulación del caso diseño (figura 3.4), la temperatura de salida de los gases de combustión por la chimenea fue establecida en 670 °F, tal como se señala en la hoja de datos de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para el gas de refinería como gas combustible.

3.2.3.5 Reactor de conversión denominado R1

El reactor de conversión (R1 en el diagrama de la figura 3.5), se hizo con el fin de que este calculara la corriente de aire necesaria para que no hubiera aire en exceso, en el modelo de simulación. Esto se logró con la corriente de gas refinería (corriente GREF), la cual fue separada previamente en un equipo separador (o "splitter" en inglés), y con la corriente de aire estequiométrico (corriente AIRSTQ) para la cual se utilizó un controlador (CN1) que permitió variar dicho flujo, hasta que a la salida de la corriente FG (del reactor R1) el flujo molar de oxígeno fuera de 0,1 lbmol/h (una cantidad pequeña en los gases de combustión). La figura 3.6 muestra la especificación del controlador. Se obtuvo que la cantidad de aire necesario para que no hubiera aire en exceso, o para que este fuese mínimo, fue de 7.563 lb-mol/h.

The screenshot shows a software interface for a 'Feedback Controller'. At the top, there are tabs for 'UOM', 'Range', 'Help', 'Overview', 'Status', and 'Notes'. Below these, the 'Unit' is set to 'CN1' and the 'Description' field is empty. Under the 'Specification' section, the text reads: 'Stream FG Flowrate of component OXYGEN on a Wet basis in lb-mol/hr = 0.10000 within the default tolerance'. Under the 'Variable' section, the text reads: 'Stream AIRSTQ Flowrate in lb-mol/hr'. A button labeled 'Limits and Step Sizes...' is located in the bottom right corner of the variable section.

Figura 3.6 Controlador para variar el flujo de aire estequiométrico especificado bajo la condición de operación de diseño

3.2.3.6 Separador SP1

El "splitter", en la simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, permitió la separación de la corriente de gas combustible (GC), que para el caso diseño es el gas de refinería, en dos corrientes idénticas y de igual flujo (465,7 lb-mol/h, para el caso diseño), las cuales cumplieron un objetivo específico tanto en el reactor de conversión R1, así como en el reactor denominado F-1101, tal como se observa en la figura 3.4. La figura 3.7 mostrada a continuación, muestra la especificación dada al "splitter", como requerimiento para que convergiera la simulación.

Stream	Specification
1 GCREF	Stream GCREF Flowrate of All Components on a Wet basis in lb-mol/hr / StreamGC Flowrate of All Components on a Wet basis in lb-mol/hr = 0.5
2 GC1	Parameter = value

Figura 3.7 Especificación del "splitter" para separar, en dos, la corriente de gas combustible

Una vez especificado el "splitter", se realizó una primera corrida en la cual se obtuvo, a través del reactor R1 y del controlador CN1 el flujo de aire estequiométrico. Luego con el uso de la calculadora CA1, se definió el porcentaje de oxígeno en exceso en 20% (de acuerdo a la hoja de datos del fabricante) para determinar el flujo de aire atmosférico que debe ser alimentado al reactor F-1101 en una segunda corrida.

3.2.4 Definición de las corrientes de alimentación

En todo modelo de simulación se deben definir las corrientes de entrada al modelo. En este caso se tuvieron que definir la corriente del crudo diluido, la corriente de gas combustible y la corriente de aire.

3.2.4.1 Definición de la corriente DCO

El crudo diluido es la corriente que se desea calentar hasta una temperatura de 725 °F para el caso diseño. Para definir esta corriente, se necesitó conocer su curva de destilación ASTM D-1160 y su gravedad API, además de su flujo, temperatura y presión, a la entrada del horno atmosférico. En la figura 3.8 se muestra las capturas de pantalla con las especificaciones del DCO en el simulador Pro/II a condición de diseño.

Figura 3.8 Especificación de la corriente de DCO a la entrada del horno

En la imagen a la izquierda de la figura 3.8 se observa las condiciones térmicas del DCO, que fueron ingresadas al simulador para la corrida de esta. La ventana observada a la derecha de la imagen aparece al seleccionar el recuadro “Flowrate and Assay”, y en ella se le asignó el flujo para la condición de diseño, el cual fue tomado de la hoja de datos de los hornos atmosféricos F-1101 A/B. Posteriormente, para culminar la caracterización del DCO, se pulsó el recuadro denominado “Define/Edit Assay” y se habilitó otra ventana, como se observa en la figura 3.9, donde se especificaron los datos de temperatura vs porcentaje de recobro bajo el formato de una caracterización ASTM-D1160.

Los datos que se observan en la figura 3.9 fueron tomados de la última curva de destilación realizada al crudo diluido del mejorador de crudo Petromonagas, cuya fecha no se conoce realmente, pero se estima que fue de hace diez años aproximadamente.

Stream Data - Assay Definition

UOM Range Help Tag

Assay data for stream DCO

Distillation

True Boiling Point

ASTM D86

ASTM D1160

ASTM D2887

D1160 Basis

Liquid Volume

Weight

Pressure: psig

Correct for Cracking
(Recommended for API 63 and Edmister-Okamoto Interconversion only)

Gravity Data

API Gravity Average:

Specific Gravity

Watson K-Factor

Cut	Percent Distilled	Temperature C
Copy		
Paste		
Insert		
Reset		
1	0	82.7
2	5	139.2
3	10	173.4
4	20	259.2
5	30	352.1
6	40	432.3
7	50	509.8
8	60	596.3
9	70	668.4
10		

Figura 3.9 Caracterización de la corriente DCO en el simulador, caso diseño

3.2.4.2 Definición de la corriente de aire

El aire que entra a los hornos atmosféricos F-1101 A/B, y que es simulado en el modelo descrito, se trata de aire atmosférico que se utiliza para suministrar el oxígeno necesario para reaccionar con el gas combustible en los quemadores de dichos hornos. Como se describió anteriormente, para calcular el flujo de esta corriente se utilizó un controlador que modificó el flujo de aire estequiométrico hasta que el flujo molar de oxígeno a la salida del reactor R1 fuera de 0,1 lb-mol/h, es decir, que no se tuviera aire en exceso, dando como resultado que el flujo de aire estequiométrico fue de 7563 lb-mol/h (caso diseño).

La corriente de aire terminó definiéndose proporcionando la temperatura y presión, así como la composición. En la figura 3.10 se observan los valores ingresados a la simulación.

Figura 3.10 Especificación de la corriente de aire (AIR)

A la izquierda de la figura 3.11 se observa en el recuadro rojo la especificación dada para los parámetros de temperatura y presión, los cuales fueron tomados de la hoja de datos del fabricante de los hornos atmosféricos F-1101 A/B. A la derecha de la imagen se muestra el valor asignado al flujo de aire, el cual fue 7563 lb-mol/h y cuyo valor se obtuvo de la primera corrida de la simulación, así mismo se muestra la composición del aire, siendo esta, la del aire atmosférico.

3.2.4.3 Definición de la corriente de gas combustible

La composición del gas combustible utilizado en las simulaciones del caso diseño y caso actual se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Composición gas combustible, caso diseño y actual

Componente	Fracción molar diseño (gas de refinería)	Fracción molar actual (gas natural)
Hidrogeno	0,152	0,000
Nitrógeno	0,0088	0,0013
Oxígeno	0,000	0,000
Argón	0,000	0,000
Dióxido de carbono	0,000	0,0712
Metano	0,3965	0,8323
Etileno	0,0259	0,000
Etano	0,1846	0,0721
Propileno	0,0397	0,000
Propano	0,1077	0,0181

Tabla 3.3 Composición gas combustible, caso diseño y actual (continuación)

Componente	Fracción molar diseño (gas de refinería)	Fracción molar actual (gas natural)
n-Butano	0,0439	0,0044
i-Butano	0,0439	0,000
n-Pentano	0,0013	0,000
i-Pentano	0,0013	0,000
n-Hexano	0,0006	0,000

Para el caso diseño estos datos fueron obtenidos del manual de diseño de la unidad 46 del mejorador de crudo Petromonagas. Mientras que, para las condiciones actuales, la composición del gas combustible (gas natural para este caso) se obtuvo de una cromatografía realizada al mismo en la empresa que actualmente envía el mencionado gas al mejorador de crudo Petromonagas. Se supuso que la corriente de gas combustible llega a los quemadores a 14,7 psia y 60 °F

3.2.4.4 Corrida de la simulación

Luego de haber cumplido con todo el procedimiento para la realización de la simulación, detallado en los apartados anteriores, el simulador habilitó la casilla llamada "run" que quiere decir corrida y que permite que Pro/II realice todos los cálculos necesarios y a su vez alcanzar la convergencia del modelo simulado. Una vez que el simulador realizó la corrida del modelo, y una vez comparado y verificado la cercanía de los resultados con los de la hoja de datos se dio por validado el modelo del caso diseño, permitiendo su réplica para el caso de operación actual de los mencionados hornos atmosféricos de la unidad DRU. En la figura 3.11 se observa el diagrama del proceso una vez convergido el sistema, y las tablas que se obtuvieron con los resultados obtenidos para los parámetros de cada corriente simulada.

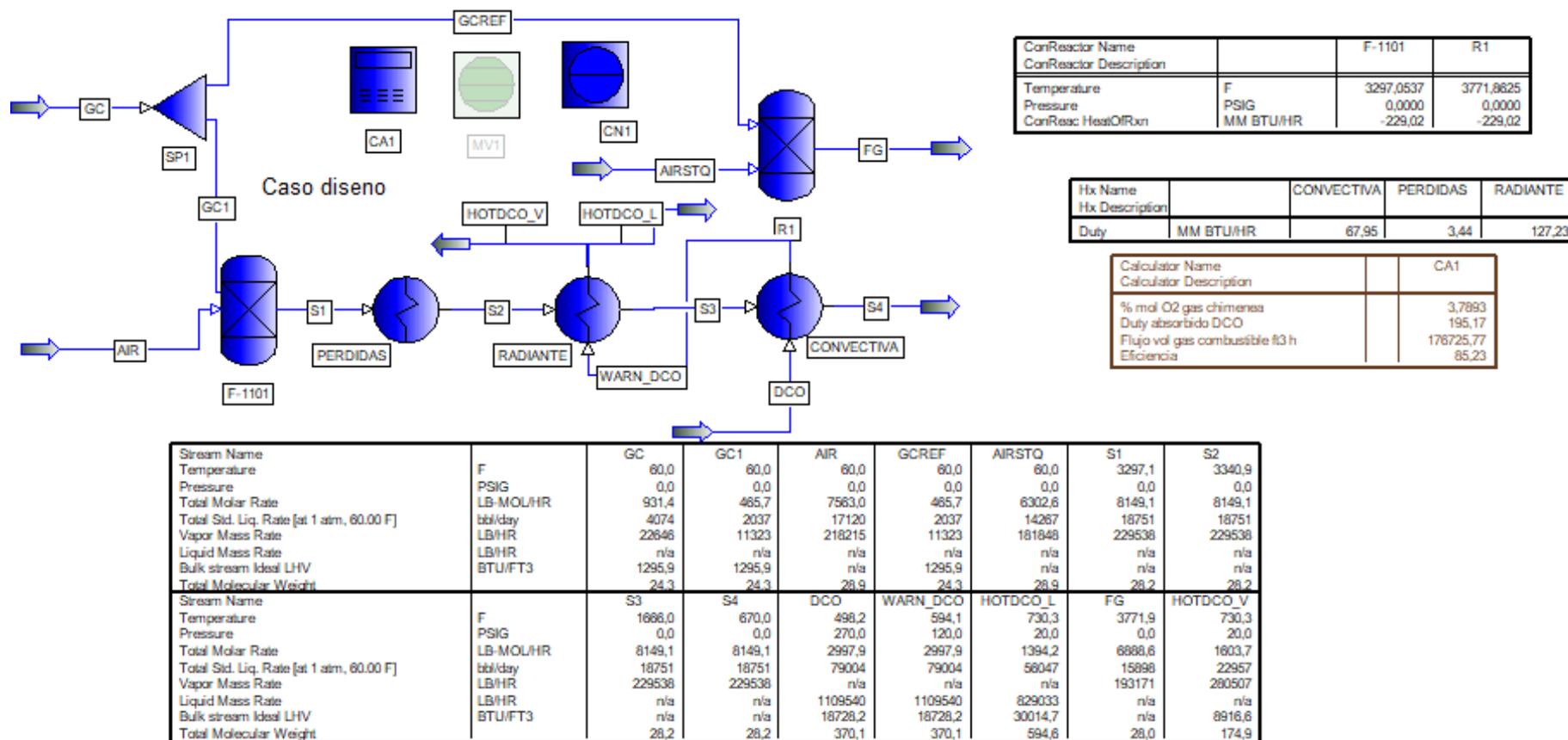


Figura 3.11 Pantalla mostrada en el simulador una vez convergido el modelo de simulación para el caso diseño

De las tablas observadas en la figura 3.11, se extrajo la eficiencia térmica del proceso de combustión obtenida de la simulación, ya que este era el objetivo de la simulación; además, se extrajo también, como parámetros importantes, la temperatura de salida de DCO, el calor absorbido por el mismo y el calor generado durante el proceso de combustión, tal como se observa en la tabla 3.4 (como preámbulo a los resultados discutidos en el capítulo 4). Se hace saber que, las tablas observadas en la figura 3.11 se encuentran en los anexos F del presenta trabajo de grado.

Tabla 3.4 Parámetros importantes extraídos de la simulación

Parámetro (unidades)	Valor obtenido (caso diseño)
Eficiencia (%)	85,23
Calor absorbido (MMBtu/h)	195,17
Calor generado (MMBtu/h)	229,02
COT del DCO (°F)	730,3
Flujo de vapor formado (lb/h)	280.507

3.2.5 Simulación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B para el cálculo de la eficiencia a condición de operación actual

Con la validación del modelo de simulación para el caso de operación de diseño se pudo simular el caso de operación actual siguiendo exactamente el mismo procedimiento utilizado en el caso diseño, modificando los parámetros de las corrientes de entrada que fueron caracterizadas en el mismo, la composición del gas combustible (observada en la tabla 3.3) que, para este caso, se trató de gas natural y también, se modificaron las especificaciones dadas a los controladores CN1 y MV1 de acuerdo a las condiciones actuales en la operación de los hornos atmosféricos F-1101 A/B. El diagrama del modelo convergido se muestra en la figura 3.12

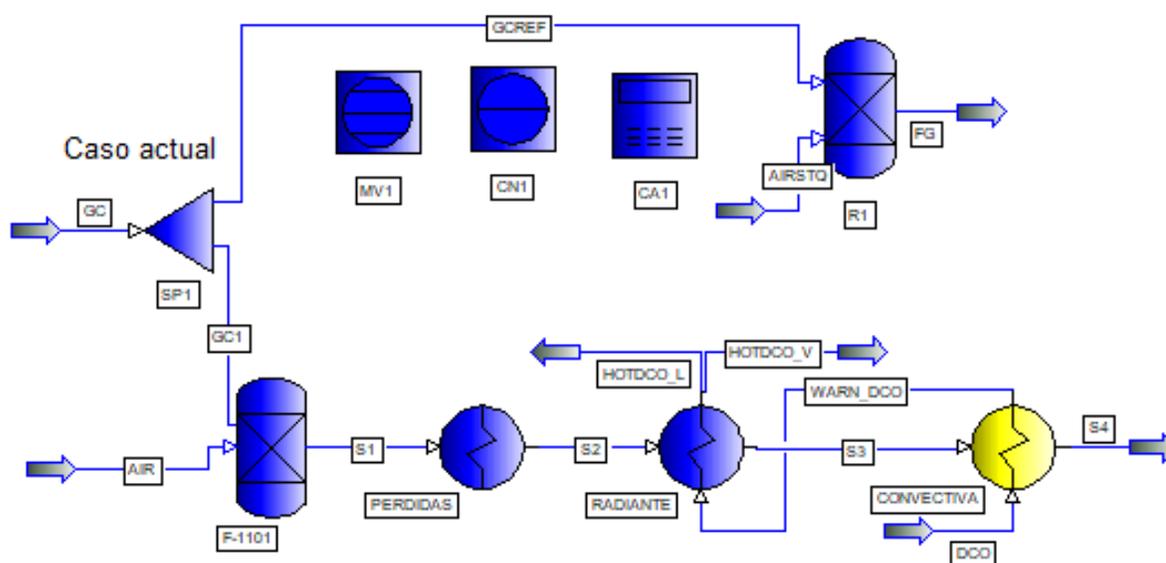


Figura 3.12 Diagrama de flujo de la simulación de los hornos caso actual

Así como el caso diseño, la simulación del caso actual también convergió y a partir de ello se obtuvo, para los parámetros más importantes evaluados con la simulación, los resultados mostrados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros importantes extraídos de las tablas obtenidas en la simulación

Parámetro (unidades)	Valor obtenido (caso actual)
Eficiencia (%)	88,19
Calor absorbido (MMBtu/h)	71,43
Calor liberado (MMBtu/h)	81,01
COT del DCO (°F)	668
Flujo de vapor formado (lb/h)	109.598

3.3 Propuestas de mejoras para garantizar un proceso de combustión eficiente en los hornos atmosféricos F-1101 A/B

A fin de que la operación de los hornos, se lleve a cabo adecuadamente lográndose el calentamiento deseado del crudo y cumpliendo así con lo establecido por diseño para los hornos de procesos F-1101 A/B, se efectuaron inspecciones a los mismos, se midieron sus variables operacionales, se entrevistó al personal de operaciones e ingenieros que tienen tiempo trabajando en la instalación y junto con los resultados obtenidos de la simulación de procesos del horno en cuestión, se emitieron una serie de propuestas que pretenden mejorar la operación de los hornos. Las mismas se encuentran en el capítulo 4.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Identificación de las variables operacionales de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad recuperadora de diluyente

A continuación, se describen las variables operacionales monitoreadas en los hornos F-1101 A/B. Cabe acotar que en las leyendas de las gráficas presentadas se hace mención a abreviaciones tales como P1, P2, C1, C2, C3 y C4 donde cada una de ellas significa:

P1: pase 1

P2: pase 2

C1: celda 1 correspondiente al horno atmosférico F-1101A

C2: celda 2 correspondiente al horno atmosférico F-1101A

C3: celda 3 correspondiente al horno atmosférico F-1101B

C4: celda 4 correspondiente al horno atmosférico F-1101B

4.1.1 Temperatura de salida (COT)

La temperatura a la cual sale el DCO de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU, se evaluó bajo el modo de operación actual de la planta Petromonagas, denominada “modo mezcla”. A partir de esta evaluación, se pudo determinar que cuando se utiliza el gas natural (en sustitución del gas de refinería) como gas combustible, se obtiene que el crudo diluido sale de los hornos atmosféricos a una temperatura que oscila entre los 650 a 680 °F, debido al bajo poder calorífico del gas natural. Sin embargo, según la hoja de datos del horno el crudo diluido puede alcanzar la temperatura de 725 °F establecida por diseño, con gas natural, pero requiriendo mayor consumo de este gas combustible.

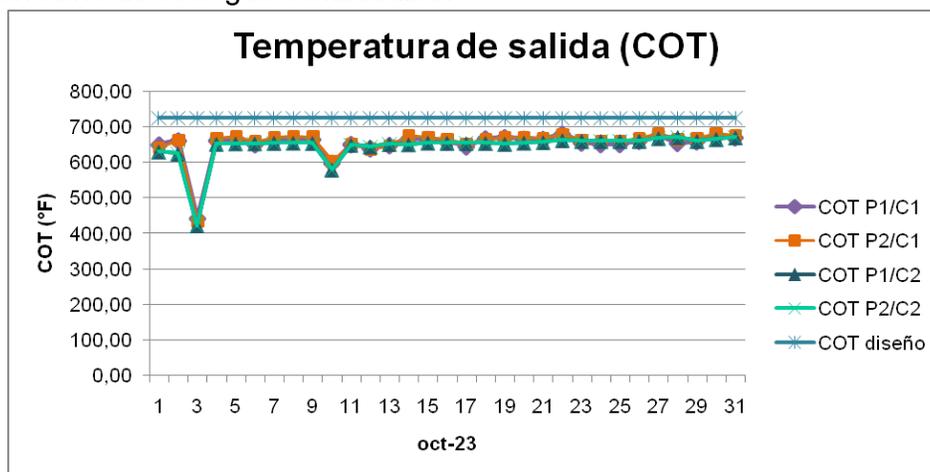


Figura 4.1 Temperatura de salida del horno atmosférico F-1101A

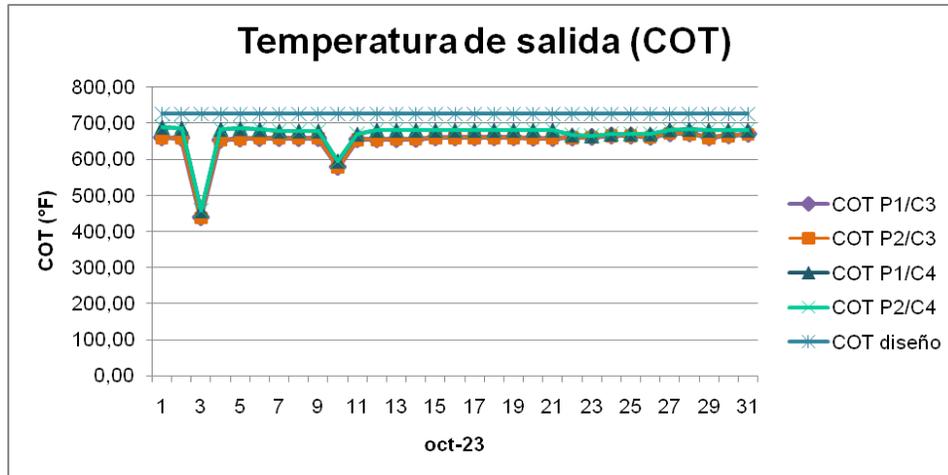


Figura 4.2 Temperatura de salida del horno atmosférico F-1101B

Complementando lo anterior, se requeriría tener todos los quemadores en servicio para alcanzar el calentamiento adecuado del flujo de DCO en los hornos atmosféricos F-1101 A/B. Esto debido a que una deficiente relación aire – gas combustible, implica pérdidas de energía y emisiones no deseadas, afectando a su vez, la eficiencia de los hornos atmosféricos F-1101 A/B.

En la gráfica del comportamiento de esta variable, se observaron puntos donde la temperatura disminuyó significativamente, como resultado de la recirculación, por problemas operacionales, a la que fue sometida la planta de la unidad DRU, durante los días en los que se observaron tales disminuciones.

4.1.2 Temperatura de gases de combustión

Las gráficas de la temperatura de los gases de combustión, que salen por la chimenea, (figuras 4.3 y 4.4) permitieron observar la desviación que tiene de dicha variable con respecto a la temperatura establecida por diseño, la cual es de 670 °F. Durante los meses de septiembre y octubre de 2023, la temperatura de gases de combustión se mantuvo entre 450 y 550 °F en ambas chimeneas de los hornos.

