## **UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO** FACULTAD DE INGENIERIA DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



"Evaluación térmica y cálculo del periodo optimo de decoquificado en el horno H-1401".

Informe de habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía: Sr. Luis Cerda Miskulini

EDGAR ALEJANDRO SILVA PINCHEIRA CONCEPCION – CHILE 2015

## Dedicatoria

Agradecer primeramente que todo se lo debo a un Dios todopoderoso, que me acompaño de principio a fin en esta etapa que ha concluido.

Dedico esta tesis a las personas más importantes de mi vida, mi familia, en particular a mis padres que pese a todo siempre me apoyaron, estuvieron y creyeron en mí, aún en tiempos difíciles. También va dedicada a mi novia Paula Roldán, que pese a los innumerables obstáculos siempre me apoyo y me acompaño en todo este proceso siendo un pilar importante en la finalización de esta etapa y a mis amigos del alma que siempre están apoyándome a la distancia.

También agradecer a mi profesor guía Luis Cerda Misculini, quien fue más que un profesor fue un padre y a gente especial que conocí en la planta Enap, como Pablo Quijón y varios más.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

## Resumen

El presente informe se basó en un horno de proceso llamado H-1401 de la planta Enap Refinerías Biobío, la cual presenta problemas de formación de coque al interior de sus tubos ya que opera con el producto más pesado de la refinería.

El objetivo que se busca es realizar una evaluación térmica para conocer como está operando el horno actualmente y explicar porque se origina la formación de coque en el interior de los tubos, desarrollando el cálculo para ver como aumenta el espesor conforme avanzan las semanas, de modo de poder encontrar el periodo óptimo para su mantención.

Se empezó describiendo de forma general la empresa, los productos obtenidos en ella y donde se localiza el horno del que se hablará, detallando de forma ilustrada y técnica las características que posee.

Se explicó cómo se origina la formación de coque y los dos procesos de limpieza que actualmente utilizan en la Refinería, detallando todo el proceso e indicando las diferencias entre estos.

Luego en base a manuales de diseño de hornos, se describió todo el procedimiento de cálculo de los flujos de calor que son transferidos a los tubos del horno, incluyendo tablas, gráficos y fórmulas, tanto para condiciones de diseño y operación.

Se explicó la transferencia de calor que se efectúa entre el flujo de calor y el fluido a calentar, indicando las resistencias que interfieren en el proceso.

Después ya en el procedimiento de cálculo, se obtuvieron los flujos de calores totales, obteniendo tablas y gráficos que demuestran cómo va aumentando el flujo de calor de operación en comparación a la de diseño, producto de la formación de coque.

Se creó un programa en EES para facilitar el cálculo del espesor de coque y se confeccionaron tablas para diferentes conductividades térmicas, luego fueron graficados los valores obtenidos para encontrar la ecuación que más representaba el gráfico y así poder calcular el tiempo óptimo de operación del horno y el espesor que se obtendría.

Por último se obtuvieron los rendimientos del horno en la zona de radiación, para saber cuánto porcentaje de calor recibe el pitch del calor liberado por la combustión.

Con todo el proceso se pudieron obtener resultados favorables, obteniendo un tiempo óptimo de 19 semanas y un espesor de 3,04 mm de espesor, demostrando que el horno puede operar 3 semanas más de lo planteado en la refinería.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

# Índice

Resumen		
Indice		
Nomenclat	ura	
Glosario		
1. Introdu	cción	. 1
1.1 Ger	neralidades:	. 1
1.2 Plan	nteamiento del problema	. 2
1.3 Obj	etivos	. 3
1.4 Me	todología	. 4
2. Descripe	ción de la empresa	. 5
2.1 Ant	ecedentes generales	. 5
2.2 Plan	ntas	. 6
2.3 Ref	inación	. 7
2.3.1	Productos obtenidos en la planta	. 7
3. Descripe	zión de la planta Coker 1	10
3.1 Cor	nponentes de la planta	12
3.2 Pro	ceso de coquificación retardada	16
3.2.1	Sección de alimentación y carga del horno	19
4. Hornos.		20
4.1 Hor	nos en la industria:	20
4.1.1	Componentes del horno	20
4.2 Hor	no H-1401	24
4.2.1	Composición del horno:	29
4.2.2	Operación	30
4.2.3	Combustión:	32
4.2.4	Condiciones de entrada y salida del pitch	35
5. Coquific	ación en hornos	36
5.1 For	mación de coque	36
6. Decoqui	ficado	40
6.1 Tip	os de decoquificado:	40
6.1.1	Decoquificado mecánico mediante Piggs (Pigging Decoking):	40
6.1.2	Decoquificado vapor-aire	46