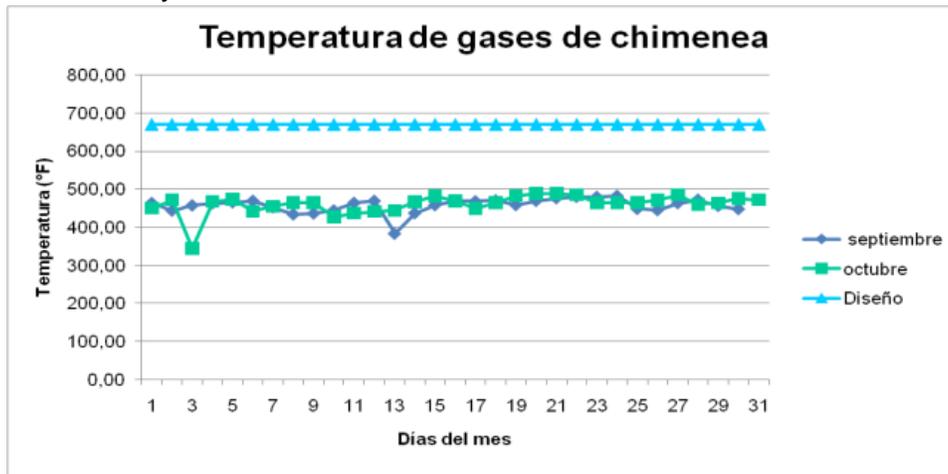


Figura 4.3 Temperatura del gas de chimenea en el horno atmosférico F-1101A

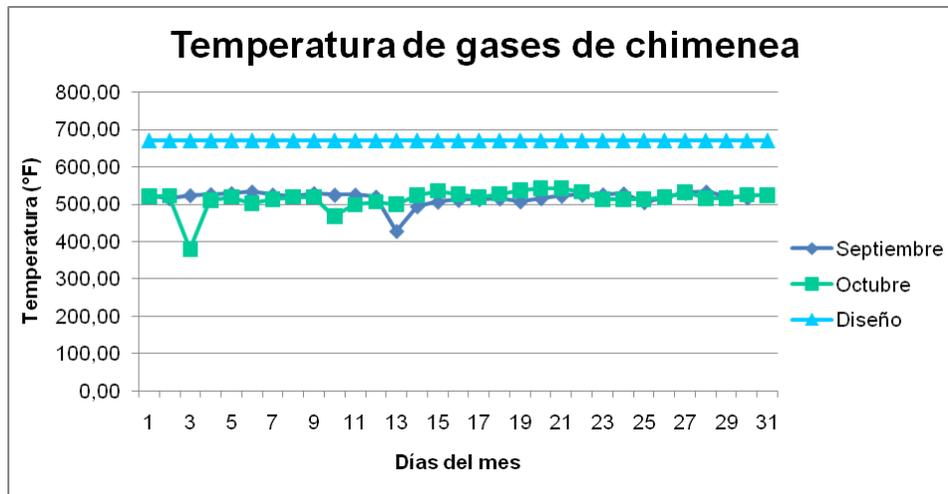


Figura 4.4 Temperatura del gas de chimenea en el horno atmosférico F-1101B

De forma específica, se determinó que la temperatura de los gases de combustión para el horno atmosférico F-1101A oscila, en promedio, en 457 °F y 460 °F durante septiembre y octubre del 2023, respectivamente, mientras que, en el horno atmosférico F-1101B, se observó que la temperatura de gases de combustión, en promedio, se encontraba en 516 °F y 513 °F durante septiembre y octubre, respectivamente. Los datos correspondientes a la temperatura de los gases de combustión para los hornos atmosféricos F-1101 A/B, durante el tiempo de estudio, se encuentran ubicadas en los anexos A.

Las desviación observada posiblemente se deban al exceso de aire dentro de los hornos atmosféricos, el cual no puede ser medido debido a no contar con los analizadores de oxígeno, los cuales permiten tener un control del porcentaje de aire en exceso, así como, de la composición de oxígeno en los gases de combustión. Una baja temperatura de gases de combustión con respecto a la establecida por diseño, se traduce en un rápido enfriamiento de estos gases, afectando así tanto el calentamiento del DCO en la zona de radiación y convección como la temperatura de salida requerida para el DCO.

De igual forma, esta temperatura puede estar siendo afectada por las infiltraciones de aire en los hornos, ya que en una inspección visual realizada se observó que algunas de las chaquetas que cubren las líneas por donde sale el DCO de la sección de radiación, de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, no se encontraban herméticas dejando al descubierto zonas por las cuales puede entrar aire parásito que afecta la eficiencia de la combustión y que incrementan el porcentaje en exceso de oxígeno (ver figura 4.5).



Figura 4.5 Infiltraciones de aire en los hornos F-1101

4.1.3 Temperatura de entrada del DCO al horno

El DCO, antes de entrar a los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU es calentado en dos trenes de precalentamiento que le permite absorber calor, de los productos atmosféricos calientes con los cuales intercambia calor, en dicho proceso.

Para evaluar el comportamiento de la mencionada variable operacional, se realizaron las gráficas mostradas en las figuras 4.6 y 4.7, correspondientes a la operación del horno atmosféricos F-1101 A en los meses de septiembre y octubre de 2023 y en las figuras 4.8 y 4.9 a los hornos atmosféricos F-1101B. Los datos para la elaboración de estas gráficas se encuentran en los anexos A.1 y B.1.

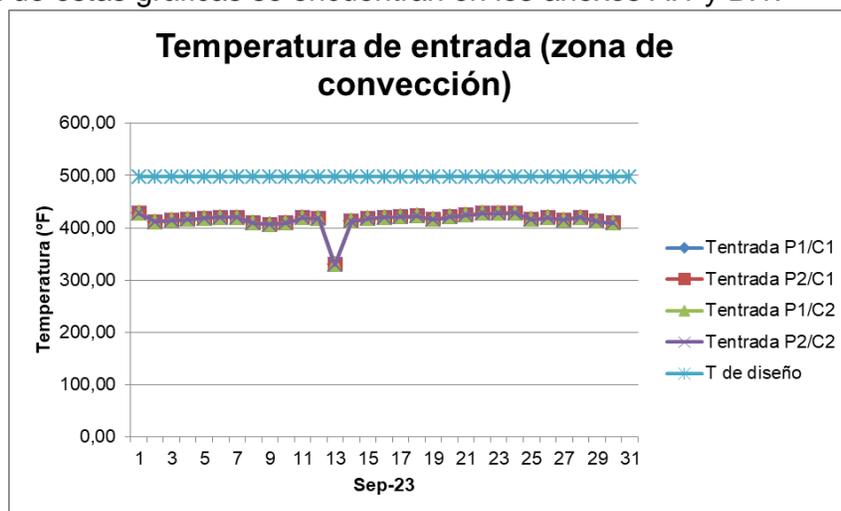


Figura 4.6 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101A (sep 2023)

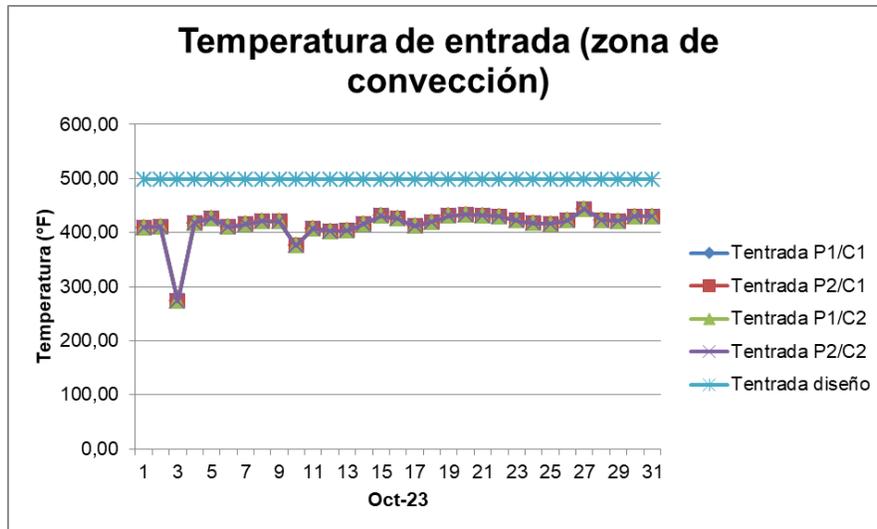


Figura 4.7 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101A (oct 2023)

Se consideró como referencia para el estudio de esta variable, el comportamiento observado en la figura 4.6 y 4.7, referido al horno atmosférico F-1101A. De acuerdo a las gráficas de la temperatura de entrada del crudo a este horno, para el tiempo en estudio (septiembre y octubre de 2023), se obtuvo que la misma tuvo un promedio de 415 °F durante ambos meses, unos 83 °F por debajo de la de diseño

En cambio, una inspección a la figura 4.8 y figura 4.9 evidencia que el horno atmosférico F-1101B presenta fallas en la indicación de la misma ya que se observa que, en promedio, la temperatura de entrada del DCO al mismo es de 532 °F, es decir, que se encuentra por encima del diseño.

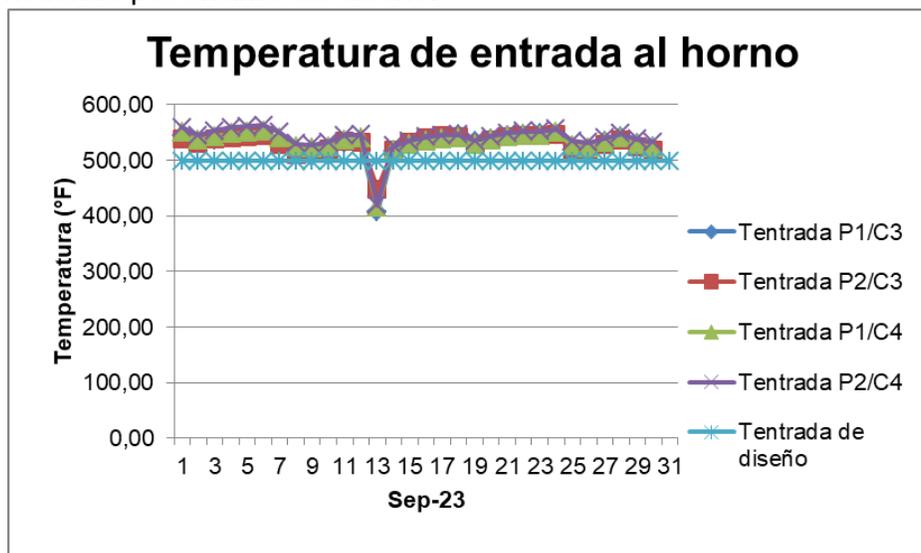


Figura 4.8 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101B (sep 2023)

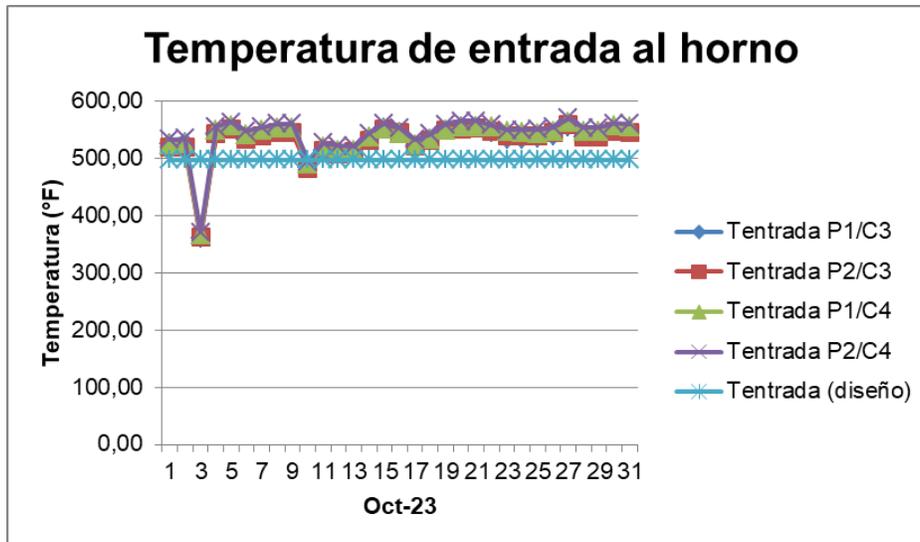


Figura 4.9 Temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101B (oct 2023)

Este comportamiento resulta erróneo, ya que no es posible que la temperatura del DCO que entra al horno F-1101B es mayor a la temperatura del DCO a la entrada del horno F-1101A, puesto que el DCO que proviene del tren de precalentamiento es uno solo, y se divide justo antes de entrar en la zona convectiva de cada horno atmosférico. El análisis descrito permitió llegar a la conclusión de que la desviación presentada por la temperatura de entrada al horno atmosférico F-1101B, se debe a fallas en el instrumento de medición del mismo.

De forma general, y como complemento a todo lo anterior, se debe acotar que el comportamiento observado de la temperatura de entrada del DCO a los hornos atmosféricos se debe también a que, para la fecha en estudio (y en la actualidad) la unidad DRU no cuenta con todo el circuito de precalentamiento en servicio, puesto que la unidad de desalación (DSU), así como los intercambiadores de calor E-1103 y E-1107 se encuentran desviados (fuera de servicio), y por lo tanto se necesita una mayor capacidad energética, para cubrir la demanda de calor que no pudo abarcar el precalentamiento.

4.1.4 Temperatura de metal de tubo (TMT)

La temperatura del metal de tubos (o TMT por siglas en inglés) en los hornos de procesos establecida por diseño, no debe sobrepasar los 1.150 °F, ya que se puede producir coquización del crudo diluido dentro de las tuberías.

En las figuras 4.10 y 4.11 se aprecia el comportamiento de este parámetro a medida que el DCO pasa por los puntos de entrada, medio y salida de los tubos, en cada pase de los hornos atmosféricos F-1101 A/B. Cabe acotar que, dado la amplitud de las gráficas de este parámetro, se consideró para esta identificación solo el comportamiento del mismo durante el mes de octubre de 2023.

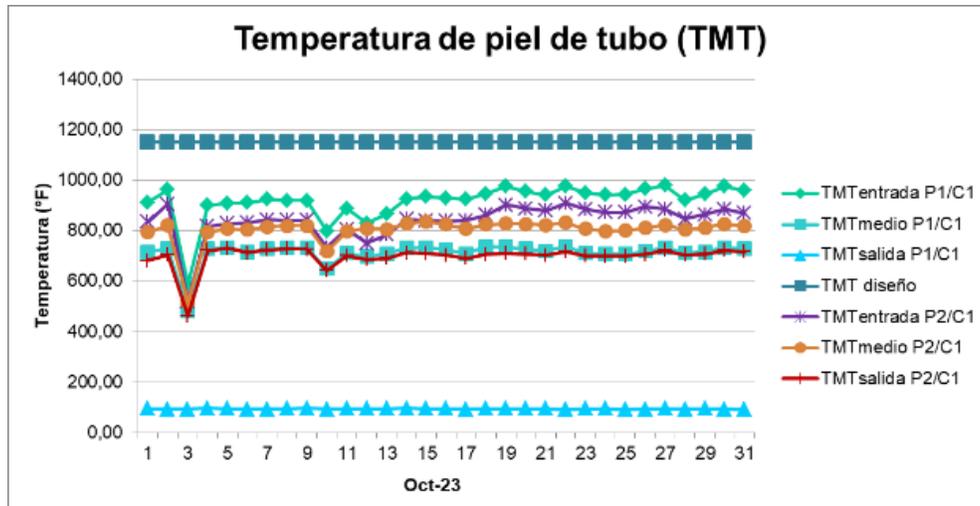


Figura 4.10 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101A celda 1 (oct 2023)

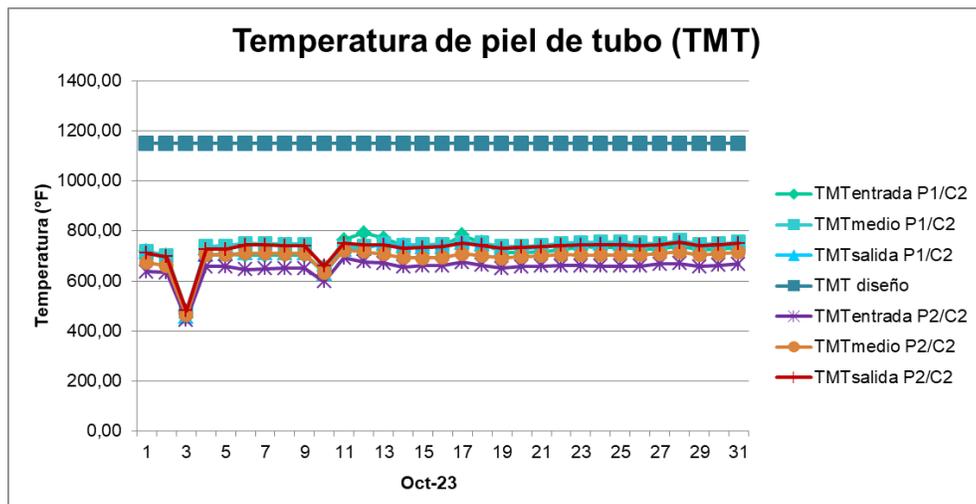


Figura 4.11 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101A celda 2 (oct 2023)

La figura 4.10 y figura 4.11, muestra que durante el mes de octubre la temperatura de piel de tubo, en ambas celdas del horno atmosférico F-1101A, se mantuvo en valores muy cercanos, en los tres puntos de cada tubo (entrada, medio, salida). Sin embargo, en la figura 4.10, se evidencia que la TMT de salida correspondiente al pase 1 de la celda 1, se mantuvo en una temperatura promedio de 94,02 °F, siendo este valor significativamente distante al establecido por diseño. Por su parte, la figura 4.11 (correspondiente a la celda 2), muestra una mayor cercanía de la TMT en la entrada, media y salida de los tubos, aunque en una temperatura más baja a la establecida por diseño.

En la tabla 4.1, se resumen las TMT promedio de entrada, medio y salida de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A.

Tabla 4.1 TMT promedio de entrada, punto medio y salida del haz tubular de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A

Pases	Temperatura de piel de tubos promedio (°F)					
	Celda 1			Celda 2		
	Entrada	Medio	Salida	Entrada	Medio	Salida
1	917,15	712,14	94,02	719,24	733,86	720,03
2	839,58	802,04	698,28	650,99	693,18	727,83

La figura 4.12 y figura 4.13 permiten observar el comportamiento de este parámetro en el horno atmosférico F-1101B. En la figura 4.12 correspondiente a la celda 3 de dicho horno, se visualiza que, así como en la celda 1 del horno atmosférico F-1101A, la TMT de salida alcanzo una baja temperatura que en promedio es de 94,04 °F. Así mismo, se observa una cercanía entre todas las TMT durante el mes, exceptuando el descenso observado el día 3 y 10 del mes.

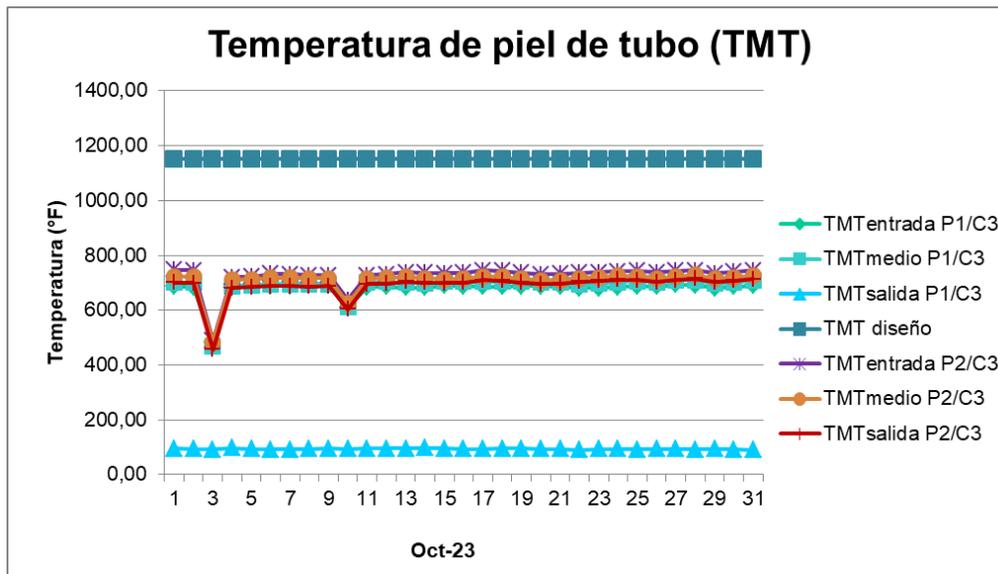


Figura 4.12 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101B celda 3 (oct 2023)

Por otra parte, la figura 4.13 correspondiente a la celda 4 del horno atmosférico F-1101B, muestra menor concordancia de las TMT de entrada, medio y salida correspondiente a la celda antes mencionada; también muestra que la TMT de salida se mantiene en valores cercanos al resto de las TMT.

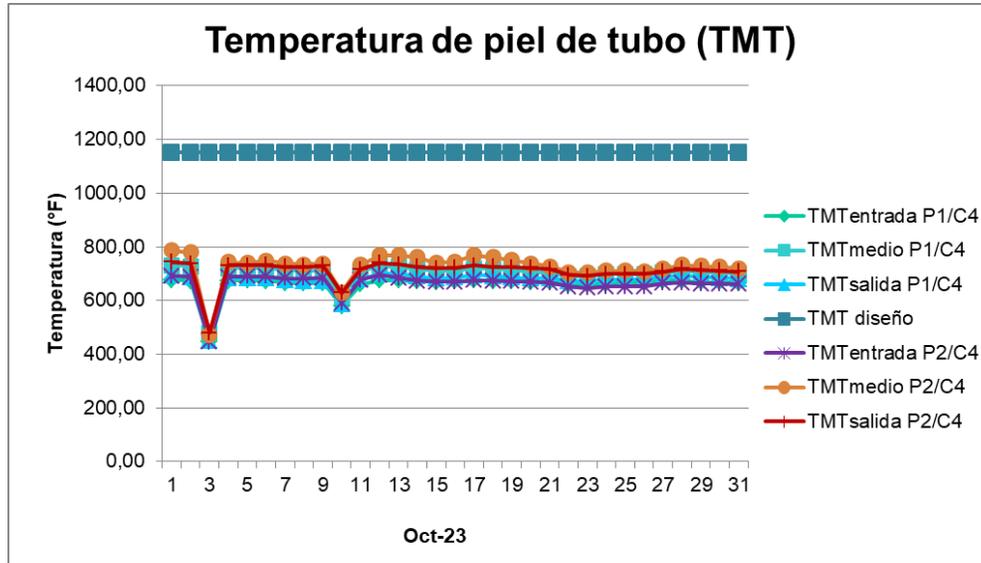


Figura 4.13 Temperatura de metal del tubo del horno F-1101B celda 4 (oct 2023)

La tabla 4.2, muestra las temperaturas de piel de tubo promedio en la entrada, punto medio y la salida, en las celdas 3 y 4 del horno atmosférico F-1101B.

Tabla 4.2 TMT promedio de entrada, punto medio y salida del haz tubular de las celdas 3 y 4 del horno atmosférico F-1101B, durante el mes de octubre

Pases	Temperatura de piel de tubos promedio (°F)					
	Celda 3			Celda 4		
	Entrada	Medio	Salida	Entrada	Medio	Salida
1	677,45	690,11	94,04	659,46	700,22	673,48
2	725,27	707,84	689,16	662,39	727,26	709,00

La desviación que presenta la TMT en el punto de salida de los tubos en el pase 1 de las celdas 1 y 3 de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (respectivamente), se debe a que el instrumento que mide esta variable en línea, presenta fallas de indicación, por lo tanto, ambas temperaturas no resultan confiables y deberían ser evaluadas en campo mediante pirometría, a fin de obtener resultados certeros. Sin embargo, la recomendación ideal es que este instrumento sea reparado o reemplazado por uno nuevo. En tal sentido, se debe mantener el monitoreo constante de las TMT para prevenir acumulación excesiva de coque en los tubos, que se traduce en fallas estructurales en las tuberías de los hornos atmosféricos de la unidad DRU.

Cabe acotar que además del estudio realizado a la temperatura de metal de los haces tubulares que conforman los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU, se realizó, durante el mes de marzo de 2024, una termografía a los mismos en la que se pudo evidenciar que las TMT se mantienen en un rango muy similar al obtenido de forma automatizada durante el mes de octubre del 2023. En la figura 4.14 se observan las TMT de cuatro puntos de muestras de alguno de los tubos del horno atmosférico F-

1101A. En el anexo E se pueden observar algunas de las otras tomas realizadas para este horno y para el F-1101B.

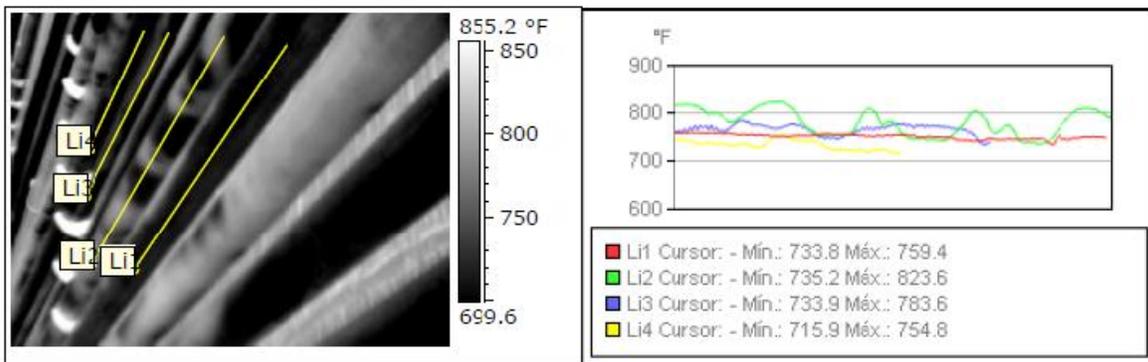


Figura 4.14 Termografía realizada a la zona de radiación del horno atmosférico F-1101A

4.1.5 Presión de brea

Monitorear la presión de entrada del crudo a los hornos atmosféricos F-1101 A/B resulta importante ya que así se evidencia cualquier bloqueo de paso en las líneas por donde fluye el crudo a lo largo de dichos hornos. La presión ejercida por la brea (crudo entrando a los hornos atmosféricos), en cada pase de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, por diseño es de 240 psig. El comportamiento gráfico de esta variable se observa en las figuras 4.15 y 4.16. Los datos con los valores específicos de esta variable para cada día, de los meses en estudio, se pueden observar a detalle en el anexo A.3 y B.3, para los hornos atmosféricos F-1101 A/B, respectivamente.

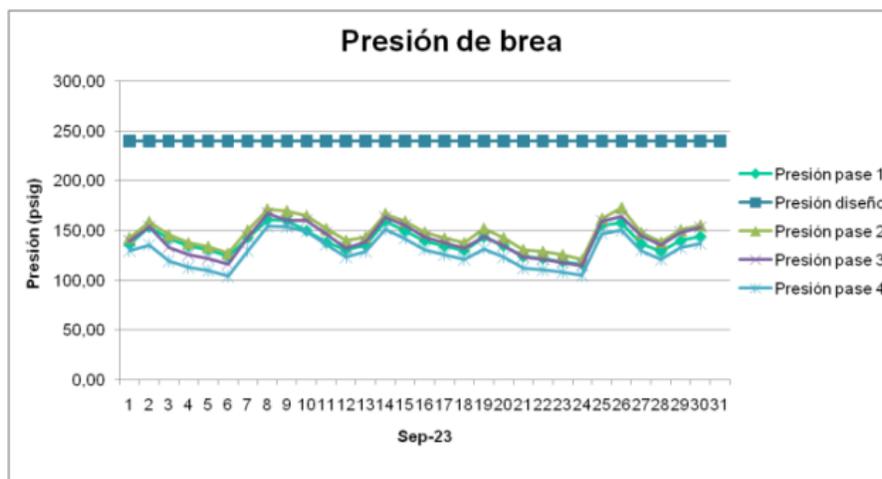


Figura 4.15 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101A (sep de 2023)

Sin embargo, una vez monitoreada esta variable, se obtuvo que en el horno atmosférico F-1101A la presión promedio ejercida por el crudo durante su pase por las dos celdas a través de dicho horno, en los meses de estudio, es decir, septiembre y octubre de 2023 fue de 139 psig y 130 psig, respectivamente.

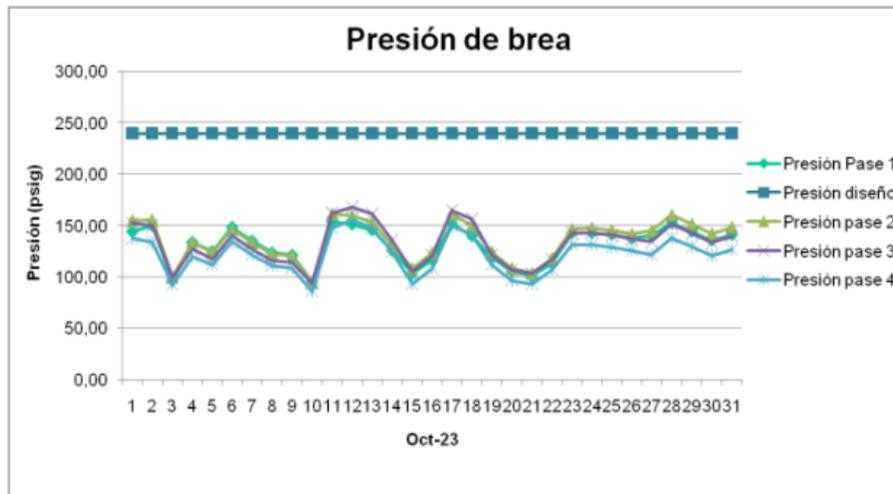


Figura 4.16 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101A (oct de 2023)

Mientras que, en el horno atmosférico F-1101B (figura 4.17 y 4.18), la presión promedio ejercida por el crudo, en las dos celdas de este, durante septiembre y octubre de 2023, se registró en 142 psig y 130 psig, respectivamente.

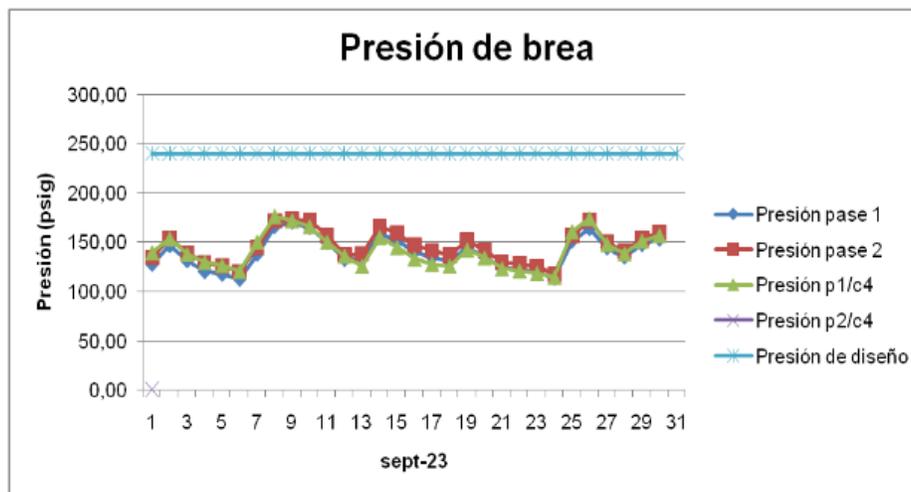


Figura 4.17 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101B (sep de 2023)

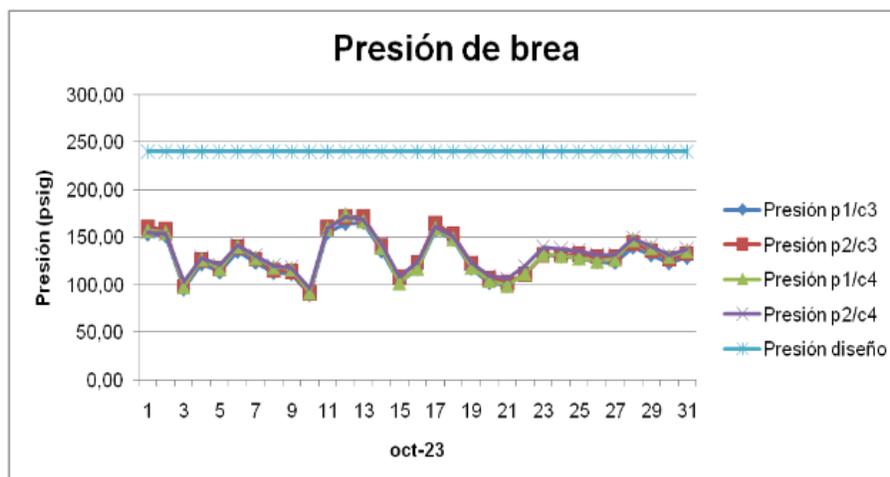


Figura 4.18 Presión de brea en el horno atmosférico F-1101B (oct de 2023)

Estas gráficas, muestran el comportamiento de la variable que permitió llegar a la conclusión de que, en ambos hornos atmosféricos, la presión se mantuvo en constante ascenso y descenso a causa de los aumentos y disminución de la carga de DCO que entraba a cada horno atmosférico F-1101 A/B, por lo que la misma se mantuvo distante a la presión establecida por diseño. Esto quiere decir que, al operar con una carga menor a la de diseño (recordando que esta evaluación se hizo con la planta operando a la capacidad de turndown), la presión que ejerce el flujo no es tan alta, causando así, tal desviación.

En otras palabras, las presiones observadas en las gráficas, se encuentran dentro de lo esperado, ya que no sobrepasa la presión máxima debido a que la carga actual en los hornos atmosféricos F-1101 A/B es la mínima carga establecida por diseño, y que representa casi el 50% de la carga.

Por otra parte, la termografía realizada en ambos hornos, permitió observar que en el horno atmosférico F-1101A, a diferencia del F-1101B, existe una ligera coquización interna en los tubos ya mencionados, anteriormente, lo que también influye en la desviación observada en las gráficas de esta variable. Adicionalmente, el contenido de agua en el crudo también impacta en la presión del DCO en los tubos de estos hornos, siendo esto, también, un indicativo de la desviación observada en las figuras 4.15 a 4.18.

4.1.6 Presión de gas combustible

Los resultados obtenidos para la evaluación de la presión del gas combustible, es decir, gas natural a las condiciones de operación actual de la planta, en los hornos atmosféricos F-1101 A/B, se encuentra en las figuras 4.19 y 4.20, respectivamente. Se evidencian dispersión de esta variable en cada pase de los mismos, además de presiones menores a la fijada por el diseño de los hornos, la cual, de acuerdo a la hoja de datos del fabricante, debe ser 15 psig. En el horno atmosférico F-1101A, en promedio la presión del gas combustible fue de 6 psig, mientras que la presión del combustible en el horno atmosférico F-1101B fue, también, de 6 psig, promediadamente. Los datos usados para construir estas gráficas se encuentran en la

sección de los anexos, específicamente en el anexo A.3 y B.3 para los hornos atmosféricos F-1101 A/B, respectivamente.

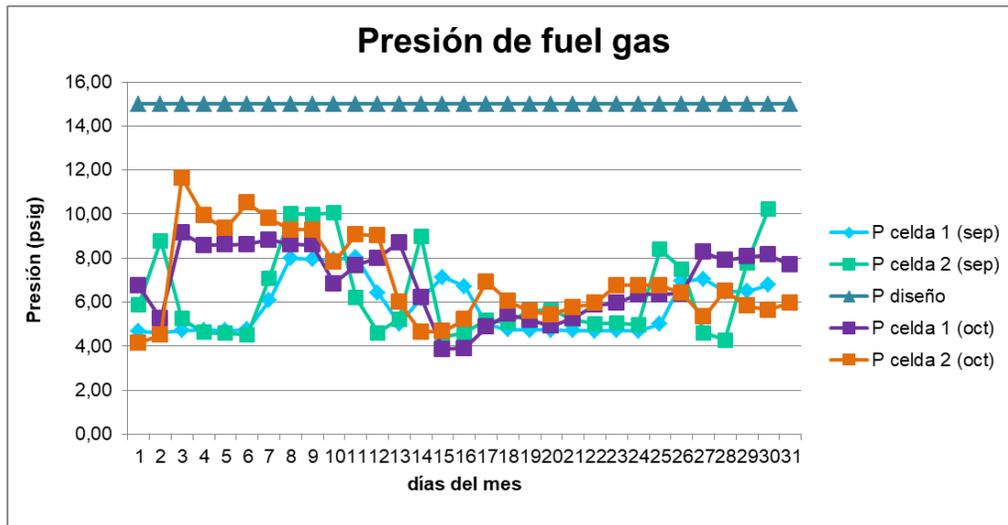


Figura 4.19 Presión de fuel gas en la entrada de las celdas 1 y 2 del horno F-1101A, durante septiembre y octubre de 2023

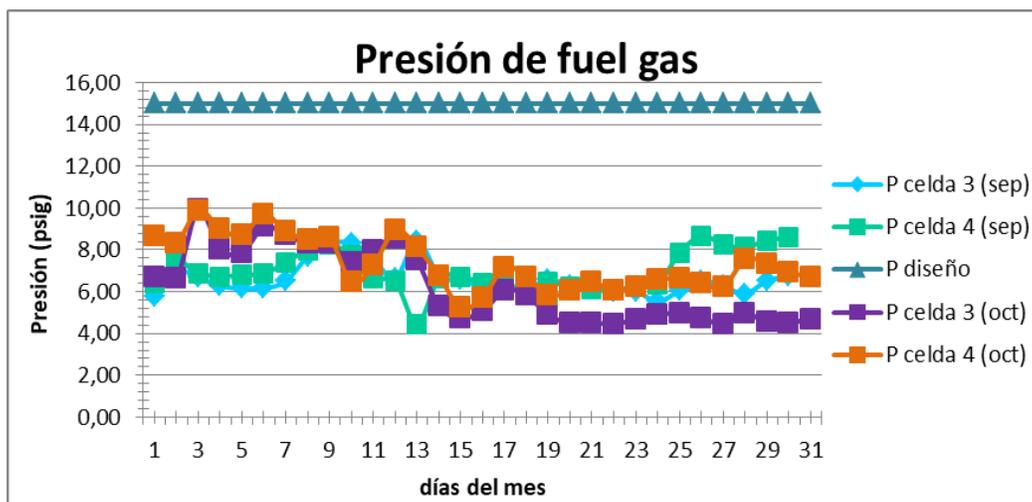


Figura 4.20 Presión de fuel gas en la entrada de las celdas 3 y 4 del horno F-1101B, durante septiembre y octubre de 2023

La desviación presentada de la presión del gas natural se consideró, de alguna forma, razonable debido a la condición de operación actual de la planta, (es decir, se encuentra operando a baja capacidad de diseño), requiere menos flujo de gas combustible, disminuyendo, con ello, la presión del mismo en el cabezal de distribución. En otras palabras, se consideró la presión de diseño (15 psig) como una presión máxima de gas combustible, pero que puede disminuir con respecto a la carga de flujo de DCO que entra a los hornos atmosféricos F-1101 A/B.

También se consideró que la obstrucción presentada en algunos de los quemadores de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, tiene como consecuencia la afectación de la presión y de allí la causa de la distorsión y la alta dispersión de los puntos en las gráficas de las figuras 4.19 y 4.20.

4.1.7 Tiro del horno

De acuerdo al comportamiento obtenido del tiro de los hornos F-1101 A/B, mostrados en las figuras 4.21 y 4.22 respectivamente, se pudo evidenciar el funcionamiento del dámper de chimenea en dichos hornos atmosféricos, conforme a su apertura.

En el horno atmosférico F-1101A, aunque se observa una ligera distorsión durante los primeros días del mes de septiembre, el tiro del dámper se mantuvo en valores muy cercanos o iguales a $-0,12$ inH₂O (valor de diseño), mientras que, durante el mes de octubre, se observó distorsión durante los primeros días, llegando a un punto en el que esta distorsión desaparece manteniendo el tiro en un valor aproximado a $-0,20$ inH₂O, todavía cercano al establecido por diseño, pudiendo llegarse a la conclusión de que (en el horno atmosférico F-1101A), durante el tiempo en estudio, el comportamiento del tiro fue adecuado permitiendo así afirmar que el mecanismo que se encarga de regular la apertura del dámper funciona de forma satisfactoria



Figura 4.21 Comportamiento del tiro del dámper en el horno F-1101A, correspondiente a septiembre y octubre de 2023

Por su parte, en el horno atmosférico F-1101B, se observa (como se muestra en la figura 4.22) el mal funcionamiento del dámper de chimenea ya que el tiro se encuentra muy distante del valor establecido por diseño, a causa de fallas mecánicas que impiden su ajuste para mejorar el tiro del horno, afectando directamente la eficiencia térmica dentro del horno atmosférico. Así mismo, el tiro en un valor de $-0,50$ inH₂O, se considera como un tiro muy abierto, cuyo efecto principal es que los gases de combustión salen del horno atmosférico rápidamente, afectando así la transferencia de calor (desde los gases de combustión al DCO) en la zona de convección; esto afecta también el proceso de combustión ya que permiten las infiltraciones de aire y un difícil control de los quemadores durante el proceso, que puede producir llamas alargadas que inciden en el haz tubular sobrecalentando (posiblemente) el DCO que fluye por los mimos.

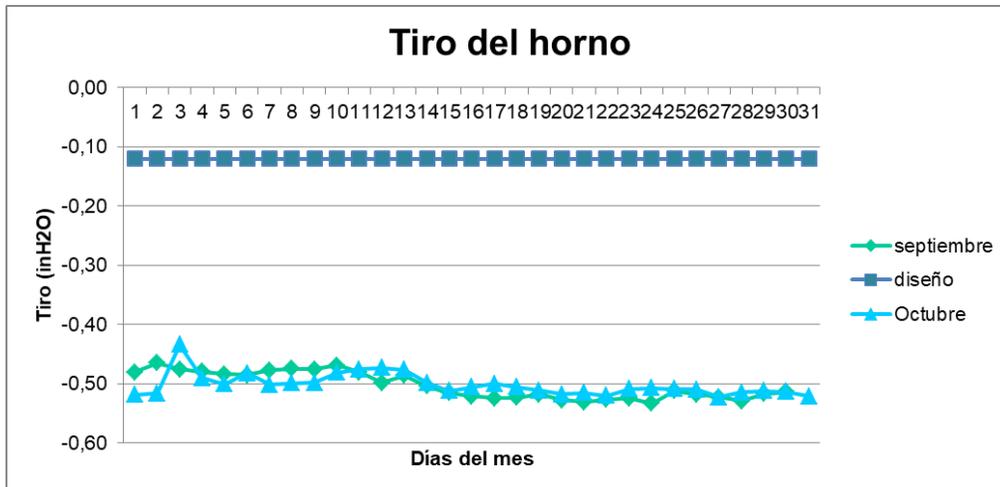


Figura 4.22 Comportamiento del tiro del dámper en el horno F-1101B, correspondiente a septiembre y octubre de 2023

4.1.8 Flujo de entrada de crudo diluido (DCO)

La importancia de la evaluación e inspección de esta variable radica principalmente en que una distribución uniforme del flujo de crudo diluido en los cuatro pasos de cada horno atmosférico que conforma la unidad DRU, garantiza una eficiencia térmica adecuada en el proceso de calentamiento del DCO, que luego pasar  a la torre de destilación atmosférica T-1101. En la figura 4.23 a 4.26 se observa, el comportamiento de esta variable.

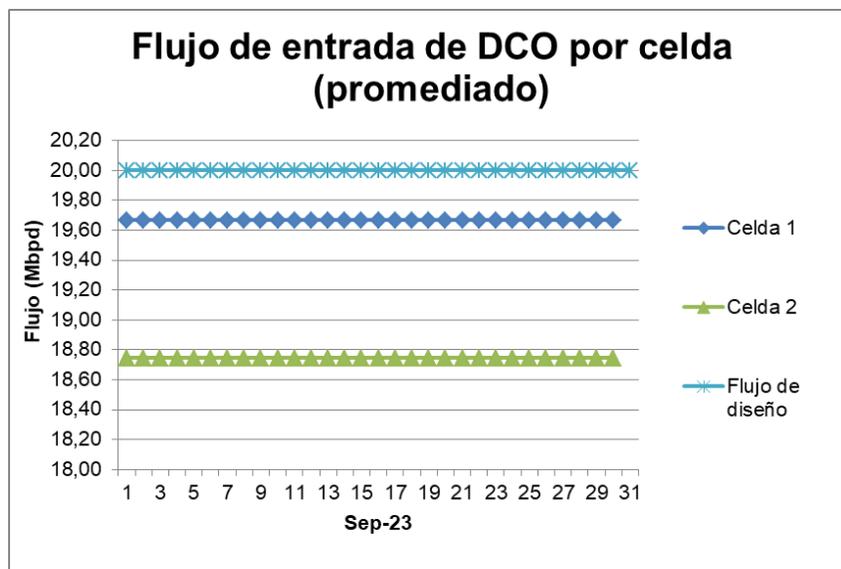


Figura 4.23 Flujo de entrada de DCO por celda del horno F-1101A (sep 2023)

Se observó que en el horno atmosférico F-1101A, la carga de flujo promedio, por cada celda, durante los meses en estudio fue de 19,67 Mbbpd en la celda 1 y 18,75 Mbbpd en la celda 2 durante septiembre, mientras que en octubre (figura 4.24) la carga de flujo promedio en las celdas 1 y 2 del mismo horno fueron de 19,61 Mbbpd y 19,32 Mbbpd, respectivamente.

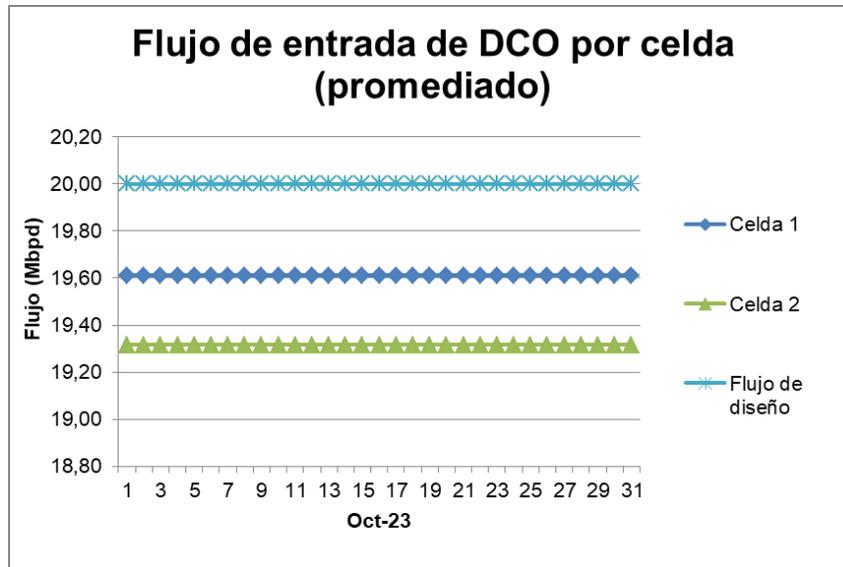


Figura 4.24 Flujo de entrada de DCO por celda del horno F-1101A (oct 2023)

Por su parte, con el seguimiento de la carga de crudo diluido en el horno atmosférico F-1101B, se determinó que durante el mes de septiembre el flujo de DCO promedio de entrada en las celdas 3 y 4 fue de 20,21 Mbpd y 19,34 Mbpd respectivamente, mientras que el estudio realizado por el mes de octubre de 2023, en las celdas 3 y 4 del mencionado horno, determinó que la carga promedio de DCO fue de 19,02 Mbpd y 19,10 Mbpd, respectivamente. La figura 4.25 y figura 4.26 muestran, gráficamente, lo descrito.

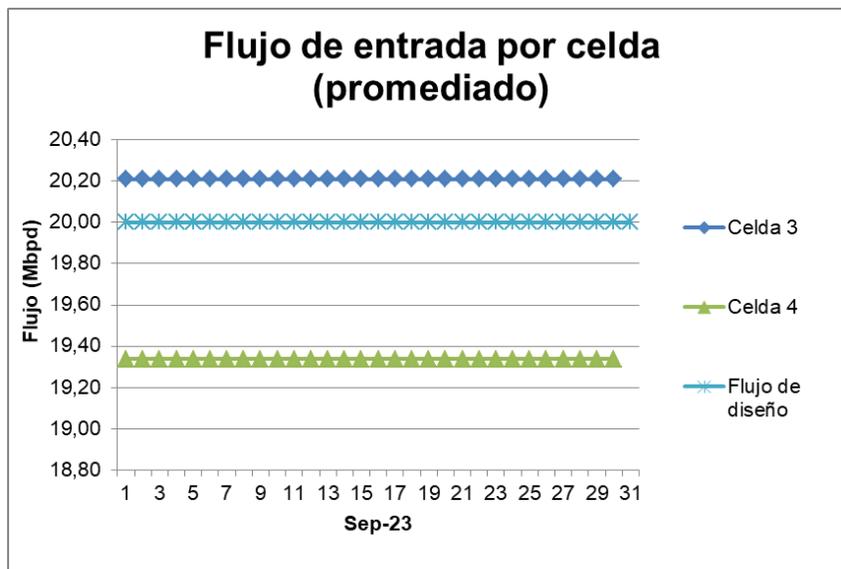


Figura 4.25 Flujo de entrada del DCO por celda del horno F-1101B (sep 2023)

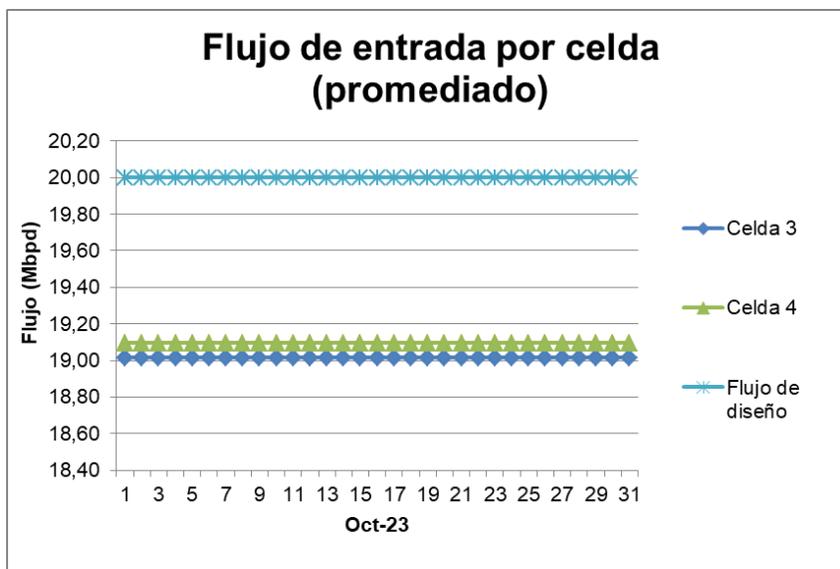


Figura 4.26 Flujo de entrada del DCO por celda del horno F-1101B (oct 2023)

Con todo lo anterior se pudo determinar también que la carga total en el horno atmosférico F-1101A fue, en promedio, de 37,82 Mbpd y 38,93 Mbpd en septiembre y octubre, respectivamente. A su vez, en el horno atmosférico F-1101B se registró que la carga promedio durante los meses en estudio, fueron 40,16 Mbpd y 38,11 Mbpd de crudo diluido, respectivamente.