	6.1.3	Tabla comparativa de los proceso de limpieza:	49
7.	Transfe	rencia de calor en hornos	50
	7.1 Tra	nsferencia de calor por radiación directa en la sección de radiación:	50
	7.1.1	Constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ):	50
	7.1.2	Factor de efectividad relativa (α):	50
	7.1.3	Área de plano frio de los tubos	52
	7.1.4	Factor de intercambio "F":	52
	7.1.5	Temperatura de los gases de combustión ( <b><i>Tg</i></b> )	55
	7.1.6	Temperatura de la pared de tubos ( $Tp$ )	57
	7.2 Tra	nsferencia de calor por convección en la sección de radiación:	61
	7.3 Flu	jo de calor total transferido	61
	7.4 Tra	nsferencia de calor a través de los tubos:	61
	7.4.1	Transferencia en tubos sucios	62
	7.4.2	Coeficiente global de transferencia de calor:	63
	7.4.3	Coeficiente convectivo del Pitch ( <i>hp</i> )	64
	7.4.4	Coeficiente convectivo de los gases de combustión ( <i>hg</i> )	65
	7.5 Ter	nperatura de entrada y salida de la carga:	67
8.	Cálculos	5	69
	8.1 Cál	culos de transferencia de calor:	69
	8.2 Cál	culos de calor radiante:	78
	8.3 Cál	culos calor convectivo en la zona radiante:	79
	8.4 Cal	or total	83
	8.5 Cál	culo espesor de coque:	84
	8.6 Est	imación del tiempo de decoquificado:	89
	8.7 Cal	or absorbido por el pitch:	93
9.	Parámet	tros que advierten coquificacion en el interior de los tubos	94
10	. Mejora	as aplicadas al proceso de decoquificado Horno H-1401:	95
11	. Conclu	isiones y recomendaciones:	98
12	. Bibliog	grafía:	. 100
13	. Anexos	5	. 101
	13.1 Grá	ficos de temperatura de metales en los tubos del paso 1	. 101
	13.2 Pro	piedades del aire seco a presión atmosférica	. 105
	13.3 Pla	nos de diseño del H-1401	. 106
	13.4 Pro	gramación EES:	. 110

# Índice de Figuras

Figura 2.1: Productos obtenidos del petróleo	9
Figura 3.1: Unidad coker/ Unidad de Hidrotratamiento	11
Figura 3.2: Distribución planta coker	15
Figura 3.3: Diagrama de proceso de coquificación retardada	16
Figura 4.1: Tubos aletados	21
Figura 4.2: Tubos aletados segmentados	22
Figura 4.3: Vista frontal y lateral del horno H-1401	24
Figura 4.4: Quemadores del horno H-1401	25
Figura 4.5: Componentes de un horno tipo cabina del tipo indirecto (H-1401)	26
Figura 4.6: Zonas del hogar del horno H-1401	28
Figura 4.7: Espesor de piso de la aislación del horno h-1401	29
Figura 4.8: Espesor de la pared del horno h-1401	
Figura 4.9: Distribución de los componentes del Fuel Gas.	33
Figura 4.10: Consumo de fuel gas en el periodo Noviembre-Marzo	34
Figura 5.1: Tubo dañado por creep	
Figura 5.2: Pandeo de tubos al interior del horno	38
Figura 5.3: Costra de coque formado en el interior del tubo	
Figura 6.1: Piggs	41
Figura 6.2: Tipos de espárragos de los Piggs	42
Figura 6.3: Procedimiento de decoquificado mecánico mediante Piggs	45
Figura 6.4: Proceso de decoquificado (depósito de coque)	46
Figura 7.1: Gráfico para determinación del factor de efectividad relativa	51
Figura 7.2: Gráfico para cálculo del factor F	53
Figura 7.3: Gráfico para el cálculo de la emisividad del gas	54
Figura 7.4: Gráfico de temperaturas de los gases de combustión	56
Figura 7.5 : Instalación termocupla instalada en los tubos del H-1401	57
Figura 7.6: Distribución termocuplas paso 1	58
Figura 7.7: Distribución termocuplas paso 2	58
Figura 7.8: Tendencia de temperaturas de metales	60
Figura 7.9: Temperaturas de entrada	67
Figura 7.10: Temperaturas de salida	68
Figura 8.1: Dimensiones del horno H-1401	70
Figura 8.2: Temperaturas de entrada de los gases de combustión	77
Figura 8.3: Q de diseño V/s Q de operación	83
Figura 8.4: Programa desarrollado en EES para cálculo de espesores	85