Además, de acuerdo a las figuras 4.23 y 4.25, se observa que la distribución de carga uniforme en los hornos atmosféricos F-1101 A/B no se cumple puesto que, en primer lugar, como ya se ha mencionado, las condiciones de operación se encuentran fuera del diseño por lo que la carga es más baja a los 20 Mbpd que sugiere el fabricante. En segundo lugar, el comportamiento mostrado en dichas gráficas, se debe a que la distribución de la carga en los hornos atmosféricos no es uniforme, lo que desfavorece tanto la absorción de la energía por parte del flujo de proceso en las distintas zonas de los hornos atmosféricos, así como el balance térmico en los mismos.

Así mismo, se identificó que la condición de distribución que presenta la carga se debió a fallas en algunos indicadores que envían señales erróneas o desviadas lo que no permitió realizar una distribución uniforme y adecuada a través de los pasos de los hornos atmosféricos F-1101 A/B. Es importante mencionar, además, que los cambios o variaciones en las cargas del DCO a través de los pases debido a limitaciones en las válvulas controladoras de flujo, incrementan la posible formación de coque en las paredes de los tubos de los hornos, por lo que resulta importante realizar ajustes que permitan la uniformidad de entrada del DCO a los hornos atmosféricos F-1101 A/B y así obtener la eficiencia adecuada en el proceso.

4.1.9 Flujo de gas combustible

Controlar y monitorear constantemente el flujo de gas combustible en los hornos atmosféricos de crudo F-1101 A/B, de la unidad DRU, resulta importante para lograr una mezcla adecuada entre el gas combustible y el aire atmosférico que permita una reacción de combustión completa, para así generar los gases de combustión que fluyen

hacia la chimenea de los hornos, calentando el crudo diluido por convección, maximizando la eficiencia térmica del proceso de combustión dentro de los mismos.

En las figuras 4.27 a 4.30 se muestran el monitoreo realizado de esta variable en los mencionados hornos atmosféricos, lo que se permitió evaluar el comportamiento del gas combustible, siendo este el gas natural (GN) durante el tiempo de estudio.

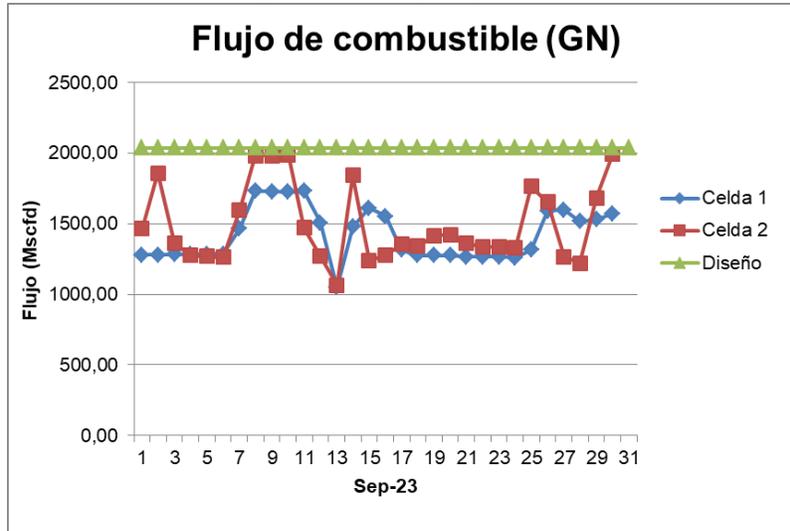


Figura 4.27 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A (sep 2023)

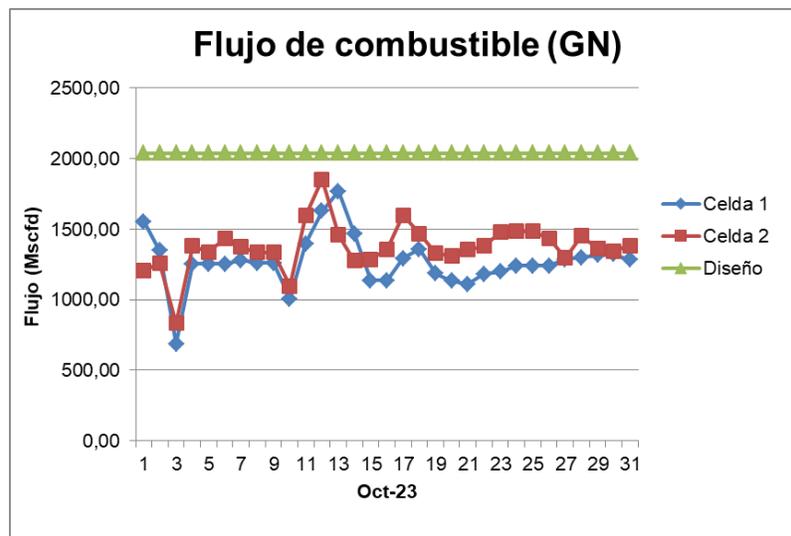


Figura 4.28 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A (oct 2023)

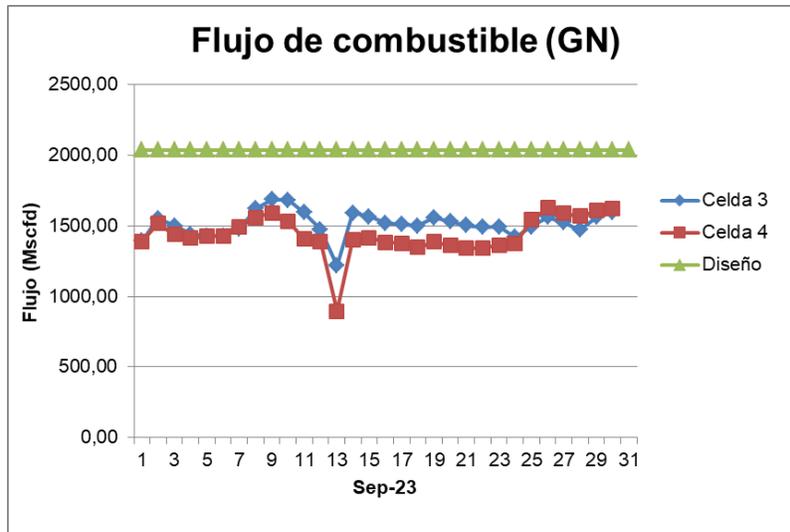


Figura 4.29 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 3 y 4 del horno atmosférico F-1101B (sep 2023)

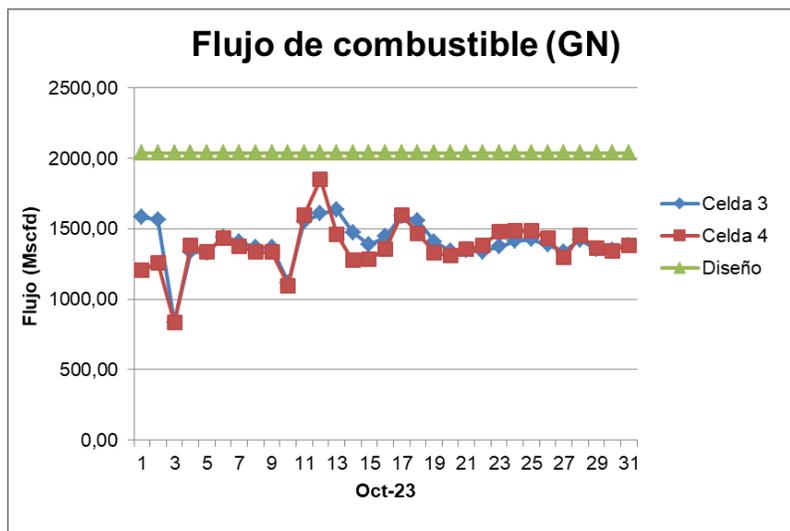


Figura 4.30 Flujo de gas natural en el pase 1 de las celdas 3 y 4 del horno atmosférico F-1101B (oct 2023)

Las gráficas observadas, en las figuras 4,26 a 4.30, evidenciaron que, como era de esperarse (debido a la condición del turndown), que el flujo de gas combustible actual (gas natural), es menor al flujo de gas combustible establecido por diseño (que es gas de refinería), siendo el mismo de 2.038 Mscfd por celda. Sin embargo, aunque se opere a carga mínima, el flujo de gas natural (actual) que participa en la reacción de combustión en los hornos atmosféricos F-1101 A/B es relativamente cercano al flujo de gas combustible de diseño, es decir, es más de la mitad de la carga que debería entrar por celda de acuerdo a la condición operacional. Los flujos promedios de gas natural para las celdas los hornos atmosféricos F-1101 A/B se observan en la siguiente tabla de resultados (promediados)

Tabla 4.3 Flujo de gas natural promedio en Mscfd en cada celda de los hornos atmosféricos F-1101 A/B durante el tiempo en estudio (sep-oct de 2023)

N° de celda	F-1101A	
	septiembre	octubre
Celda 1	1.420,59	1.270,19
Celda 2	1.490,12	1.373,54
N° de celda	F-1101B	
	septiembre	octubre
Celda 3	1.513,66	1.402,70
Celda 4	1.438,02	1.420,38

Con lo observado en la tabla 4.3, se determinó que el resultado obtenido para el flujo de gas natural utilizado en la reacción de combustión, (que como se describió anteriormente es cercano al flujo utilizado a condición de operación normal), se debió a que el poder calorífico inferior de este es menor al del gas de refinería y por lo tanto se consume más de la mitad del flujo de gas natural para alcanzar la eficiencia térmica requerida en los hornos atmosféricos de la unidad DRU a carga mínima. Si, por el contrario, se lleva a cabo el proceso de calentamiento del crudo a condiciones de operación normal (diseño) el flujo de gas natural utilizado en el proceso de combustión dentro de los hornos atmosféricos F-1101 A/B superaría al flujo de gas combustible establecido para el diseño debido la diferencia del poder calorífico inferior entre el gas natural y el gas de refinería.

4.2 Determinación de la eficiencia térmica (diseño y actual) de los hornos atmosféricos F-1101 A/B

La determinación de la eficiencia térmica de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas, se realizó, como fue descrito en el capítulo anterior, mediante el uso del simulador Pro/II versión 2023 para así poder comparar los resultados obtenidos, mediante estos cálculos, con los valores sugeridos por la hoja de datos de los fabricantes de dichos hornos atmosféricos, para el caso diseño, y con una hoja de cálculo basada en la norma API 560 (realizada con la herramienta Excel y que es utilizada para evaluar el comportamiento de los hornos atmosféricos en el mejorador), para el caso de operación actual.

Los resultados obtenidos para ambos casos de operación fueron validados comparando el margen de desviación o desviación porcentual, considerando como principal variable o parámetro a comparar, la eficiencia térmica, además del calor absorbido por el crudo diluido, el calor liberado en el proceso de combustión dentro de los hornos atmosféricos F-1101 A/B y la temperatura de salida del crudo. En la tabla 4.4 se reportan los resultados de estos parámetros junto con los porcentajes de desviación para el caso de diseño.

El porcentaje de desviación fue calculado con la diferencia entre el valor de diseño y el valor obtenido en la simulación, dividido (tal diferencia) entre el valor de diseño y multiplicando por 100. A modo de ejemplo, se muestra el cálculo del porcentaje de desviación de la eficiencia observada en la tabla 4.4.

$$\text{Eficiencia} = \frac{82,3 - 85,23}{82,3} \times 100 = -3,56$$

Tabla 4.4 Porcentajes de desviación de los resultados obtenidos para los principales parámetros evaluados en la simulación del caso diseño

Parámetro (unidades)	Hoja de datos	Simulación	% de desviación
Eficiencia (%)	82,3	85,23	-3,56
Calor absorbido (MMBtu/h)	181,82	195,17	-7,34
Calor generado (MMBtu/h)	231,9	229,02	1,24
COT del DCO (°F)	725	730,3	-0,73
Flujo de vapor formado (lb/h)	373.693	280.507	24,94

El porcentaje de desviación obtenido entre los resultados de la simulación y los de la hoja de datos del fabricante, fueron pequeños por lo que consideró validado el modelo excepto el flujo de vapor formado. Los porcentajes de desviación negativos, indican que los resultados obtenidos se encuentran por encima de los sugeridos, pero en diferencias pequeñas. Una parte de estas desviaciones se debe a que la hoja de datos del fabricante no contiene la composición del gas de refinería, y la suministrada por la empresa, encontrada en un manual de operación, reproducía en la simulación valores muy alejados del poder calorífico inferior (LHV) y del peso molecular, por lo que se decidió tantear la concentración de algunos compuestos hasta que el LHV y el peso molecular fueran parecidos a las de diseño.

Posteriormente se realizó la simulación con la composición del gas natural actual, para compararlo con los valores del caso diseño, pero usando como gas combustible, el gas natural. En otras palabras, como se comportaría el horno según sus condiciones de diseño (es decir, a capacidad completa), pero alimentado con el gas natural, disponible actualmente en la planta. La tabla 4.5 resume tal comportamiento y en el anexo G se encuentra el diagrama de este modelo simulado.

Tabla 4.5 Resultados obtenidos de los principales parámetros evaluados en la simulación del caso diseño con gas natural actual usado como gas combustible

Parámetro (unidades)	Hoja de datos	Simulación	% de desviación
Eficiencia (%)	81,6	84,96	-4,12
Calor absorbido (MMBtu/h)	190,91	192,66	0,92
Calor generado (MMBtu/h)	234	226,78	3,09
COT del DCO (°F)	725	725*	0
Flujo de vapor formado (lb/h)	373.693	278.053	25,59
LHV (Btu/ft ³)	905	929	-2.65

(*) Especificación

Las desviaciones de esta segunda corrida son comparables a la simulación anterior (caso diseño, pero con gas de refinería), lo que sustenta nuevamente la validez del modelo creado para reproducir la función del horno, excepto la cantidad de vapor formado, que ambos casos dieron por debajo de lo indicado en la hoja de datos. Esto muy probablemente se deba a una caracterización del DCO usada en diseño distinta a la alimentada al modelo.

La hoja de datos de los fabricantes de los hornos atmosféricos F-1101 A/B aporta como información que la eficiencia térmica y el calor absorbido, de los mismos, varía ligeramente de acuerdo al tipo de gas combustible utilizado para la reacción de combustión, es decir, los valores reportados para ambos parámetros son un poco distintos, es por ello que en las tablas 4.4 y 4.5, en la columna "Hoja de datos" las cifras cambian para la eficiencia térmica y el calor absorbido.

En la tabla 4.6 se comparan los valores obtenidos de la simulación caso actual (cuando el horno opera a baja capacidad) con gas natural, con los resultados de la hoja de cálculo usada en la empresa basada en el API 560. En dicha comparación no se consideró el flujo de vapor formado luego del calentamiento del crudo debido a que no se conoce tal valor ya que la hoja de cálculo de Excel no contempla la vaporización del DCO (o no la reporta), tampoco PI. Process Book V.2.3 mide tal parámetro.

Tabla 4.6 Resultados obtenidos de los principales parámetros, evaluados en la simulación del caso actual, vs los obtenidos mediante hoja de cálculo según la norma API 560

Parámetro (unidades)	Hoja de cálculo API 560	Simulación	% de desviación
Eficiencia (%)	84,03	88,19	-4,95
Calor absorbido (MMBtu/h)	105,91	71,43	32,56
Calor generado (MMBtu/h)	126,03	81,01	35,72
COT del DCO (°F)	680	668	1,76

Al comparar los resultados reportados de la hoja de cálculo con los de la simulación, las diferencias fueron mayores y por ende los porcentajes de desviación superaron el 10% sugerido como margen de error. Esto se debió a que hay incertidumbre acerca del valor del flujo de crudo diluido usado en la hoja de datos y la usada como dato en la simulación. En cuanto a la eficiencia, el resultado en ambos casos es cercano ya que es independiente del flujo de DCO.

4.3 Propuestas de mejoras para garantizar un proceso de combustión eficiente en los hornos atmosféricos F-1101 A/B

De acuerdo al desarrollo de la evaluación del proceso de combustión realizada a los hornos atmosféricos F-1101 A/B, y a los resultados obtenidos, mediante los objetivos 1 y 2, de este trabajo de grado, se determinaron las fallas y/o desviaciones que presentan los mismos y que influyen negativamente en el adecuado funcionamiento de estos.

Se plantearon las siguientes mejoras con el objetivo de garantizar un proceso de combustión eficiente en los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas, a fin de que la operación, se lleve a cabo adecuadamente lográndose el calentamiento deseado del crudo en los hornos atmosféricos y cumpliendo así con lo establecido por diseño para los mismos.

4.3.1 Realización de inspecciones periódicas a los quemadores de los hornos atmosféricos F-1101 A/B

La inspección periódica de los quemadores es importante ya que son parte fundamental de los hornos de procesos. Los quemadores de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, de la unidad DRU, tienen una caja de viento, la cual rodea al mismo, permitiendo una mejor distribución del aire que entra a ellos. Estos quemadores, además, cuentan con registros de aire, que son instrumentos manuales, que permiten controlar el flujo de aire atmosférico que entra al quemador para mezclarse con el combustible. Por lo tanto, resultan importantes porque controlan el oxígeno que entra a los quemadores para que se produzca una eficiente reacción de combustión y con ello, llamas uniformes en los hornos atmosféricos F-1101 A/B.

Cada horno atmosférico F-1101 A/B, cuenta con 36 quemadores divididos, en 18 quemadores por cada celda. Se debe considerar la simetría operacional de los quemadores en los hornos atmosféricos de la unidad DRU, esto se refiere a que, tanto la apertura de los registros de gas, como las presiones del mismo, deben ser simétricas, es decir, debe ser igual en cada horno. Se realizaron inspecciones visuales en planta de los mismos, observándose la apertura de los registros de aire, el estatus de los quemadores (si se encontraban en servicio o no) y el patrón de llamas, producido por la mezcla entre el gas natural y el oxígeno del aire.

Lo primero que se pudo observar al realizar la inspección fue si cada quemador se encontraba en servicio o no, obteniéndose que los únicos fuera de servicio en el horno atmosférico F-1101A eran los quemadores número 12, 15 y 18 de la celda 1 y los quemadores número 13 y 14, correspondientes a la celda 2. Por su parte, en el horno atmosférico F-1101B, los quemadores fuera de servicio eran el 2 y 5 de la celda 3 y el 2, 12 y 16, en el caso de la celda 4. El resto de los quemadores de cada horno atmosférico se encontraron en servicio y en completo funcionamiento.

Las tablas 4.7 y 4.8 muestran los parámetros visualizados durante la inspección en campo a los quemadores de los hornos atmosféricos F-1101 A/B. La leyenda de las tablas es la siguiente: Q: número de quemador. E/S: en servicio. F/S; fuera de servicio. R: regular. E: estable, D: distorsionada. Az: azul. N: naranja. A: amarilla.

Tabla 4.7 Resultados de la inspección visual a los quemadores del horno atmosférico F-1101A (marzo 2024)

Quemador	Estatus	% apertura registro de aire	Patrón de llama	Coloración de la llama	Presencia de agua (chispas)	
Celda 1	Q1	E/S	50	R	Az/N	Sí
	Q2	E/S	40	R	Az/N	Sí
	Q3	E/S	50	E	Az/N	No
	Q4	E/S	40	E	Az/N	No
	Q5	E/S	50	R	Az/N	No
	Q6	E/S	50	D	N	Sí
	Q7	E/S	50	D	N	No
	Q8	E/S	50	D	N	Sí
	Q9	E/S	50	E	Az/N	No
	Q10	E/S	40	E	Az/N	No
	Q11	E/S	40	D	N	No
	Q12	F/S	40	-	-	-
	Q13	E/S	40	D	N	Sí
	Q14	E/S	50	D	Az/N	No
	Q15	F/S	0	-	-	-
	Q16	E/S	50	D	Az/N	No
	Q17	E/S	40	D	Az/N	Sí
	Q18	F/S	0	-	-	-
Celda 2	Q1	E/S	10	D	A	Sí
	Q2	E/S	50	R	Az/N	Sí
	Q3	E/S	50	D	Az/N	No
	Q4	E/S	50	R	Az/N	No
	Q5	E/S	50	D	Az/N	No
	Q6	E/S	50	R	Az/N	Sí
	Q7	E/S	40	D	Az/N	No
	Q8	E/S	40	D	Az/N	Sí
	Q9	E/S	50	D	Az/N	No
	Q10	E/S	50	D	N	No
	Q11	E/S	40	D	Az/N	No
	Q12	E/S	10	D	N	No
	Q13	F/S	30	-	-	-
	Q14	F/S	10	-	-	-
	Q15	E/S	40	D	Az/N	No
	Q16	E/S	40	D	Az/N	No
	Q17	E/S	40	D	N	Sí
	Q18	E/S	30	R	Az/N	No

Tabla 4.8 Resultados de la inspección visual a los quemadores del horno atmosférico F-1101B (marzo 2024)

Quemador	Estatus	% apertura registro de aire	Patrón de llama	Coloración de la llama	Presencia de agua (chispas)	
Celda 3	Q1	E/S	50	R	Az/N	Sí
	Q2	F/S	50	R	Az/N	Sí
	Q3	E/S	30	R	Az/N	No
	Q4	E/S	30	R	Az/N	Sí
	Q5	F/S	30	-	-	-
	Q6	E/S	30	R	Az/N	No
	Q7	E/S	50	D	Az/N	Sí
	Q8	E/S	30	D	Az/N	Sí
	Q9	E/S	50	R	Az/N	No
	Q10	E/S	50	R	Az/N	No
	Q11	E/S	50	R	Az/N	Si
	Q12	E/S	50	D	Az/N	No
	Q13	E/S	50	D	Az/N	No
	Q14	E/S	50	D	A	Sí
	Q15	E/S	30	D	Az/N	Sí
	Q16	E/S	50	R	Az/N	No
	Q17	E/S	50	R	Az	No
	Q18	E/S	50	R	Az	No
Celda 4	Q1	E/S	50	R	Az/N	No
	Q2	F/S	60	-	-	-
	Q3	E/S	50	R	Az/N	Sí
	Q4	E/S	50	R	Az/N	No
	Q5	E/S	50	D	Az/N	No
	Q6	E/S	50	D	Az/N	No
	Q7	E/S	50	R	Az/N	No
	Q8	E/S	80	R	Az/N	No
	Q9	E/S	50	D	Az/N	No
	Q10	E/S	30	D	Az/N	No
	Q11	E/S	50	D	Az/N	No
	Q12	F/S	0	-	-	-
	Q13	E/S	50	D	Az/N	No
	Q14	E/S	55	R	Az/N	No
	Q15	E/S	50	D	Az/N	No
	Q16	F/S	50	-	-	-
	Q17	E/S	50	R	Az/N	No
	Q18	E/S	60	E	Az/N	No

Con la inspección de los parámetros, evaluados en visualmente en los quemadores de los hornos atmosféricos, observados en las tablas 4.7 y 4.8, pero poniendo más detalle en el estatus de los quemadores y en la apertura de los registros de aire se pudo observar y determinar que no se cumple con la uniformidad operacional y con la simetría sugerida de forma respectiva a estos parámetros, lo que afecta directamente la transferencia de calor uniforme hacia el DCO en la zona de radiación, generándose con esto, un desbalance en la absorción de calor por parte del crudo, así como un desbalance en el calor generado durante el proceso. Se pudo evidenciar, también, que la mayoría de las mirillas por dónde se observa la llama, producida en el quemador, se encontraban abiertas. Esto último resulta perjudicial puesto que a través de ella entran infiltraciones de aire parásito (lo que se traduce en un exceso de oxígeno) que disminuye la eficiencia del horno.

Finalmente, por las razones mencionadas es que se propone la inspección periódica a los hornos atmosféricos F-1101 A/B, en la que se deben unir las disciplinas especializadas en estos equipos y así garantizar que todos los parámetros se mantengan en especificación, es decir, que se cumpla con uniformidad de la puesta en servicio de los quemadores, que se mantengan cerradas todas las mirillas mientras no se estén realizando ningún tipo de inspección que implique ver el comportamiento de llama desde la zona de quemadores, que los registros de aire tengan una apertura adecuada y que la llama se encuentre estable, y con un color azul característico que se obtiene de la combustión completa del gas natural.

4.3.2 Realización de mantenimiento al dámper de chimenea de cada horno atmosférico (F-1101 A/B)

El dámper de chimenea es, de acuerdo a PDVSA (1995), una compuerta que permite regular el aire que entra al horno y los gases que egresan del mismo por la chimenea, cuya función principal es regular el tiro del horno para mantenerlo en su valor de diseño, el cual, se debe mantener en $-0,12 \text{ inH}_2\text{O}$, para garantizar la eficiencia de la operación en los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU. Por lo tanto, desviaciones significativas de este componente del horno, pueden afectar el buen calentamiento del fluido que pasa a través de los hornos atmosféricos.

Luego de una evaluación a los dámpers de chimenea se obtuvo que, actualmente, el tiro del horno atmosférico F-1101A es $-0,23 \text{ inH}_2\text{O}$, mientras que el horno atmosférico F-1101B registra un tiro de $-0,51 \text{ inH}_2\text{O}$, ambos datos extraídos del programa PI. Process Book V.2.3 considerando, como fecha en estudio, el 13 de noviembre del 2023 (fecha en la que los hornos atmosféricos trabajaron dentro de especificación a las condiciones del turndown); así mismo, se extrajo la apertura del dámper, la cual se registró en 36,60% y 73,26% respectivamente para los hornos atmosféricos F-1101 A/B.

El mal funcionamiento del dámper de chimenea, por lo general, se debe a fallas mecánicas, dificultando el ajuste de este dispositivo, ya que se trata de un componente del horno que opera manualmente. Esto puede tener efectos (negativos) significativos en la eficiencia térmica de los hornos de procesos. Por tal razón, se asume que la desviación registrada en el dámper del horno atmosférico F-1101B es producto de fallas mecánicas del mismo. Se supo posteriormente que en este horno el dámper se

encuentra inmóvil por fallas mecánicas que deben ser reparadas. Es por ello que resulta importante la inspección regular del mecanismo de apertura/cierre del dámper, para mantener el tiro dentro del horno en su rango de especificación y operando de forma adecuada.

Para que se logre la combustión y para que el calentamiento dentro del horno sea el más adecuado, se debe cumplir con la apertura del dámper indicada en la hoja de datos del equipo, así como con el tiro especificado en la misma. Cumplir con dicha especificación resulta importante puesto que un dámper muy abierto (que es el caso del dámper en el horno F-1101B) permite la salida rápida de los gases de chimenea, afectando la transferencia de calor de ellos al flujo de DCO que pasa por los serpentines en la zona de convección. Por otra parte, una apertura de dámper muy pequeña (dámper cerrado) origina un sobrecalentamiento momentáneo por la retención de los gases de combustión en el hogar del horno.

4.3.3 Inversión en analizadores de oxígeno para mejorar la eficiencia de los hornos atmosféricos F-1101 A/B

Medir la cantidad de oxígeno en exceso resulta importante porque afecta la eficiencia de los hornos, influye en el ahorro energético y puede producir emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x), los cuales son gases contaminantes que afectan el medio ambiente. Por tal razón, se debe medir el porcentaje de oxígeno, que se obtiene de la combustión en cualquier horno de procesos, para así ajustar las variables del horno que permiten controlar este parámetro. Para ello se utilizan los analizadores de oxígeno.

Actualmente, el mejorador de crudo Petromonagas no cuenta con la presencia de estos instrumentos para la medición del oxígeno que salen por los gases de combustión de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad recuperadora de diluyente. Por tal razón, el porcentaje de oxígeno de los mencionados hornos atmosféricos ha sido fijado, para fines de cálculo y en sala de control, en un 7% cuyo valor representa el porcentaje obtenido de oxígeno la última vez que se realizó tal medición. Téngase presente que la simulación del horno demostró que para un 20% en exceso de aire, la concentración de oxígeno en los gases de chimenea es de 3,34% molar.

En consecuencia, el porcentaje aire en exceso, manejado actualmente es de un 57,90%, lo cual está muy por encima del 20% considerado en el diseño. Este porcentaje de aire en exceso fue obtenido de la hoja de cálculos llamada “balance de masa y energía” utilizada en el mejorador de crudo Petromonagas y cuya página de inicio de observa en el anexo D.1.

Este hecho es una desventaja para la operación de los hornos atmosféricos de la unidad DRU puesto que no se conoce realmente el porcentaje de oxígeno en exceso que se emplea en la combustión del gas natural con el aire ambiente, a la vez que no permite identificar como hay que ajustar estos parámetros de forma que permitan un adecuado proceso de combustión y así obtener la eficiencia térmica requerida para el proceso en los hornos atmosféricos F-1101 A/B.

Por tal razón, se plantea la propuesta de adquirir analizadores de oxígeno que permitan determinar el porcentaje de oxígeno en los gases de combustión con el objetivo de realizar los ajustes adecuados para garantizar la eficiencia de la combustión

en los mismos. En esa misma línea de ideas, se proponen distintos analizadores de oxígeno que deben ser comparados para así determinar (en otro estudio) cuál es el que más se adecua a las condiciones de operación de los hornos atmosféricos asociados a la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas.

Luego de una sencilla investigación (para fines de este estudio) de los analizadores de oxígeno presentes en el mercado nacional e internacional, se seleccionaron dos propuestas, que se adaptan a la necesidad presente en el mejorador de crudo Petromonagas, Sin embargo, como ya fue mencionado, esto implica un estudio más amplio que puede ser desarrollado a futuro. Los analizadores propuestos en este caso, y que deben ser evaluados, son:

- **Enotec ensitu 7000 O₂ de Dastec**

La empresa Dastec, buscando cumplir con su misión y visión, fabrica analizadores de oxígeno ofreciendo así la marca Enotec Ensitu 7000. Este es un analizador de oxígeno, para altas temperaturas de gases de combustión y altas cargas de polvo, que permite el control de procesos en calderas y hornos industriales, pequeños y medianos, que utilizan todos los combustibles aplicables como, por ejemplo, gas, petróleo y carbón. Es capaz de soportar temperaturas de gases de combustión de hasta 1112 °F, así como altas cargas de polvo (aunque para el caso en estudio esto no resulta relevante) que permiten una medición rápida y continua.

Es un instrumento moderno con una nueva tecnología mediante una aplicación móvil (gratuita) llamada Enotec Remote. Esta aplicación se basa en un diagnóstico remoto que puede ser controlado y configurado desde el celular. Los datos del proceso o analizador se visualizan en tiempo real, mediante una conexión segura hasta 100 metros de distancia.

- **Analizador de oxígeno de óxido de circonio in situ**

De forma general, los analizadores de oxígeno de óxido de circonio in situ se utilizan para medir los niveles de oxígeno y controlar el proceso de combustión en hornos y calderas. Así mismo, se utilizan para regular la relación aire-combustible de los quemadores en un sistema controlado para garantizar un proceso eficiente. También son ideales para controlar y optimizar el exceso de aire en la combustión, permitiendo un importante ahorro de energía.

El analizador de oxígeno de óxido de circonio in situ, presentado por la empresa Fuji Electric, es especialmente diseñado para la medición continua de la concentración de oxígeno en gases de combustión y humos procedentes de calderas, centrales eléctricas, hornos industriales e incineradores. Con este instrumento, ofrecido por tal empresa, se controla y optimiza el exceso de aire en una combustión, dentro de los equipos para los que son fabricados, obteniéndose como resultado un ahorro significativo en el consumo de combustibles.

Cabe destacar que, existen varias versiones de este analizador de oxígeno, destacando entre ellas, el analizador de oxígeno de circonio ATEX. Este es un analizador de oxígeno de óxido de circonio que es adecuado para controlar la combustión en zonas de seguridad con atmósferas potencialmente explosivas (de allí su nombre), cumpliendo con las normas internacionales más exigentes.

El principio de funcionamiento, general, de este analizador de oxígeno se basa en la propiedad del óxido de circonio, que conduce iones de oxígeno al calentarse. El instrumento obtiene la medición de la concentración de oxígeno detectando la fuerza electromotriz generada por la diferencia de contenido del oxígeno entre el aire y el gas de muestra.

La principal ventaja de elegir este analizador de O₂, es que su sonda de óxido de circonio proporciona una medición precisa, de $\pm 1\%$ de la concentración de óxido medida, además de una alta estabilidad en el tiempo. Este sistema es adecuado para procesos que implican altas temperaturas de hasta 1500 °C, dependiendo del tipo de analizador de oxígeno de óxido de circonio elegido.

4.4 Conclusiones

1. Se identificaron las principales variables que afectan directamente el proceso de combustión en los hornos atmosféricos F-1101 A/B, las cuales son: la temperatura de entrada y salida del DCO, temperatura de los gases de combustión, temperatura del metal de tuberías, la presión del crudo y de los gases de combustión, el tiro del dámper de los hornos y los flujos de DCO y de gases de combustión.
2. Dentro de las variables más significativas de la que se tiene una mala lectura se encuentra la medición de la temperatura de entrada del DCO al horno atmosférico F-1101B debido a que el instrumento se encuentra dañado por lo que esta variable, en dicho horno, presentó una amplia desviación.
3. La mayoría de las variables identificadas no se encuentran en sus valores de diseño debido a que la planta, actualmente, trabaja a baja capacidad, es decir, a mínima carga.
4. Se determinó, mediante una simulación en Pro/II 2023, que la eficiencia térmica actual de los hornos atmosféricos F-1101 A/B es de 88,19%.
5. La eficiencia térmica actual de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, obtenida en la simulación para el caso diseño fue de 85,23 % vs 82,3% según la hoja de datos de equipo cuando se utiliza gas de refinería como combustible y de 84,96 % reportado por la simulación con gas natural vs 84,03 % según la hoja de cálculo usada en la empresa.
6. Las propuestas de mejoras planteadas están orientadas a inspecciones y mantenimientos periódicos, e inversiones en equipos de medición para restaurar las malas lecturas y ausencia de ellas en los hornos atmosféricos F-1101 A/B, que son necesarias para garantizar un proceso de combustión eficiente en los mismos.

4.5 Recomendaciones

1. Realizar evaluaciones y calibraciones frecuentes a todos los instrumentos asociados al sistema de control, de los hornos atmosféricos F-1101 A/B, para evitar fallas en las indicaciones de las variables y/o parámetros operacionales que eventualmente puedan derivar en una falsa lectura o en una interpretación errada de las mismas.

2. Reparar urgentemente el mecanismo de control de apertura del dámper de la chimenea del horno F-1101 B.
3. Considerar la inversi3n en analizadores de oxígeno en los gases de chimenea de los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas, ya que es uno de los parámetros más influyentes en la eficiencia de dichos hornos atmosféricos.
4. Realizar los mantenimientos preventivos y las inspecciones en plantas que requieran los quemadores y tuberías asociados a los hornos atmosféricos F-1101 A/B a fin de evitar que factores externos, como aire parásito, influyan en la eficiencia térmica dentro los mismos.

5 BIBLIOGRAFÍA

American Petroleum Institute. (2007). *Fired Heaters for General Refinery Service*. ANSI/API Standard 560.

<https://arsenalgroup.ru/upload/iblock/ab6/ab66d5363f1736ff4ad5191c94f484b5.pdf>

Aveva (2021-2025). *Aveva Pro/II simulation*

<https://www.aveva.com/es-es/products/pro-ii-simulation/>

CCEWOOL Insulation fiber (2021). *Horno atmosférico*.

<https://corporacionkbbo.com/cursos-de-programas-computacionales/>

Costa, L.A., Díaz Catrillón, E., Biset, S. y Bosani, J.P.L. (2016). Seguimiento energético de hornos de procesos. *Petrotecnia*. 1(14-30).

https://www.petrotecnia.com.ar/abril16/Sin_Publicidad/Seguimiento.pdf

Cortez Roblas, M.A. (s.f). *Desarrollo de una aplicación para el diseño de hornos de procesos* [Tesis de grado. Universidad Carlos III de Madrid].

<https://core.ac.uk/download/pdf/44310674.pdf>

Jiménez G, E. y Jiménez M, E. (2008). *Tema 2: Principios básicos de la combustión*. [Diapositiva de PowerPoint]. Departamento de ingeniería de procesos. Mejorador Petromonagas.

Jiménez, E. (s.f). *Entonación operacional continua (EOC) de hornos de procesos*. Arveng training and engineering.

<https://arvengtraining.com/entonacion-operacional-continua-eoc-de-hornos-de-proceso/>

Luna, C. (2010). *Modelo predictivo de la operación de horno planta Topping 1 de ERA*. [Tesis de grado. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso].

http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-4000/UCG4018_01.pdf

Macadan, F. y Brito, C. (2018). *Instrucción de trabajo para evaluación de hornos de procesos*. (Informe inicial). Bev, C.A.

NutecBickley. (2019). *Beneficios de un buen control de la relación aire/combustible en hornos industriales y como calcularlo*.

<https://nutecbickley.com/es/newsroom/articulos/beneficios-de-un-buen-control-de-la-relacion-aire--combustible-en-hornos-industriales-y-como-calcularlo>

Operador petrolero. (2015). *Hornos y combustión*. Operaciones petroleras.

<https://operadorpetrolero.blogspot.com/2015/01/hornos-y-combustion.html>

- Petróleos de Venezuela S.A. (1995). *Hornos.Principios básicos*. (MDP-05-F-01).
http://www.intevep.pdv.com/santp/mdp/hornos/mdp_05_f_01.pdf
- Tecnológico de Monterrey. (s.f). Factores de la demanda. *Distribución de la energía eléctrica*. 1(2).
https://repositorio.tec.mx/ortec/bitstream/handle/11285/632620/13_t4s3_c11_pdf_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vega Ángeles, J.L. (2014). *Optimización del proceso de combustión del horno petrolero 311-H1, para mejorar su eficiencia en la refinería Iquitos-Petroperu*. [Tesis de grado. Universidad Nacional del Centro del Perú].
<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3217>
- Wettles, R.S. (2010). *Evaluación técnico-económico y ambiental de las condiciones actuales de operación del horno H-751 de la unidad DA-1 de la refinería de Puerto La Cruz-PDVSA*. [Tesis de grado. Universidad de Oriente].
<http://ri2.bib.udo.edu.ve:8080/bitstream/123456789/4375/2/078-TESIS.IQ.pdf>

ANEXOS

**Anexo A. Tablas de variables operacionales de los hornos F-
1101A**

Tabla A.1 Variables de temperaturas (I) del horno atmosférico F-1101A, oct 2023

F-1101A	Variables de temperatura (I)							
	Salida (COT)				Entrada (zona de convección)			
	Celda 1		Celda 2		Celda 1		Celda 2	
Fecha	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
1/10/2023	649,92	666,78	653,75	653,75	409,57	409,57	409,57	409,57
2/10/2023	661,25	673,58	646,56	646,56	411,12	411,12	411,12	411,12
3/10/2023	442,4	663,51	660,48	660,48	272,83	272,83	272,83	272,83
4/10/2023	661,9	668,98	659,97	659,97	417,99	417,99	417,99	417,99
5/10/2023	667,38	667,81	659,99	659,99	426,50	426,50	426,50	426,50
6/10/2023	650,96	664,07	659,98	659,98	409,73	409,73	409,73	409,73
7/10/2023	661,78	642,13	650,44	650,44	415,25	415,25	415,25	415,25
8/10/2023	665,12	617,55	636,65	636,65	421,21	421,21	421,21	421,21
9/10/2023	664,84	626,1	636,86	636,86	420,78	420,78	420,78	420,78
10/10/2023	598,4	638,54	644,56	644,56	375,89	375,89	375,89	375,89
11/10/2023	651,14	649,99	661,2	661,2	407,99	407,99	407,99	407,99
12/10/2023	639,4	680,06	660,33	660,33	402,36	402,36	402,36	402,36
13/10/2023	648,32	677,91	509,1	509,1	403,04	403,04	403,04	403,04
14/10/2023	666,99	605,71	638,12	638,12	416,37	416,37	416,37	416,37
15/10/2023	665,34	645,45	646,6	646,6	430,39	430,39	430,39	430,39
16/10/2023	658,64	678,72	658,02	658,02	425,61	425,61	425,61	425,61
17/10/2023	644,87	670,36	657,92	657,92	411,76	411,76	411,76	411,76
18/10/2023	666,9	677,79	658,01	658,01	419,24	419,24	419,24	419,24
19/10/2023	670,3	667,89	659,86	659,86	430,31	430,31	430,31	430,31
20/10/2023	666,05	674,28	671,12	671,12	433,00	433,00	433,00	433,00
21/10/2023	665,37	675,99	668,07	668,07	431,90	431,90	431,90	431,90
22/10/2023	680,36	678,75	666,08	666,08	430,11	430,11	430,11	430,11
23/10/2023	655,69	672,88	664,99	664,99	422,04	422,04	422,04	422,04
24/10/2023	651,44	673,43	665,03	665,03	417,00	417,00	417,00	417,00
25/10/2023	651,57	646,49	644,03	644,03	415,88	415,88	415,88	415,88
26/10/2023	660,72	666,65	650,6	650,6	422,43	422,43	422,43	422,43
27/10/2023	674,69	673,15	652,83	652,83	443,50	443,50	443,50	443,50
28/10/2023	654,72	685,35	655,00	655,00	423,21	423,21	423,21	423,21
29/10/2023	659,2	661,69	646,19	646,19	421,69	421,69	421,69	421,69
30/10/2023	672,96	644,22	636,73	636,73	429,54	429,54	429,54	429,54
31/10/2023	670,31	676,53	670,00	670,00	429,65	429,65	429,65	429,65

Tabla A.2 Variables de temperaturas (II) del horno atmosférico F-1101A, oct 2023

Variables de temperatura (II)												
F-1101A	TMT entrada				TMT medio				TMT salida			
Fecha	Celda 1		Celda 2		Celda 1		Celda 2		Celda 1		Celda 2	
	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
1/10/2023	912,36	834,97	717,99	636,66	716,25	793,53	718,75	672,85	95,20	642,47	716,44	711,22
2/10/2023	962,64	905,46	702,03	633,00	727,84	822,16	702,01	661,83	92,54	662,92	690,89	698,28
3/10/2023	586,76	519,90	476,98	444,65	481,80	515,87	478,47	463,62	92,66	433,73	457,95	481,07
4/10/2023	900,90	817,19	705,00	658,64	728,48	796,10	738,45	705,72	96,81	667,49	704,85	726,75
5/10/2023	910,05	828,60	706,02	657,22	734,36	807,85	739,79	704,19	94,96	674,75	707,37	727,26
6/10/2023	910,81	831,56	702,22	646,09	714,16	804,95	750,41	710,95	92,18	658,95	710,64	744,51
7/10/2023	923,99	843,82	703,08	648,63	728,36	816,33	749,47	711,03	93,40	669,92	711,57	743,19
8/10/2023	919,56	842,54	703,42	650,38	731,16	820,37	747,89	709,70	94,58	672,87	711,37	740,81
9/10/2023	919,44	842,40	703,44	650,58	731,48	819,95	748,01	709,82	95,70	672,45	711,37	740,73
10/10/2023	799,37	733,87	639,21	597,89	648,48	718,72	653,48	632,98	93,27	604,31	629,85	658,82
11/10/2023	888,06	806,57	763,90	692,39	710,37	797,02	736,59	722,72	94,86	652,01	725,14	751,34
12/10/2023	830,18	750,80	792,39	676,01	696,94	809,52	738,73	717,74	94,23	637,63	730,79	744,10
13/10/2023	866,81	784,08	771,91	671,18	709,31	806,43	748,38	707,83	95,08	647,82	748,63	744,27
14/10/2023	926,45	845,12	742,29	656,38	731,41	827,61	743,77	693,16	95,90	675,42	739,85	732,15
15/10/2023	935,87	840,42	734,36	661,58	734,47	836,74	744,86	692,02	95,02	671,99	735,48	732,91
16/10/2023	929,24	838,09	739,79	661,86	724,18	825,40	746,81	694,16	94,18	665,98	737,04	736,28
17/10/2023	924,43	840,59	783,26	675,49	708,90	807,95	755,13	709,97	93,31	651,46	754,37	750,35
18/10/2023	948,02	862,27	752,20	662,89	736,50	824,12	752,47	700,74	93,98	666,07	746,02	742,91
19/10/2023	975,73	901,89	713,27	651,80	734,96	828,34	739,36	693,01	95,14	670,74	729,54	730,52
20/10/2023	954,97	888,25	713,35	657,49	727,88	826,82	739,32	698,30	95,06	669,80	730,94	734,62
21/10/2023	942,66	879,24	716,12	659,07	720,51	822,51	742,59	700,84	94,77	669,69	735,36	737,13
22/10/2023	977,04	910,06	725,09	661,66	737,65	831,68	750,70	705,22	91,00	680,43	743,09	741,67
23/10/2023	950,02	885,08	736,45	661,92	711,12	807,07	754,53	705,09	94,53	663,38	748,39	744,50
24/10/2023	942,87	873,80	734,26	659,87	707,95	799,83	756,79	704,53	94,27	659,82	749,05	744,82
25/10/2023	943,96	873,61	734,83	660,25	708,28	800,17	756,83	704,94	91,89	659,97	749,23	745,41
26/10/2023	966,09	895,23	729,07	659,38	718,00	811,39	752,60	703,83	93,20	668,27	744,66	742,44
27/10/2023	980,51	884,72	728,63	667,82	733,81	823,70	748,50	709,10	95,05	681,89	741,60	743,61
28/10/2023	921,68	847,11	740,52	670,41	710,89	803,44	762,47	715,78	93,30	664,63	753,74	753,46
29/10/2023	945,82	864,41	724,61	658,17	717,06	812,38	746,65	704,00	94,68	668,89	737,26	741,41
30/10/2023	976,11	885,08	726,40	663,43	733,32	827,33	748,98	708,73	93,19	681,28	739,71	745,24
31/10/2023	959,19	870,28	734,25	667,90	729,19	818,02	756,75	714,22	90,74	676,53	748,62	751,03

Tabla A.3 Variables de presión del horno atmosférico F-1101A, oct 2023

F-1101A	Variables de presión							
	Brea (Crudo en la entrada)				Fuel gas (Gas natural)			
	Celda 1		Celda 2		Celda 1		Celda 2	
Fecha	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
1/10/2023	144,27	155,30	152,78	137,67	6,74	N/A	4,14	N/A
2/10/2023	150,04	156,01	150,35	133,67	5,25	N/A	4,50	N/A
3/10/2023	96,41	100,64	99,85	92,74	9,13	N/A	11,65	N/A
4/10/2023	134,38	134,27	127,68	120,28	8,59	N/A	9,92	N/A
5/10/2023	125,32	124,11	117,64	112,36	8,60	N/A	9,35	N/A
6/10/2023	148,91	146,60	140,48	134,66	8,61	N/A	10,51	N/A
7/10/2023	135,48	133,83	127,58	121,86	8,83	N/A	9,79	N/A
8/10/2023	124,01	122,56	115,77	111,09	8,61	N/A	9,28	N/A
9/10/2023	121,75	120,69	114,21	109,05	8,61	N/A	9,27	N/A
10/10/2023	95,38	94,90	93,72	86,23	6,85	N/A	7,81	N/A
11/10/2023	154,49	161,26	163,04	147,65	7,66	N/A	9,09	N/A
12/10/2023	151,43	160,22	168,44	155,78	8,00	N/A	9,01	N/A
13/10/2023	145,99	153,58	161,61	147,36	8,70	N/A	5,99	N/A
14/10/2023	126,10	130,70	135,67	124,52	6,22	N/A	4,64	N/A
15/10/2023	103,24	108,63	104,91	93,77	3,85	N/A	4,67	N/A
16/10/2023	117,11	123,61	121,17	108,79	3,89	N/A	5,20	N/A
17/10/2023	152,16	161,53	165,35	149,86	4,87	N/A	6,91	N/A
18/10/2023	140,18	150,14	156,79	141,25	5,46	N/A	6,05	N/A
19/10/2023	119,40	124,50	122,01	112,19	5,19	N/A	5,58	N/A
20/10/2023	105,59	108,88	106,92	96,59	4,92	N/A	5,43	N/A
21/10/2023	100,91	103,97	103,24	93,73	5,26	N/A	5,76	N/A
22/10/2023	113,28	118,41	117,10	107,39	5,86	N/A	5,96	N/A
23/10/2023	143,09	146,56	143,13	131,44	5,95	N/A	6,75	N/A
24/10/2023	143,18	147,89	143,33	131,68	6,35	N/A	6,75	N/A
25/10/2023	141,57	145,38	140,98	129,23	6,35	N/A	6,76	N/A
26/10/2023	137,78	141,93	137,41	125,82	6,38	N/A	6,40	N/A
27/10/2023	140,31	145,27	134,91	121,96	8,27	N/A	5,32	N/A
28/10/2023	152,68	160,47	151,77	137,88	7,89	N/A	6,50	N/A
29/10/2023	144,38	151,74	142,94	129,55	8,06	N/A	5,82	N/A
30/10/2023	135,93	142,32	133,70	120,90	8,14	N/A	5,64	N/A
31/10/2023	141,20	148,71	139,94	126,76	7,69	N/A	5,98	N/A