Figura 8.5: Gráfico de espesor de coque conforme a las semanas	
Figura 8.6: Temperatura de metal v/s espesor de coque	
Figura 8.7: Ajuste de curva realizado al gráfico Temperatura metal v/s Espesor	90
Figura 8.8: Tendencia de temperaturas máximas de metales	91
Figura 8.9: Ajuste de curva realizado al gráfico de temperaturas máximas de metale	es v/s
días	92
Figura 10.1: Lanzadera instalada apoyada con un caballete	96
Figura 10.2: Ejemplo de pluma hidráulica móvil	97
Figura 10.3: Instalación spool	97
Figura 13.1: Tendencia temperatura tubo 1 (termocupla 1)	101
Figura 13.2: Tendencia temperatura tubo 2 (termocupla 2)	101
Figura 13.3: Tendencia temperatura tubo 3 (termocupla 3)	102
Figura 13.4: Tendencia temperatura tubo 4 (termocupla 4)	102
Figura 13.5: Tendencia temperatura tubo 4 (termocupla 5)	103
Figura 13.6: Tendencia temperatura tubo 3 (termocupla 6)	103
Figura 13.7: Tendencia temperatura tubo 2 (termocupla 7)	104
Figura 13.8: Tendencia temperatura tubo 1 (termocupla 8)	104

## Índice de Tablas

Tabla 3.1: Tags de equipos de la planta Coker	14
Tabla 4.1: Características de diseño del horno H-1401	27
Tabla 4.2: Parámetros de operación del horno H-1401	31
Tabla 4.3: Composición volumétrica del Fuel gas	33
Tabla 6.1: Tipos de espárragos de los Piggs	42
Tabla 7.1: Longitud media del rayo radiante	55
Tabla 7.2: Tags Termocuplas.	59
Tabla 8.1: Tabla resumen de presiones parciales para combustión real con diferentes	
excesos de aire	73
Tabla 8.2: Cálculo de temperaturas de entrada de combustión	76
Tabla 8.3: Cálculo de Q de radiación	79
Tabla 8.4: Cálculo de coeficiente convectivo	81
Tabla 8.5: Cálculo de Q de convección	82
Tabla 8.6: Cálculo espesor de coque con una conductividad térmica de 0,6	86
Tabla 8.7: Cálculo espesor de coque con una conductividad térmica de 0,7	87
Tabla 8.8: Cálculo espesor de coque con una conductividad térmica de 0,8	87
Tabla 8.9: Calor absorbido por el pitch	93

## Nomenclatura

- $\boldsymbol{\alpha}$ : Factor de efectividad relativa
- $A_{cp}$ : Área de transferencia de calor del banco de tubos (plano frío),  $m^2$
- $A_R$ : Área total refractaria,  $m^2$
- $\boldsymbol{A_h}$ : Área de la caja de fuego,  $m^2$
- *L*: Longitud media del rayo radiante, *m*
- *F*: Factor de intercambio
- $\boldsymbol{h}_{\mathbf{p}}$ : Coeficiente convectivo del Pitch, W /  $m^2 \cdot K$
- $m{h_g}$  : Coeficiente convectivo de los gases de combustión, W /  $m^2 \cdot K$
- $\boldsymbol{\sigma}$ : Constante de Stefan-Boltzmann,  $W/m^2 \cdot K^4$
- $\mathbf{Q}_{\mathbf{r}}$ : Calor radiante transferido, *W*
- $T_{g}$ : Temperatura de los gases de combustión, K
- $T_p$ : Temperatura de pared de los tubos, K
- $A_w$ : Área efectiva del refractario,  $m^2$
- $Q_c$ : Calor convectivo transferido, W
- *Q*: Flujo de calor, *W*
- *P*: Presión parcial, *atm*
- $C_p$ : Calor específico, J/  $kg \cdot K$
- $\lambda_1$ : Conductividad térmica de los gases de combustión,  $W/m \cdot K$
- $\lambda_2$ : Conductividad térmica del pitch,  $W/m \cdot K$
- $\mu$ : Viscosidad dinámica,  $kg/m \cdot s$
- *V*: Velocidad del flujo, m/s
- **d**: Diámetro interior tubo, *m*
- **V**: Viscosidad cinemática,  $m^2/s$

- *P*<sub>*r*</sub>: Número de Prandtl
- *R*<sub>*e*</sub>: Número de Reynolds
- $N_u$ : Número de Nusselt
- **U**: Coeficiente grobal de transferencia de calor,  $W/m^2 \cdot K$