Tabla A.4 Variables en la zona de convección del horno F-1101A, oct 2023

F-1101A	Variables en la zona convección	
	Tiro del dámper	T gas de combustión
Fecha	-	-
1/10/2023	-0,27	450,66
2/10/2023	-0,52	472,64
3/10/2023	-0,40	344,11
4/10/2023	-0,44	467,68
5/10/2023	-0,37	473,76
6/10/2023	-0,19	442,26
7/10/2023	-0,19	455,43
8/10/2023	-0,19	464,29
9/10/2023	-0,19	464,79
10/10/2023	-0,33	427,44
11/10/2023	-0,22	437,38
12/10/2023	-0,19	441,53
13/10/2023	-0,20	444,41
14/10/2023	-0,21	467,52
15/10/2023	-0,23	482,03
16/10/2023	-0,22	468,57
17/10/2023	-0,21	449,18
18/10/2023	-0,21	465,40
19/10/2023	-0,22	483,02
20/10/2023	-0,22	488,86
21/10/2023	-0,22	489,34
22/10/2023	-0,21	485,18
23/10/2023	-0,20	464,87
24/10/2023	-0,20	464,46
25/10/2023	-0,20	465,07
26/10/2023	-0,21	471,94
27/10/2023	-0,21	485,69
28/10/2023	-0,21	459,84
29/10/2023	-0,21	464,16
30/10/2023	-0,21	476,22
31/10/2023	-0,21	472,62

Tabla A.5 Flujos de entrada del DCO a cada pase del horno F-1101A, oct 2023

F-1101A	Flujo de entrada del DCO			
	Celda 1		Celda 2	
	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
1/10/2023	9,42	9,68	9,58	9,22
2/10/2023	9,72	9,66	9,39	8,91
3/10/2023	8,47	8,58	8,64	8,38
4/10/2023	10,21	9,87	9,42	9,55
5/10/2023	10,40	9,99	9,55	9,82
6/10/2023	10,25	9,74	9,35	9,62
7/10/2023	10,33	9,89	9,46	9,77
8/10/2023	10,44	10,03	9,55	9,91
9/10/2023	10,46	10,02	9,57	9,89
10/10/2023	9,54	8,97	9,03	9,62
11/10/2023	9,36	9,29	9,46	10,32
12/10/2023	8,93	8,92	9,39	9,70
13/10/2023	8,83	8,75	9,23	9,42
14/10/2023	9,28	9,17	9,60	9,78
15/10/2023	9,78	9,93	9,70	9,61
16/10/2023	9,63	9,75	9,62	9,52
17/10/2023	9,51	9,62	9,93	9,89
18/10/2023	9,51	9,76	10,33	10,17
19/10/2023	10,03	10,14	10,05	10,15
20/10/2023	10,09	10,06	10,04	9,91
21/10/2023	9,98	9,95	10,07	9,95
22/10/2023	9,71	9,76	9,81	9,87
23/10/2023	10,06	9,95	9,74	9,89
24/10/2023	10,23	10,21	9,91	10,03
25/10/2023	10,27	10,20	9,96	10,03
26/10/2023	10,29	10,20	9,97	10,06
27/10/2023	10,34	10,33	9,58	9,61
28/10/2023	9,95	10,04	9,40	9,53
29/10/2023	9,99	10,09	9,52	9,58
30/10/2023	10,09	10,21	9,58	9,60
31/10/2023	9,99	10,12	9,53	9,55

**Anexo B. Tablas de variables operacionales de los hornos F-
1101B**

Tabla B.1 Variables de temperaturas (I) del horno atmosférico F-1101B, oct 2023

F-1101B	Variables de temperatura (I)							
	Salida (COT)				Entrada (zona de convección)			
	Celda 3		Celda 4		Celda 3		Celda 4	
Fecha	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
1/10/2023	659,96	659,96	688,83	688,83	526,70	519,41	523,96	533,60
2/10/2023	659,26	659,26	685,79	685,79	527,70	520,62	524,90	534,75
3/10/2023	438,24	438,24	456,94	456,94	361,14	361,89	366,77	370,96
4/10/2023	652,89	652,89	682,95	682,95	543,19	542,79	549,74	555,83
5/10/2023	656,66	656,66	685,01	685,01	551,00	551,14	557,93	563,85
6/10/2023	657,87	657,87	682,39	682,39	533,64	533,64	541,17	547,76
7/10/2023	658,08	658,08	678,05	678,05	541,47	540,45	548,62	554,76
8/10/2023	658,02	658,02	678,02	678,02	547,43	544,59	553,97	560,58
9/10/2023	658,00	658,00	677,93	677,93	547,81	544,86	554,23	560,52
10/10/2023	578,14	578,14	595,01	595,01	484,13	482,55	491,03	495,23
11/10/2023	654,86	654,86	669,12	669,12	514,65	514,17	520,57	527,42
12/10/2023	654,81	654,81	679,94	679,94	508,70	507,55	514,49	522,05
13/10/2023	655,12	655,12	680,09	680,09	511,20	511,28	514,88	521,61
14/10/2023	655,89	655,89	680,14	680,14	533,85	531,48	536,84	544,52
15/10/2023	659,95	659,95	679,97	679,97	553,28	552,38	552,10	561,58
16/10/2023	659,84	659,84	679,86	679,86	544,62	544,61	544,24	554,28
17/10/2023	659,96	659,96	679,89	679,89	521,89	521,08	523,10	533,08
18/10/2023	660,12	660,12	680,04	680,04	533,09	532,23	533,88	542,62
19/10/2023	660,12	660,12	680,05	680,05	548,72	548,52	550,03	559,41
20/10/2023	658,97	658,97	679,95	679,95	554,87	551,70	555,26	565,76
21/10/2023	658,15	658,15	680,66	680,66	556,15	554,34	556,22	565,76
22/10/2023	659,47	659,47	667,08	667,08	545,49	547,94	555,94	558,44
23/10/2023	661,31	661,31	664,95	664,95	534,56	539,31	546,85	549,96
24/10/2023	665,00	665,00	669,40	669,40	534,14	539,11	544,75	550,04
25/10/2023	665,03	665,03	670,00	670,00	534,99	540,02	543,56	551,09
26/10/2023	661,74	661,74	670,01	670,01	539,91	544,71	546,85	555,18
27/10/2023	671,34	671,34	681,33	681,33	555,68	558,70	562,76	570,40
28/10/2023	670,96	670,96	682,89	682,89	537,74	537,86	548,24	553,80
29/10/2023	660,10	660,10	679,94	679,94	537,96	538,23	547,73	553,43
30/10/2023	665,47	665,47	680,05	680,05	546,96	547,41	556,82	562,18
31/10/2023	669,94	669,94	679,98	679,98	545,30	545,55	555,56	560,67

Tabla B.2 Variables de temperaturas (II) del horno atmosférico F-1101B, oct 2023

F-1101B	Variables de temperatura (II)											
	TMT entrada				TMT medio				TMT salida			
	Celda 3		Celda 4		Celda 3		Celda 4		Celda 3		Celda 4	
Fecha	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
1/10/2023	685,41	747,46	677,22	690,84	701,34	723,35	731,50	786,05	94,97	700,53	693,24	743,78
2/10/2023	684,52	746,08	673,18	687,60	700,54	721,77	726,89	779,12	93,32	698,70	688,46	738,68
3/10/2023	483,20	489,33	446,55	446,31	468,50	483,56	477,74	472,70	92,60	457,31	449,30	480,65
4/10/2023	684,22	720,77	673,15	688,53	688,07	710,56	719,62	743,29	97,15	681,09	682,36	731,51
5/10/2023	688,88	721,92	675,20	688,87	691,28	712,84	720,30	740,70	93,67	684,08	682,66	731,56
6/10/2023	687,90	732,99	672,92	689,29	695,64	719,02	721,19	749,75	91,99	688,36	685,15	733,16
7/10/2023	688,40	730,33	666,70	682,87	694,57	718,43	712,81	737,41	91,56	687,91	675,90	725,35
8/10/2023	689,50	727,41	664,85	682,85	694,56	715,93	709,42	734,66	94,19	686,63	672,14	725,20
9/10/2023	689,53	727,96	666,82	685,12	694,34	716,53	711,69	738,59	95,51	687,06	674,28	728,33
10/10/2023	608,79	637,86	580,69	591,67	610,62	624,98	615,16	630,21	93,64	603,86	588,18	628,15
11/10/2023	684,46	726,67	660,12	676,78	701,03	715,47	709,59	733,36	95,86	694,64	679,68	716,01
12/10/2023	685,34	730,43	675,17	695,66	703,29	718,61	729,86	768,41	95,50	696,34	699,52	739,57
13/10/2023	683,13	738,64	676,17	684,65	701,02	722,68	726,35	768,63	96,58	704,63	698,27	734,92
14/10/2023	682,47	736,76	672,34	672,99	698,71	715,78	717,29	761,66	96,82	701,03	689,59	726,27
15/10/2023	689,46	734,54	670,27	669,64	703,87	712,76	709,07	740,09	95,96	698,78	682,21	720,38
16/10/2023	688,63	737,13	671,81	670,30	703,65	714,24	711,37	744,96	94,34	700,99	685,31	721,11
17/10/2023	686,52	744,89	676,18	675,56	703,65	723,74	720,60	768,73	94,77	710,26	694,62	730,07
18/10/2023	686,62	743,77	673,39	673,20	703,39	721,97	716,86	761,34	95,24	708,30	690,80	725,37
19/10/2023	688,25	736,35	672,71	672,58	703,52	714,73	714,00	750,90	95,65	700,66	686,99	722,94
20/10/2023	688,49	731,64	668,94	670,23	702,52	709,68	705,76	738,41	94,82	695,77	682,19	721,15
21/10/2023	686,58	733,53	668,99	666,27	700,82	709,59	702,60	726,51	94,61	696,78	683,47	716,18
22/10/2023	680,75	736,52	659,50	651,16	695,35	716,44	690,45	706,55	89,82	703,54	672,54	695,67
23/10/2023	680,23	738,43	658,76	647,51	696,98	720,86	690,89	703,91	94,00	706,87	672,68	691,88
24/10/2023	685,09	742,43	663,37	651,66	702,83	725,09	697,95	710,95	94,64	710,72	678,78	698,38
25/10/2023	687,24	742,70	663,96	652,38	705,26	723,86	698,94	711,82	91,45	709,28	679,42	698,58
26/10/2023	685,21	738,01	663,81	652,83	702,34	717,23	696,92	709,77	93,20	703,13	678,05	698,22
27/10/2023	694,03	743,37	673,16	664,16	710,12	722,75	704,24	719,17	94,30	709,98	687,35	707,64
28/10/2023	690,88	745,79	672,94	665,93	708,61	728,86	709,99	733,33	91,81	715,42	691,54	717,55
29/10/2023	681,18	734,31	668,98	662,41	697,58	715,40	705,56	728,88	94,16	701,52	687,14	712,92
30/10/2023	685,99	740,27	668,80	663,43	702,27	719,95	702,94	724,87	92,97	706,96	684,60	710,94
31/10/2023	689,98	744,93	666,57	660,91	707,14	726,36	699,38	720,42	90,00	712,85	681,37	706,95

Tabla B.3 Variables de presión del horno atmosférico F-1101B, octubre 2023

F-1101B	Variables de presión							
	Brea (crudo en la entrada)				Fuel gas (gas natural)			
	Celda 3		Celda 4		Celda 3		Celda 4	
Fecha	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2	Pase 1	Pase 2
1/10/2023	153,07	159,52	157,01	155,53	6,69	N/A	8,66	N/A
2/10/2023	151,41	157,99	155,35	153,90	6,61	N/A	8,34	N/A
3/10/2023	96,07	98,11	98,25	103,60	9,92	N/A	9,90	N/A
4/10/2023	122,21	125,91	127,03	128,47	8,04	N/A	9,02	N/A
5/10/2023	113,58	116,92	117,21	120,65	7,87	N/A	8,69	N/A
6/10/2023	135,10	139,33	140,59	141,86	9,10	N/A	9,70	N/A
7/10/2023	123,58	126,87	128,58	130,23	8,73	N/A	8,91	N/A
8/10/2023	113,16	115,65	118,64	119,93	8,30	N/A	8,50	N/A
9/10/2023	111,89	113,97	116,95	118,18	8,31	N/A	8,63	N/A
10/10/2023	90,43	91,46	92,09	95,91	7,40	N/A	6,45	N/A
11/10/2023	154,69	159,67	159,22	159,18	8,00	N/A	7,25	N/A
12/10/2023	164,19	171,00	173,84	171,83	8,55	N/A	8,94	N/A
13/10/2023	165,14	171,23	167,28	168,61	7,49	N/A	8,13	N/A
14/10/2023	135,46	140,56	139,49	142,45	5,32	N/A	6,76	N/A
15/10/2023	102,43	107,98	102,17	108,90	4,75	N/A	5,23	N/A
16/10/2023	117,51	123,79	117,51	123,71	5,07	N/A	5,71	N/A
17/10/2023	157,31	164,04	159,54	161,71	6,05	N/A	7,18	N/A
18/10/2023	147,79	153,18	148,51	151,53	5,83	N/A	6,73	N/A
19/10/2023	117,48	122,71	118,72	123,26	4,89	N/A	5,82	N/A
20/10/2023	102,62	106,73	104,58	109,05	4,47	N/A	6,04	N/A
21/10/2023	99,69	102,91	99,63	105,93	4,50	N/A	6,45	N/A
22/10/2023	111,92	110,71	112,01	119,31	4,47	N/A	6,05	N/A
23/10/2023	131,58	131,58	132,35	139,47	4,65	N/A	6,25	N/A
24/10/2023	130,48	131,84	130,92	137,88	4,90	N/A	6,59	N/A
25/10/2023	128,05	132,08	128,47	135,70	4,98	N/A	6,62	N/A
26/10/2023	124,12	129,71	124,78	131,66	4,75	N/A	6,39	N/A
27/10/2023	123,65	129,41	126,87	131,40	4,45	N/A	6,21	N/A
28/10/2023	139,61	143,88	147,61	149,35	4,95	N/A	7,56	N/A
29/10/2023	131,51	136,00	139,24	141,00	4,55	N/A	7,36	N/A
30/10/2023	123,18	127,16	130,13	131,52	4,52	N/A	6,93	N/A
31/10/2023	128,95	132,91	135,89	137,54	4,70	N/A	6,72	N/A

Tabla B.4 Variables en la zona de convección del horno F-1101B, oct 2023

F-1101B	Variables en la zona convección	
	Tiro del dámper	T gas de combustión
Fecha	-	-
1/10/2023	-0,52	519,91
2/10/2023	-0,52	521,82
3/10/2023	-0,43	378,26
4/10/2023	-0,49	508,93
5/10/2023	-0,50	518,42
6/10/2023	-0,48	502,22
7/10/2023	-0,50	511,40
8/10/2023	-0,50	518,40
9/10/2023	-0,50	519,08
10/10/2023	-0,48	466,87
11/10/2023	-0,48	497,96
12/10/2023	-0,47	504,92
13/10/2023	-0,48	498,72
14/10/2023	-0,50	522,40
15/10/2023	-0,51	535,00
16/10/2023	-0,51	525,68
17/10/2023	-0,50	517,75
18/10/2023	-0,51	526,35
19/10/2023	-0,51	535,94
20/10/2023	-0,52	541,22
21/10/2023	-0,52	542,02
22/10/2023	-0,52	532,00
23/10/2023	-0,51	511,83
24/10/2023	-0,51	511,63
25/10/2023	-0,51	512,29
26/10/2023	-0,51	517,37
27/10/2023	-0,52	530,33
28/10/2023	-0,51	514,28
29/10/2023	-0,51	515,54
30/10/2023	-0,51	524,39
31/10/2023	-0,52	522,37

Tabla B.5 Flujos de entrada de DCO a cada pase del horno F-1101B, oct 2023

F-1101B	Flujo de entrada del DCO			
	Celda 3		Celda 4	
	Fecha	Pase 1	Pase 2	Pase 1
1/10/2023	10,34	10,36	10,00	9,45
2/10/2023	10,27	10,32	9,96	9,44
3/10/2023	8,49	8,30	8,43	8,59
4/10/2023	9,70	9,63	9,63	9,30
5/10/2023	9,76	9,73	9,72	9,32
6/10/2023	9,59	9,52	9,47	9,11
7/10/2023	9,73	9,62	9,74	9,33
8/10/2023	9,78	9,74	10,00	9,46
9/10/2023	9,84	9,77	10,05	9,42
10/10/2023	9,13	8,86	9,49	8,39
11/10/2023	9,67	9,54	9,28	9,04
12/10/2023	9,87	9,83	9,78	9,39
13/10/2023	10,29	10,19	9,71	9,46
14/10/2023	10,29	10,31	10,13	10,10
15/10/2023	9,96	10,22	9,37	9,42
16/10/2023	9,90	10,09	9,24	9,23
17/10/2023	10,17	10,13	9,95	9,48
18/10/2023	10,39	10,34	9,98	9,74
19/10/2023	10,20	10,31	9,83	9,82
20/10/2023	9,93	10,19	9,88	9,52
21/10/2023	9,97	10,12	9,62	9,42
22/10/2023	9,87	9,40	9,39	9,12
23/10/2023	9,63	9,17	9,09	9,54
24/10/2023	9,67	9,36	9,10	9,62
25/10/2023	9,67	9,58	9,17	9,60
26/10/2023	9,71	9,70	9,15	9,72
27/10/2023	9,63	9,56	9,21	9,60
28/10/2023	9,58	9,25	9,39	9,54
29/10/2023	9,64	9,36	9,48	9,58
30/10/2023	9,69	9,41	9,55	9,41
31/10/2023	9,66	9,35	9,52	9,58

**Anexo C. Planos mecánicos de los hornos atmosféricos F-
1101A/B (PID y PFD)**

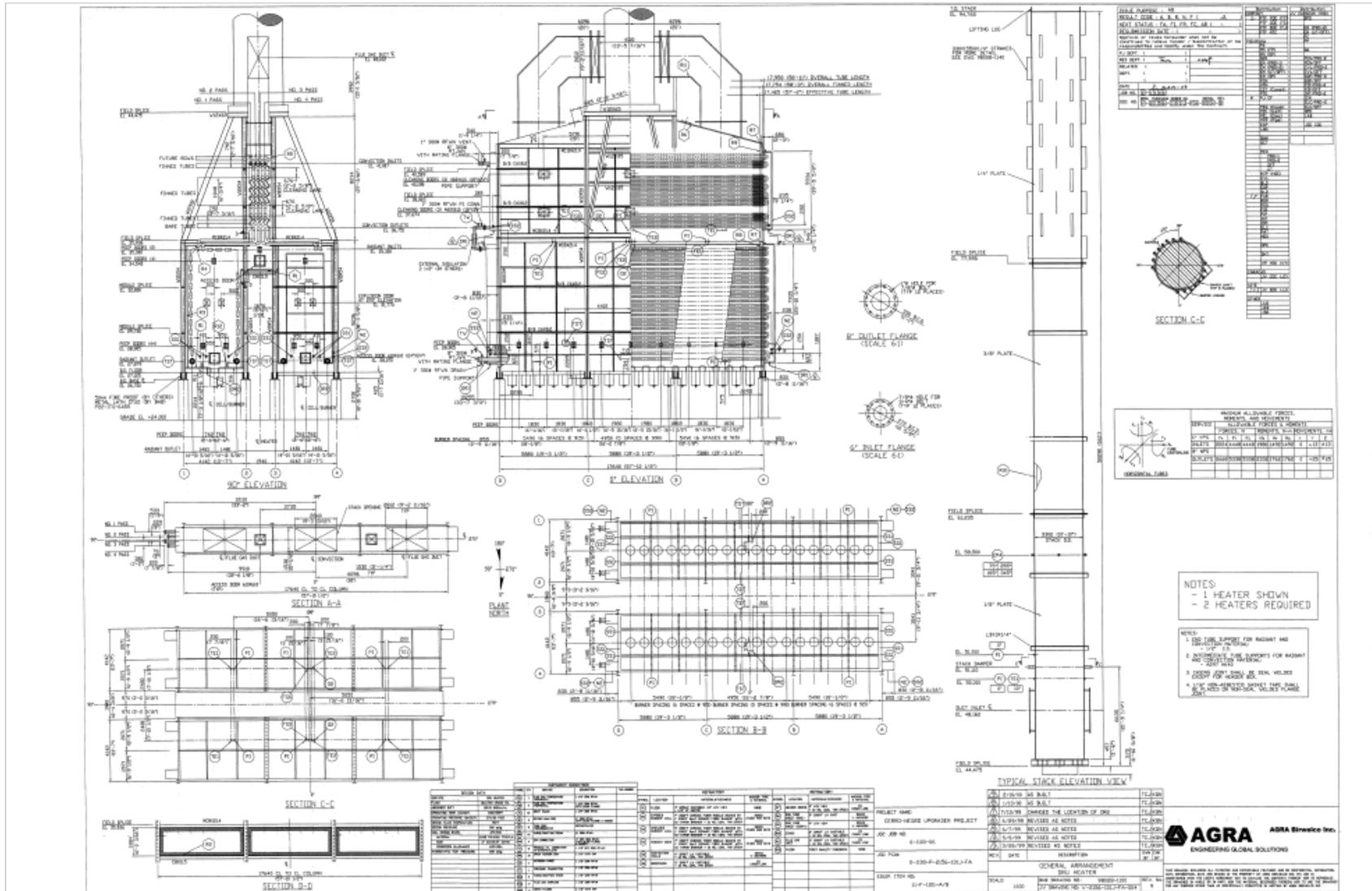


Figura C.1 Arreglo general de los hornos atmosféricos F-1101 A/B

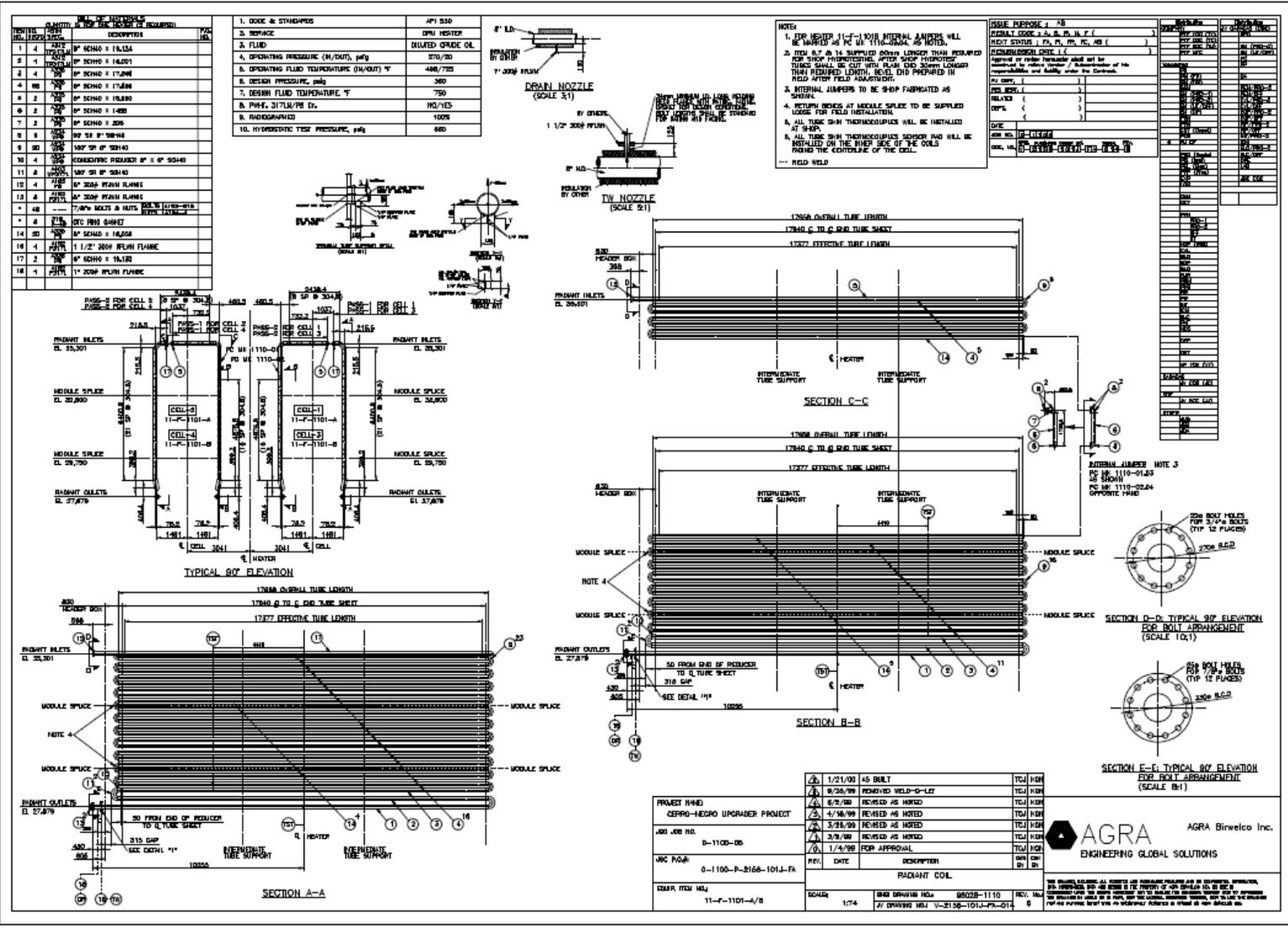


Figura C.2 Serpentin de tubos de la zona de radiación

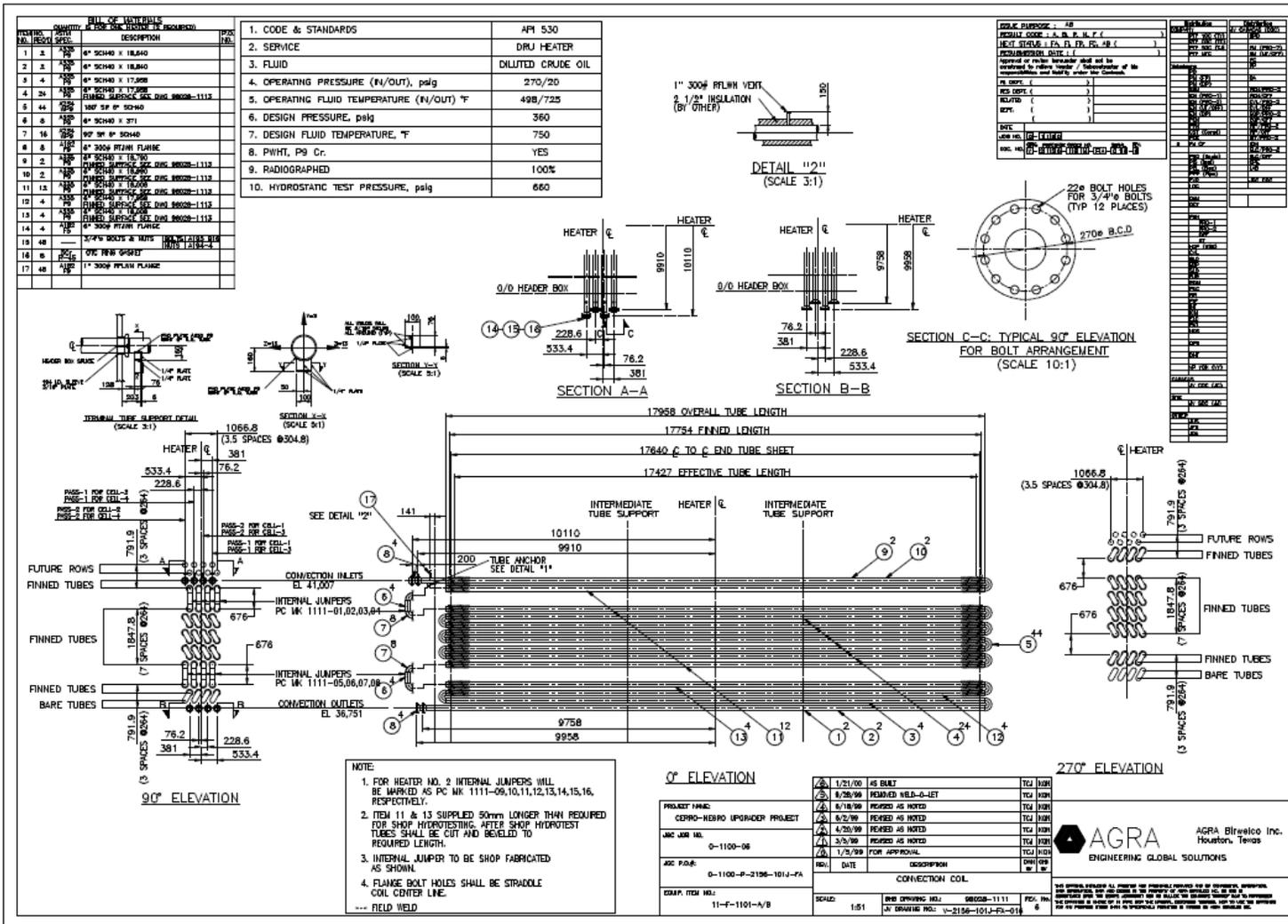
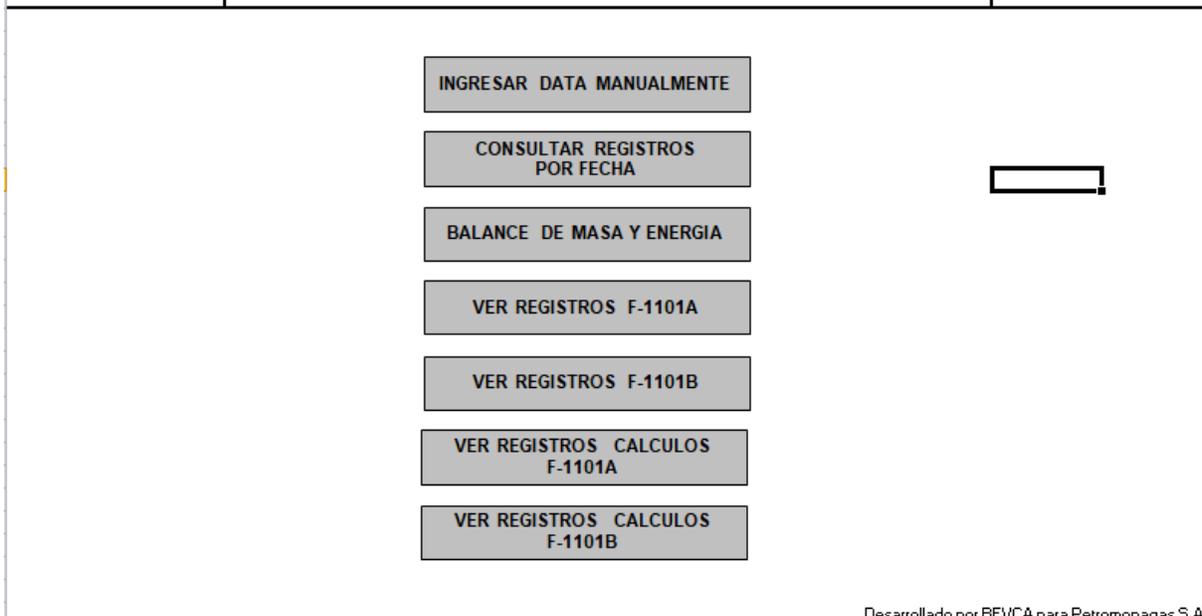


Figura C.3 Serpentin de tubos de la zona de convección

Anexo D. Hoja de cálculo para el balance de masa y energía y para la evaluación de las variables operacionales, realizadas por BEV, C.A para el mejorador de crudo Petromonagas, siguiendo los parámetros expuestos en la norma API ST 560



INGRESAR DATA MANUALMENTE

CONSULTAR REGISTROS POR FECHA

BALANCE DE MASA Y ENERGIA

VER REGISTROS F-1101A

VER REGISTROS F-1101B

VER REGISTROS CALCULOS F-1101A

VER REGISTROS CALCULOS F-1101B

Desarrollado por BEVCA para Petromonagas S.A

Figura D.1 Pantalla de inicio en Excel de la hoja de cálculos para el seguimiento de los hornos atmosféricos F-1101 A/B

		BALANCE DE MASA Y ENERGÍA				<small>Ref. J-30852401-8</small> GUARDAR REGISTRO	
Equipo: F-1101A		Fecha: lunes		Ubicación: Unidad 11 (DRU)		Fecha: 13/11/2023	
Descripción:		ING. DE PROCESOS		VOLVER			

FECHA: 13/11/2023

DATOS REQUERIDOS

FLUJO DE GAS COMBUSTIBLE		TEMPERATURA GASES COMBUSTIÓN	
COMBUSTIBLE	GAS NATURAL	CAJA RADIANTE	CHIMENEA (°F)
CELDA 1 (MSCFD)	1237,60498	CELDA 1 (°F)	1116,347046
CELDA 2 (MSCFD)	1443,138428	CELDA 2 (°F)	1225,276001
TOTAL (MSCFD)	2.680,74		

O2 Medido C1	7,00	O2 Medido C2	7,00
%Aire exceso	57,91 %	%Aire exceso	57,91 %

Figura D.2 Página del balance de masa en la hoja de cálculos de excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 1)

En la imagen mostrada como figura D.2, se observa que la hoja de cálculos permite seleccionar el horno atmosférico a evaluar y la fecha (sombreada en amarillo), mientras que la ubicación del mismo está establecida por defecto. En esta primera parte de la hoja se observan los parámetros y/o variables cuyos valores, a excepción de la temperatura de los gases de combustión, son tomados en general para todo el horno atmosférico correspondiente, es decir, no varía de acuerdo a la celda. Para cada cálculo se siguen una serie de fórmulas ya programadas que implican la extracción de datos desde la sala de control a partir del programa PI. Process Book, V.2.3.

CELDA 1**FLUJO DE GASES DE COMBUSTIÓN**

Aire alimentado (lb/h)	72930,89551
Flujo Fuel Gas (lb/h)	3261,15
Agua en aire (lb/h)	6818,564461
Total	83.010,61

CALOR EN LA ZONA DE CONVECCIÓN

TEMPERATURA (°F)	ENTRADA	1116,347046	SALIDA	477,677063
PRODUCTOS	LB/H	BTU	BTU	
CO2	7620,837333	1996697,061	726844,5679	
H2O	7362,142494	3718207,492	1357813,822	
N2	35426,22003	9687751,804	3653487,391	
AIRE	26744,71373	7175407,245	2679675,974	
TOTAL		22.578.063,601	8.417.821,756	

Calor absorbido (MMBTU/h): 14,16

PERDIDAS POR RADIACIÓN

1,50% estimado (MMBTU/h) 0,87

PERDIDAS CHIMENEA (MMBTU/H) 8,42

CALOR TOTAL GENERADO (MMBTU/h) 58,18

CALOR ABSORBIDO PROCESO (MMBTU/h) 48,89

DISTRIBUCIÓN DE CALOR

Caja Radiante:	60%
Zona Convección:	24%
Perdidas:	16%
	100%

RELACION AIRE/FUEL GAS	22,36
RELACION GCHIM/FUEL GAS	25,45

EFICIENCIA: 84,03 %

Figura D.3 Página del balance de masa en la hoja de cálculos de Excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 3)

En la figura D.3 muestra como se ve la página de los cálculos energéticos realizados para la celda 1 del horno atmosférico F-1101A, para la fecha de estudio del 13 de noviembre del 2023, que sirvieron de comparación para los cálculos obtenidos en la simulación del caso de operación actual.

CELDA 2**FLUJO DE GASES DE COMBUSTIÓN**

Aire alimentado (lb/h)	85042,7879
Flujo Fuel Gas (lb/h)	3802,74
Agua en aire (lb/h)	7950,94764
Total	96.796,47

CALOR EN LA ZONA DE CONVECCIÓN

TEMPERATURA (°F)	ENTRADA	1225,276001	SALIDA	477,677063
PRODUCTOS	LB/H	BTU	BTU	
CO2	8886,45681	2580844,853	847554,2225	
H2O	8584,7996	4805140,285	1583310,778	
N2	41309,578	12496730,2	4260234,996	
AIRE	31186,3032	9261167,029	3124699,264	
TOTAL		29.143.882,37	9.815.799,26	

Calor absorbido (MMBTU/h):	19,33
-----------------------------------	--------------

PERDIDAS POR RADIACIÓN

1,50% estimado (MMBTU/h)	1,02
--------------------------	-------------

PERDIDAS CHIMENEA (MMBTU/H)	9,82
------------------------------------	-------------

CALOR TOTAL GENERADO (MMBTU/h)	67,85
---------------------------------------	--------------

CALOR ABSORBIDO PROCESO (MMBTU/h)	57,01
--	--------------

DISTRIBUCIÓN DE CALOR

Caja Radiante:	56%
Zona Convección:	28%
Perdidas:	16%
	100%

RELACION AIRE/FUEL GAS	22,36
RELACION GCHIM/FUEL GAS	25,45

EFICIENCIA:	84,03 %
--------------------	----------------

Figura D.4 Página del balance de masa en la hoja de cálculos de Excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 4)

La figura D.4 muestra como se ve la página de los cálculos energéticos realizados para la celda 2 del horno atmosférico F-1101A, para la fecha de estudio del 13 de noviembre del 2023, que sirvieron de comparación para los cálculos obtenidos en la simulación del caso de operación actual.

FECHA: 13/11/2023

RESUMEN BALANCE DE MASA Y ENERGIA F-1101A

			CELDA 1	CELDA 2	TOTAL	%MC
Flujo total de Fuel Gas	MSCFD	Max. 2038 / celda	1.237,60	1443,138428	2.680,74	65,77%
%O2 residual	%	3,5-4	7,00	7,00	--	--
Exceso de aire	%	20%	57,91 %	57,91 %	--	--
Flujo gases de Comb.	LB/H	229.485	83.010,61	96.796,47	179.807,08	78,35%
Calor Generado	MMBTU/h	220,5	58,18	67,85	126,03	57,16%
Perdidas Chimenea	MMBTU/h		8,42	9,82	18,23	39,48%
Perdidas Paredes	MMBTU/h	46,19	0,87	1,02		
Calor Abs. Caja Rad	MMBTU/h		34,73	37,68	105,91	58,25%
Calor Abs. Covecc	MMBTU/h	181,82	14,16	19,33		
Distribucion Calor						
Zona radiante	%	55-65	59,70%	55,54%	--	--
Zona Convección	%	20-35	24,34%	28,49%	--	--
Perdidas	%	10-15	15,97%	15,97%	--	--
Eficiencia	%	82,3	84,03%	84,03%	84,03%	--

%MC= Porcentaje de lo esperado a maxima carga (debe oscilar en el porcentaje de carga actual)

Figura D.5 Página del resumen del balance de masa en la hoja de cálculos de Excel de los hornos atmosféricos F-1101 A/B (parte 4)

La imagen mostrada en la figura D5 muestra, a modo de ejemplo y de visualizar la hoja, el cuadro de resumen del balance de masa y energía de las celdas 1 y 2 del horno atmosférico F-1101A, para la fecha de estudio. Este cuadro presenta las variables y parámetros más importantes que influyen en la determinación de la eficiencia térmica de los hornos atmosféricos de la unidad DRU.

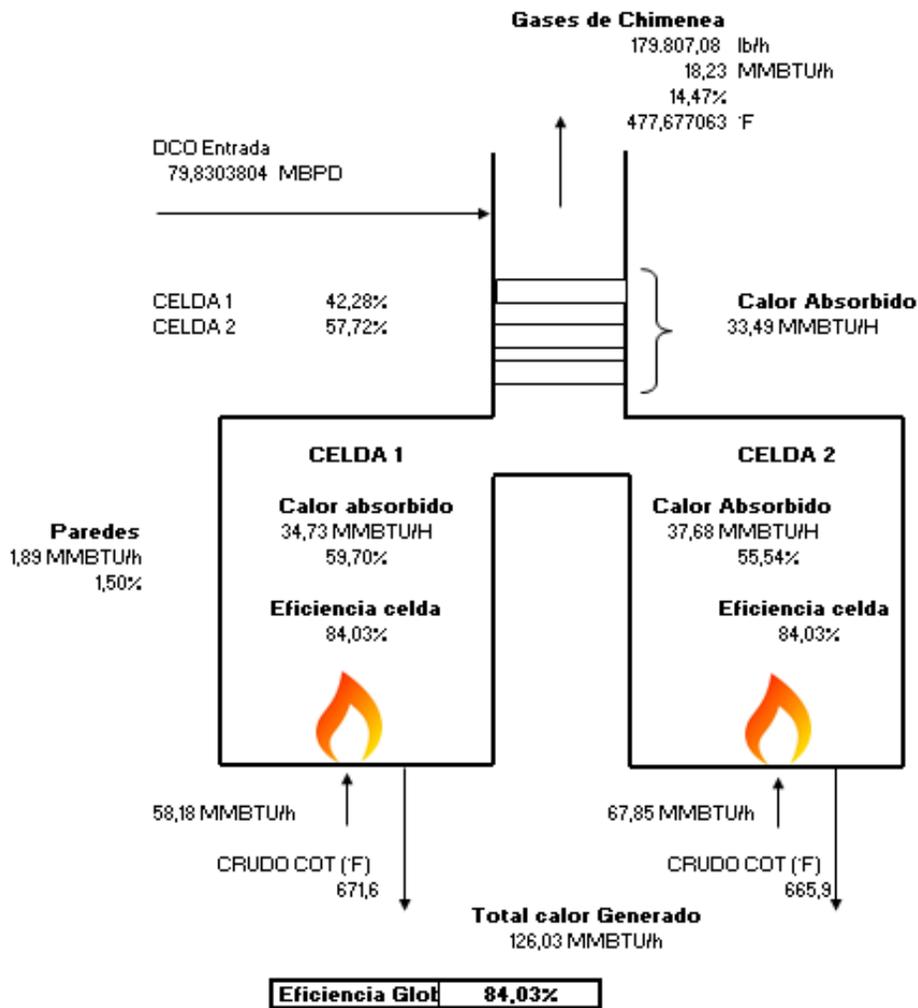


Figura D.6 Esquema final de los resultados obtenidos en la hoja de cálculos de Excel del horno atmosférico F-1101A (parte final)

Los instrumentos indicadores del flujo de crudo diluido (DCO) que entra a los hornos atmosféricos F-1101 A/B presentan fallas de indicación por lo cual el valor mostrado en las figuras D.6 y D.7 como “DCO entrada” no se consideran confiables, es por ello que para determinar el flujo de DCO de entrada a cada horno, para fines de la simulación, se consideró la sumatoria del mismo en cada pase de cada celda que conforman los hornos atmosféricos de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas.

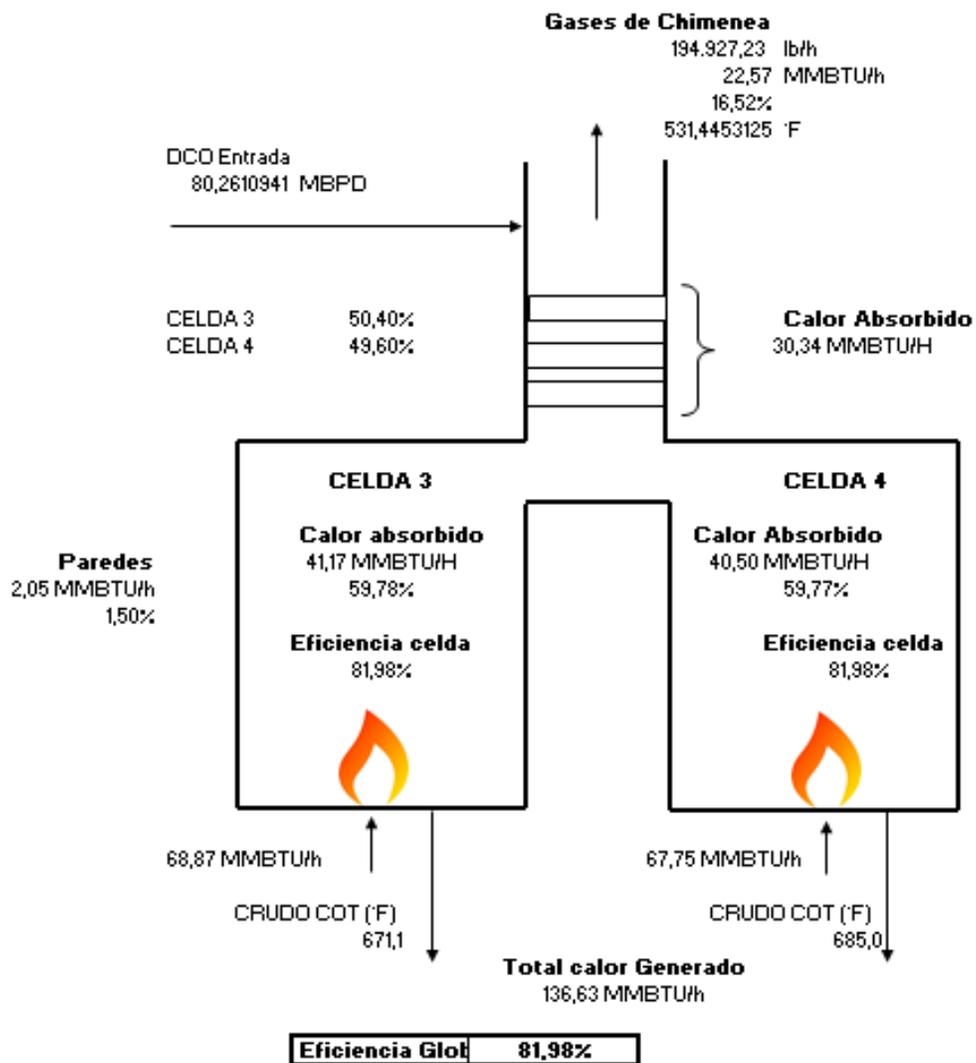


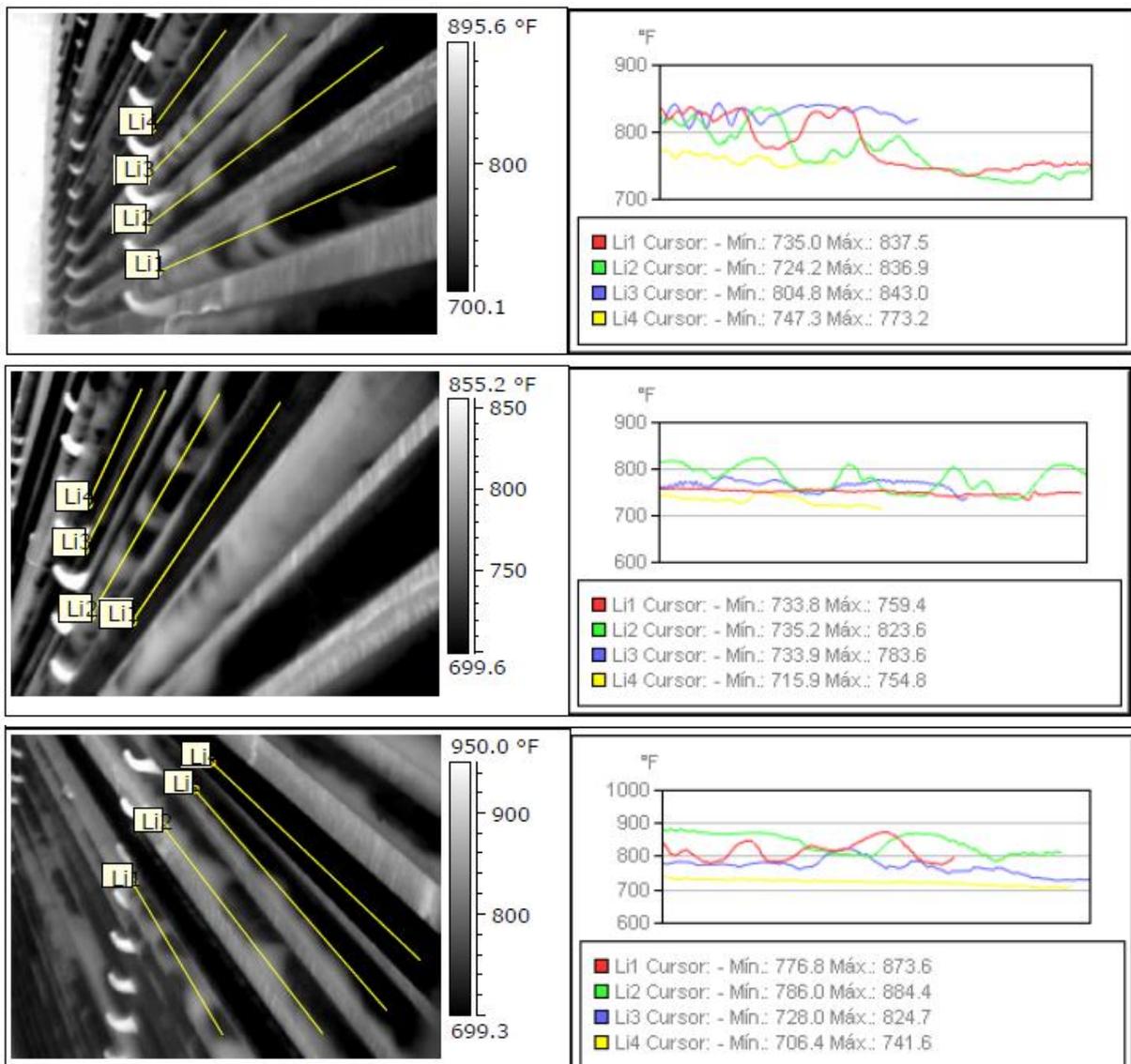
Figura D.7 Esquema final de los resultados obtenidos en la hoja de cálculos de Excel del horno atmosférico F-1101B (parte final)

**Anexo E. Imágenes obtenidas de la inspección termográfica
realizada a los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU
del mejorador de crudo Petromonagas**

Con la inspección termográfica realizada a los hornos atmosféricos F-1101 A/B, en marzo del 2024, se logró estudiar el comportamiento de las temperaturas de los tubos, en las zonas de radiación y convección, a fin de diagnosticar la integridad mecánica de los mismos. De la termografía realizada con la cámara termográfica (modelo FLIR GF309 de onda corta) se obtuvieron las tomas mostradas a continuación.