## **Glosario:**

- **ASR:** Análisis sistemático de riesgo, es un análisis detallado de los posibles riesgos que se pueden encontrar en una faena de trabajo.
- Casing: Es la cubierta exterior metálica, o carcasa del horno.
- Catalizador: Agente o sustancia capaz de acelerar o retardar una reacción, sin alterar el resultado final de la misma. Substancia que aumenta la velocidad de un proceso químico sin consumirse en la reacción.
- **Coil:** El coil es el serpentín del horno, el cual se conforma por una serie de tubos (dentro de los cuales circula la carga o crudo) y sus elementos de unión.
- **Combustión:** Es la rápida reacción entre el combustible y oxígeno para producir fuego y calor.
- **Coque:** Materia carbonosa sólida y de color gris, resultante de la destilación del carbón. Sus propiedades son algo distintas a las del carbón, siendo más compacto y más liviano y con mucho menos cantidad de cenizas. El coque se deposita como capa o costra dura por el interior de los tubos del serpentín.
- **Coquización:** Proceso de descomposición térmica que produce hidrocarburos ligeros a partir de residuos pesados. Un subproducto de este proceso es el coque.
- **Creep:** El Creep o termofluencia es una deformación del metal que produce agrietamientos. Se presenta cuando la tensión o esfuerzos se mantienen constantes y se sobrepasa una cierta deformación unitaria.

El Creep induce a una falla por fractura cuando se sobrepasan los valores del diagrama de termofluencia para el material considerado

- Crudo: Petróleo aún sin procesar, tal y como se obtiene del subsuelo.
- **Dampers:** Se encuentra en la chimenea del horno y es el regulador de tiro o válvula que controla la velocidad a la que los gases de combustión abandonan el horno.
- **Decoquificar:** Son una serie de procedimientos, para desprender de los tubos de los serpentines, las capas o depósitos de coque.
- Duty: capacidad de absorber el calor.
- Espárragos: Son las piezas metálicas que van adheridas en la superficie del pigg.
- Exceso de aire: Es la cantidad de aire por sobre el requerimiento estequiométrico para completar la combustión. Se expresa en porcentaje en volumen.
- Fitting: Son todos los elementos de unión de los tubos rectos.
- Gases de combustión: Son los productos gaseosos de la combustión, incluyendo exceso de aire.
- Nafta: Fracción ligera del petróleo natural, que se obtiene en la destilación de la gasolina.
- Normalizar: Proceso donde se a la normalidad (listo para ser utilizado) un equipo que se encuentra en mantención.
- **Paso:** Se le dice paso a los hogares de un horno, cuando este posee más de uno. Un ejemplo de esto es el horno H-1401, el cual posee 2 hogares, por ende 2 pasos.
- Pitch: Residuo de vacío que queda en el fondo de las torres de vacío.
- Pigg: Es un dispositivo que es utilizado en la limpieza de tubos de los hornos de proceso.
- **Tag:** Es el nombre se asigna para clasificar los equipo estáticos y los equipos rotarios de las plantas de toda la refinería, esto involucra también accesorios de equipos, líneas, sensores etc. Cada tag posee caracteres alfa numéricos.
- **Termocupla:** Sensor de temperatura utilizado para captar temperaturas superficiales de los tubos de un horno u otro equipo.
- Vaporizado: Proceso que se desarrolla antes del decoquificado mecánico. Consiste en aplicar vapor durante 12 horas para lograr eliminar los gases tóxicos nocivos dentro de los tubos y poder ablandar el coque antes de ser extraído.

## 1. Introducción

#### **1.1 Generalidades:**

Hoy en día en la industria, el mayor problema de la mantención industrial es la detención del sistema productivo, ocasionada por fallas imprevistas ya sea del equipo o dispositivos. Desde hace no mucho tiempo la mantención ha cobrado mucha fuerza ya que no solo conlleva pérdidas significativas, al ocasionarse tiempos muertos por paradas imprevistas, sino que además arriesga la integridad física de sus trabajadores , por lo que se encuentra estrechamente relacionada con la prevención de accidentes y lesiones en los trabajadores. La empresa tiene la responsabilidad de mantener en buenas condiciones, las maquinarias, herramientas y equipo de trabajo, lo cual esto ayuda a tener un mejor desenvolvimiento y aparte, más seguridad para evitar riesgos laborales.