- F-1101A / Zona radiante

Las imágenes termográficas permitieron visualizar la formación interna de coque en las tuberías de los pases 1 y 2 de la celda 1 de la zona radiante del horno atmosférico F-1101A. A continuación, se observan las imágenes y los termogramas obtenidos con la cámara, donde las partes oscuras que se visualizan en los tubos es señal de presencia de coque en los mismos.



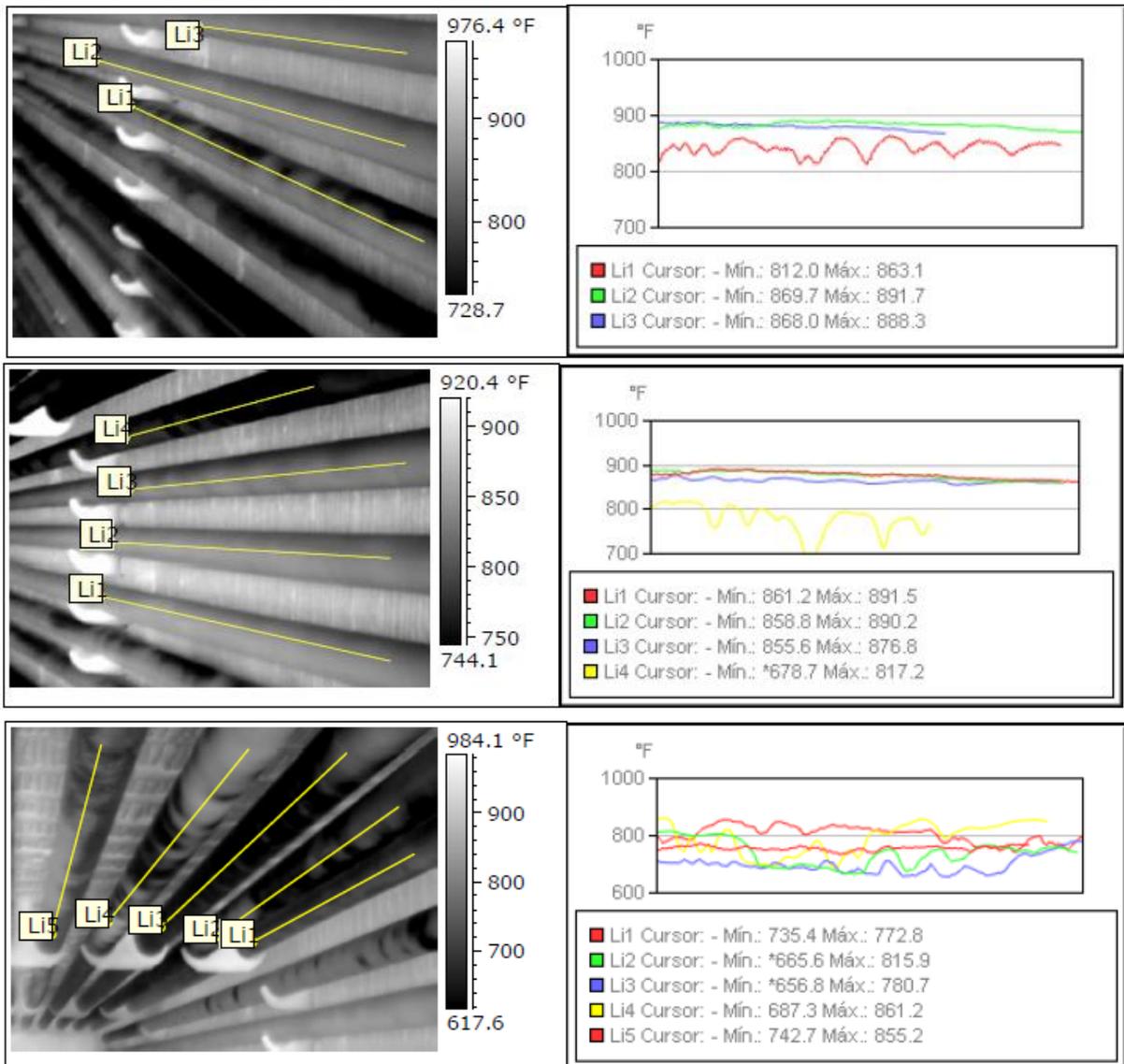


Figura E.1 Imágenes y termogramas obtenidos de la termografía realizada en la zona de radiación del horno atmosférico F-1101A

- F-1101A / Zona convectiva

En esta zona se detectaron temperaturas por encima de la temperatura máxima (1000 °F) en dos de los tubos de la primera fila del haz tubular. Además, se observó también presencia de coque en los tubos de la primera y segunda fila de haz tubular en esta zona. A continuación se muestran la imagen, con su termograma respectivo, obtenidos de la termografía.

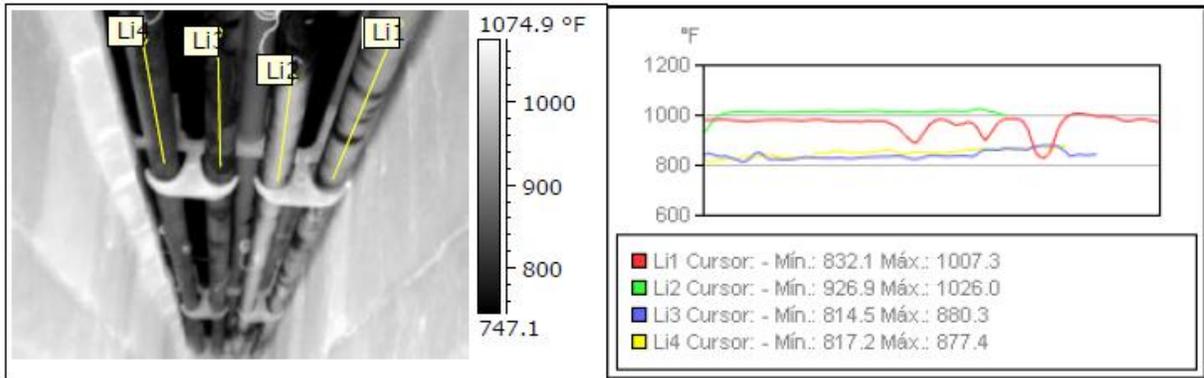


Figura E.2 Imagen y termograma obtenido de la termografía realizada en la zona de convección del horno atmosférico F-1101A

- F-1101B / Zona radiante

La evaluación termográfica en la zona radiante del horno atmosférico F-1101B determinó que no se encontraron temperaturas superiores a la sugerida (1000 °F) a su vez que no se observó presencia de coque en las tuberías de esta zona. Debido a ello, para este trabajo de grado no se ofrecieron las imágenes termográficas obtenidas.

- F-1101B / Zona de convección

En esta sección se detectó que, a pesar de no haber temperaturas que excedan los 1000 °F sugeridos como máxima temperatura de tubos, existe formación de coque en el tercer tubo de la primera fila de tubo de esta sección. A continuación se observa la imagen obtenida de esta sección junto con su termograma.

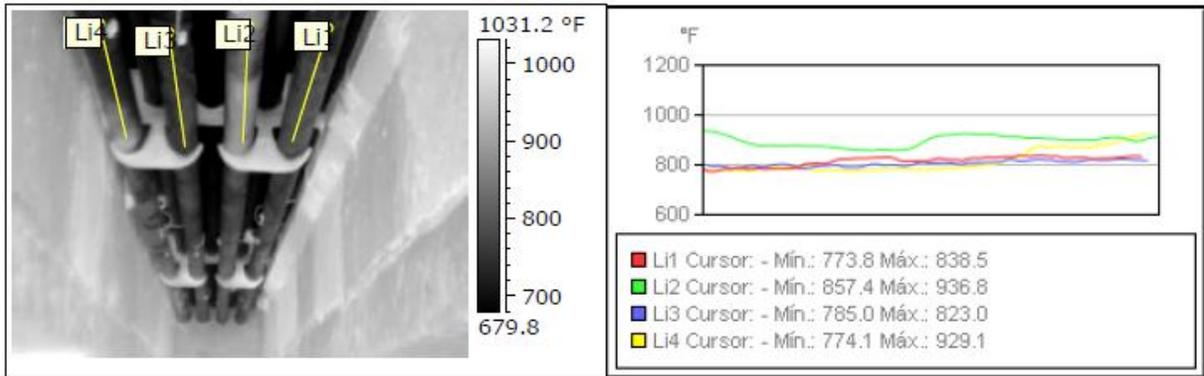


Figura E.3 Imagen y termograma obtenido de la termografía realizada en la zona de convección del horno atmosférico F-1101B

**Anexo F. Tablas generadas después de la corrida de la simulación
para los casos de diseño y actual de los hornos atmosféricos F-
1101 A/B**

Tabla F.1 Tabla generada de las propiedades y flujos de las corrientes, que conforman el diagrama de flujo de proceso del caso diseño

Nombre de la corriente	Unid.	GC	GC1	AIR	GCREf	AIRSTQ	S1	S2
Temperatura	°F	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	3297,1	3340,9
Presión	psig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Flujo molar total	lb-mol/h	931,4	465,7	7563,0	465,7	6302,6	8149,1	8149,1
Flujo. Liq. estand. Total (1 atm, 60 °F)	bbl/d	4073,6	2036,8	17119,8	2036,8	14266,6	18750,7	18750,7
Flujo másico de vapor	lb/h	22646,2	11323,1	218215,3	11323,1	181848,0	229538,4	229538,4
Flujo másico de líquido	lb/h	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Bulk stream Ideal LHV	BTU/ft ³	1295,9	1295,9	n/a	1295,9	n/a	n/a	n/a
Peso molecular total		24,3	24,3	28,9	24,3	28,9	28,2	28,2
Nombre de la corriente	Unidades	S3	S4	DCO	WARN_DCO	HOT_DCO_L	FG	HOT_DCO_V
Temperatura	°F	1666,0	670,0	498,2	594,1	730,3	3771,9	730,3
Presión	psig	0,0	0,0	270,0	120,0	20,0	0,0	20,0
Flujo molar total	lb-mol/h	8149,1	8149,1	2997,9	2997,9	1394,2	6888,6	1603,7
Flujo. Liq. estand. Total (1 atm, 60 °F)	bbl/d	18750,7	18750,7	79003,7	79003,7	56046,7	15897,5	22957,0
Flujo másico de vapor	lb/h	229538,4	229538,4	n/a	n/a	n/a	193171,1	280507,1
Flujo másico de líquido	lb/h	n/a	n/a	1109540,0	1109540,0	829032,9	n/a	n/a
Bulk stream Ideal LHV	BTU/ft ³	n/a	n/a	18728,2	18728,2	30014,7	n/a	8916,6
Peso molecular total		28,2	28,2	370,1	370,1	594,6	28,0	174,9

Tabla F.2 Resultados de parámetros generados por la calculadora CA1 para el caso diseño

Calculadora	Unidades	CA1
% mol O ₂ en gas chimenea S1	%	3,8
Calor absorbido por el DCO	MMBTU/h	195,2
Flujo vol gas combustible	ft ³ /h	176725,8
Eficiencia	%	85,2

Tabla F.3 Resultados generados para los reactores de conversión utilizados en la simulación del caso diseño

Reactor de conversión	Unidades	F-1101	R1
Descripción Reactor conv.	-	-	-
Temperatura	°F	3297,1	3771,86
Presión	psig	0,0	0
Calor liberado en el reactor	MMBTU/h	-229,0	-229,02

Tabla F.4 Calor absorbido en cada intercambiador de calor usado en la simulación para representar las zonas de radiación y convección así como las pérdidas de calor en el caso de operación de diseño

Nombre de intercambiador	Unidades	Convectiva	Perdidas	Radiante
Descripción del intercambiador	-	-	-	-
Calor absorbido	MMBTU/h	68,0	3,4	127,2

Tabla F.5 Tabla generada de las propiedades y flujos de las corrientes, que conforman el diagrama de flujo de proceso del caso actual

Nombre de la corriente	Unid.	GC	GC1	AIR	GCREf	AIRSTQ	S1	S2
Temperatura	°F	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	2792,3	2829,4
Presión	psig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Flujo molar total	lb-mol/h	459,5	229,7	3274,4	229,7	2253,6	3518,1	3518,1
Flujo. Liq. estand. Total (1 atm, 60 °F)	bbl/day	1780,4	890,2	7411,9	890,2	5101,4	8025,2	8025,2
Flujo másico de vapor	lb/h	9077,2	4538,6	94475,1	4538,6	65023,9	99013,7	99013,7
Flujo másico de líquido	lb/h	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Bulk stream Ideal LHV	BTU/ft ³	929,0	929,0	n/a	929,0	n/a	n/a	n/a
Peso molecular total		19,8	19,8	28,9	19,8	28,9	28,1	28,1
Nombre de la corriente	Unid.	S3	S4	DCO	WARN_DCO	HOT_DCO_L	HOT_DCO_V	FG
Temperatura	°F	1225,0	478,0	498,2	558,0	668,0	668,0	3683,0
Presión	psig	0,0	0,0	270,0	120,0	20,0	20,0	0,0
Flujo molar total	lb-mol/h	3518,1	3518,1	1501,1	1501,1	822,2	679,0	2497,3
Flujo. Liq. estand. Total (1 atm, 60 °F)	bbl/day	8025,2	8025,2	39558,9	39558,9	30458,6	9100,3	5714,6
Flujo másico de vapor	lb/h	99013,7	99013,7	n/a	n/a	n/a	109597,5	69562,5
Flujo másico de líquido	lb/h	n/a	n/a	555571,4	555571,4	445973,9	n/a	n/a
Bulk stream Ideal LHV	BTU/ft ³	n/a	n/a	18728,2	18728,2	27394,5	8234,0	n/a
Peso molecular total		28,1	28,1	370,1	370,1	542,4	161,4	27,9

Tabla F.6 Resultados de parámetros generados por la calculadora CA1 para el caso actual

Nombre de la calculadora	Unidades	CA1
% mol O ₂ en gas chimenea S1	%	7,0
Calor absorbido por el DCO	MMBTU/h	71,4
Flujo vol gas combustible	ft ³ /h	87179,9
Eficiencia	%	88,2

Tabla F.7 Resultados generados para los reactores de conversión utilizados en la simulación del caso actual

Reactor de conversión	Unidades	F-1101	R1
Descripción Reactor conv.	-	-	-
Temperatura	°F	2792,3	3683,00
Presión	psig	0,0	0
Calor liberado en el reactor	MMBTU/h	-81,0	-81,01

Tabla F.8 Calor absorbido en cada intercambiador de calor usado en la simulación para representar las zonas de radiación y convección así como las pérdidas de calor en el caso actual

Nombre de intercambiador	Unidades	Convectiva	Perdidas	Radiante
Descripción del intercambiador				
Calor absorbido	MMBTU/h	20,9	1,2	50,5

**Anexo G. Resultado de la simulación del caso diseño utilizando,
como gas combustible, el gas natural actual disponible en la
planta**

Caso diseño con la composición de gas natural actual

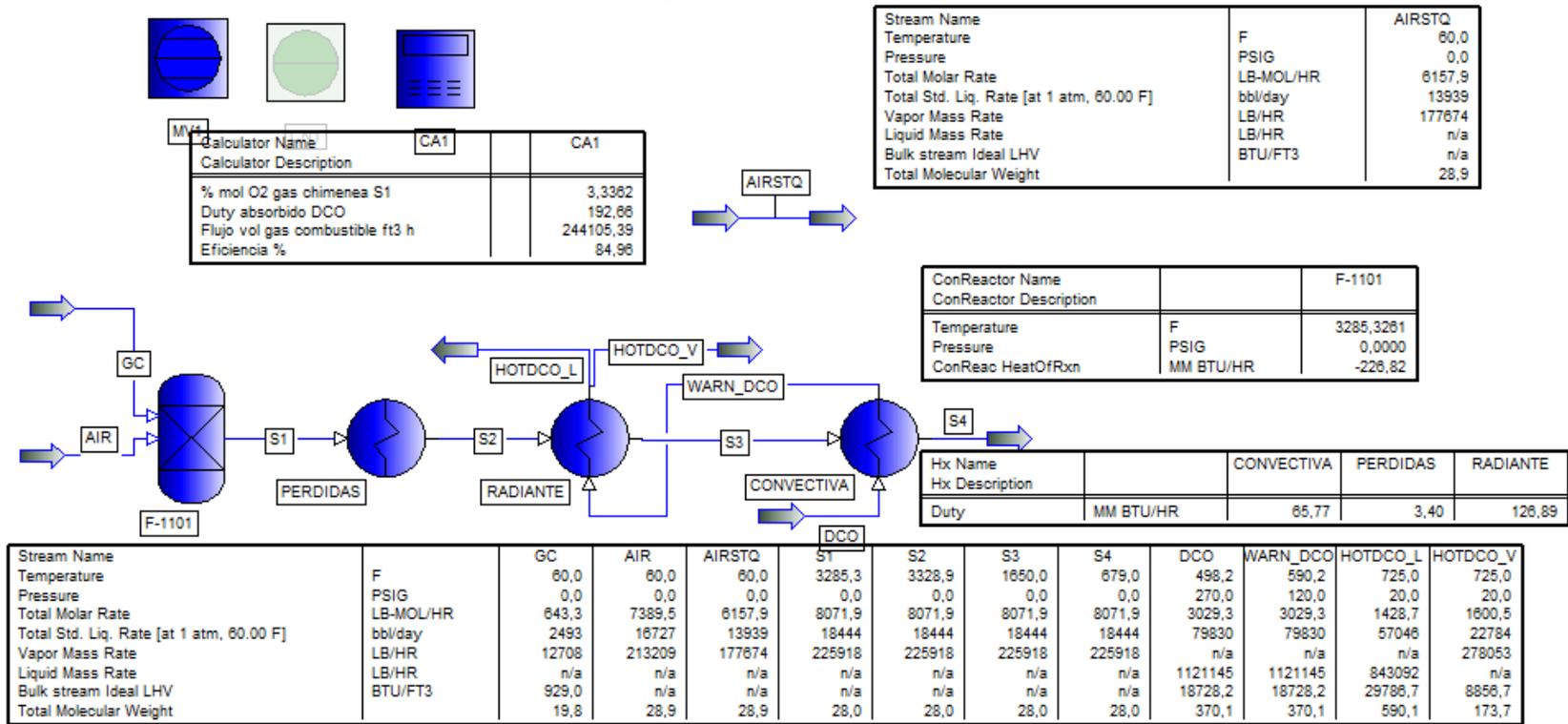


Figura G.1 Diagrama y resultados obtenidos de la simulación para el caso diseño con gas natural actual

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	Evaluación del proceso de combustión en los hornos atmosféricos de la unidad recuperadora de diluyente de un mejorador de crudo extrapesado
SUBTÍTULO	

AUTOR(ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CVLAC / E_MAIL	
Millán López Jennyfer Del Valle	CVLAC:	V- 27.943.166
	E_MAIL	Jenniferm19903@gmail.com

PALABRAS O FRASES CLAVES:

proceso de combustión
mejorador de crudo
horno atmosférico
temperatura de salida
eficiencia
variables operacionales
quemadores
gas de refinería
gas natural
simulación
horno tipo cabina doble celda
crudo diluido

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÁREA	SUBÁREA
Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas	INGENIERÍA QUÍMICA

RESUMEN (ABSTRACT):

Se evaluó el proceso de combustión en los hornos atmosféricos de la unidad recuperadora de diluyente (DRU) de un mejorador de crudo extrapesado. Primeramente se identificaron las variables operacionales que influyeron en el proceso de combustión en los hornos atmosféricos F-1101 A/B de la unidad DRU del mejorador de crudo Petromonagas, siendo estas la temperatura de entrada y salida del crudo diluido (DCO), la temperatura de los gases de combustión, la temperatura del metal de los tubos que conforman los hornos atmosféricos, la presión del DCO y del gas combustible, el cuál a las condiciones de operación actual se trató de gas natural, el tiro del dámper de los hornos atmosféricos y los flujos de entrada de DCO y de gas combustible. Todo esto se identificó con el uso de las herramientas PI. Process Book V.2.3 y Microsoft Excel y se obtuvo que la mayoría de las variables se encontraban alejadas de la condición de diseño debido a que la planta se encontraba trabajando a capacidad mínima de operación. Seguidamente se determinó la eficiencia térmica de los hornos atmosféricos a condición de operación actual por medio de un modelo de simulación de procesos usando Pro/II versión 2023, el cual fue validado para el caso diseño. Se obtuvo una eficiencia de 85,23% vs 82,3% que representa la eficiencia según la hoja de datos cuando se opera con gas de refinería como gas combustible. Mientras que a la condición de operación actual de la planta (carga mínima), la eficiencia obtenida (88,19%) se comparó con la eficiencia arrojada en una hoja de cálculos, utilizada en el mejorador de crudo para evaluar el comportamiento de los hornos, la cual reportó 84% para el 13 de noviembre del 2023, día en que la planta se encontraba operando de forma estable. Por último, en base a los resultados obtenidos con todo el estudio anterior, se propusieron mejoras para garantizar un proceso de combustión, en los hornos atmosféricos de la Unidad Recuperadora de Diluyente DRU, dentro de los rangos normales de operación. De forma específica éstas están orientadas en la realización de inspecciones y mantenimientos periódicos, así como en inversión de instrumentos de medición de forma que se permita un proceso de combustión adecuado y se eviten las malas lecturas de las variables y parámetros operacionales, a fin de garantizar la eficiencia de los hornos atmosféricos F-1101 A/B.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

CONTRIBUIDORES

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC/ E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU x	JU
López, Sharon	CVLAC	V-20.875.644			
	E_MAIL	sharonlg12@gmail.com			
	ROL	CA	AS	TU x	JU
Rodulfo, Arturo	CVLAC	V-8.478.649			
	E_MAIL	rodulfo99@gmail.com			
	ROL	CA	AS	TU x	JU
Parra, Frank	CVLAC	V-8.265.531			
	E_MAIL	frankparrag1971@gmail.com			
	ROL	CA	AS	TU x	JU
Salazar, Victoria	CVLAC	V-13.959.462			
	E_MAIL	victoriasp2006@gmail.com			
	ROL	CA	AS	TU x	JU

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO	MES	DIA
2025	05	27

LENGUAJE: SPA.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
NAZTTG_MLJD2025	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:

ALCANCE:

ESPACIAL: inespacial

TEMPORAL: intemporal

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de ingeniería química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente/Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda "SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009".

Leído el oficio SIBI - 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
SISTEMA DE BIBLIOTECA

RECIBIDO POR *[Firma]*

FECHA 5/8/09 HORA 5:20

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

[Firma]
JUAN A. BOLAÑOS CUNPELE
Secretario



C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Telemática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YGC/marija

Apartado Correos 094 / Telf: 4008042 - 4008044 / 8008045 Telefax: 4008043 / Cumaná - Venezuela

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado (Vigente a partir del II Semestre 2009, según comunicación CU-034-2009)

“Los Trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participara al Consejo Universitario, para su autorización”

Jennyfer Millán

AUTOR

Ing. Sharon López

TUTOR INDUSTRIAL

Ing. (M.Sc) Arturo Rodulfo

TUTOR ACADÉMICO

Ing. Frank Parra

JURADO

Ing. (M.Sc) Victoria Salazar

JURADO

Ing. Victoria Salazar

CORDINADOR(A)

COMISIÓN DE TRABAJO DE GRADO