Los hornos son equipos sumamente importantes en la industria ya que en simples palabras, son el corazón de las plantas y en el ámbito de producción vienen a ser los cuellos de botella. Si los hornos dejan de funcionar o paran repentinamente, la producción se parará completamente y por lo tanto acarreará pérdidas.

Uno de los problemas más frecuentes que se presentan en los hornos de Enap refinerías Biobío, es la formación de coque al interior de sus tubos, que incide en que la vida útil de estos llegue a su final a corto plazo y el producto que se espera obtener del proceso no cumpla con las características deseadas por la mala transferencia de calor.

En el presente informe se realizará una evaluación térmica para conocer cómo está operando el horno actualmente, además de entregar las causas del problema de la formación de coque y el cálculo del espesor de la costra formada con el transcurso del tiempo.

La mantención de hornos en las refinerías es una ardua y complicada tarea que acarrea elevados costos, ya sea en la limpieza y normalización de hornos, como en la detención de la producción de éste, lo que conlleva a ser un componente crítico de cada planta, ya que es el corazón de ésta y si no está en funcionamiento el horno, el proceso no puede avanzar.

El horno específico que se estudiará es el de la planta coker de la empresa Enap Refinerías Biobío, llamado H-1401. Este tiene como propósito, la conversión de hidrocarburos de alto peso molecular y de bajo costo comercial, en una gama de productos de mayor valor, tales como el diesel, nafta, gas oíl pesado, y una fracción sólida llamada coque de petróleo.

Por el interior de los tubos del horno pasa un fluido llamado pitch, que es una sustancia muy viscosa, que para que tenga buena circulación debe circular a altas temperaturas.

El problema que acontece en la planta, es que el pitch que queda adherido en la superficie interior de los tubos, se solidifica y forma una costra, lo que reduce la transferencia de calor hacia el fluido y hace que los tubos se calienten más de lo recomendado referente a su temperatura de diseño, ocasionando que el tubo pierda sus propiedades al verse sometido a una temperatura mayor, lo que termina que se forme creep (ver glosario) en los tubos y en el peor de los casos que estos se rompan.

Lo que se persigue es determinar el avance del espesor de coque formado al interior de los tubos a través de las semanas, de modo de verificar si el tiempo en que se realiza el decoquificado es el indicado, evaluando cómo funciona el horno térmicamente y explicando cómo debería funcionar este para que la formación de coque en el interior de la tubería no sea tan rápida y pueda lograrse una minimización en los costos de mantención.

Para el análisis del horno se realizaron las mediciones ya sea de temperaturas, consumo de combustible, etc., en un rango de tiempo a partir del último decoquificado, hasta el siguiente decoquificado. Esto fue entre las fechas (09/11/2014) y (3/03/2015).

## • Objetivos generales:

-Evaluación térmica del horno, para conocer si está operando adecuadamente.

-Determinar si es correcto el momento para el decoquificado en el horno H-1401 de la planta de coker, que se realiza actualmente.

#### • Objetivos específicos:

-Recopilar e interpretar los datos actuales de las condiciones de operación y producción del horno H-1401 de la planta coker.

-Determinar el espesor del coque formado en el interior de los tubos, a través del tiempo.

-Determinar el o los parámetros predictivos del grado de ensuciamiento de los tubos.

-Analizar otras alternativas de operación del horno de modo que se pueda prolongar la mantención de los tubos del horno.

## 1.4 Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, el trabajo se dividirá en las siguientes etapas:

1. Recopilación de datos de la planta en general

2. Recopilación de antecedentes de las condiciones de diseño y operacionales del horno H-1401 (ver informes de inspecciones anteriores), donde se incluye las descripciones de los componentes principales y de interés.

3. Comprender el proceso de la coquificación retardada y el porqué de la formación de coque de pitch en los coils del horno.

4. Elaboración de un programa en EES para poder calcular el espesor de coque y una planilla Excel que indique los cálculos de transferencia de calor de horno.

5. Recopilar información de inspecciones de decoquificados de años anteriores e ir a un Decoquificado para visualizar de primera instancia el proceso y los pasos a seguir de éste.

6. Determinación del o los parámetros que reflejan el estado de la decoquificación.

#### 2. Descripción de la empresa

#### 2.1 Antecedentes generales

Enap Refinarías o también conocida como la Empresa Nacional del Petróleo fue establecida el 19 de junio de 1950 por el Estado de Chile. Su giro comercial es la exploración, producción y comercialización de hidrocarburos y sus derivados, ya sean en chile como en el extranjero.

ENAP constituye una red de negocios en el campo del petróleo, el gas natural y otros productos energéticos como el gas natural licuado. También entrega servicios ligados con la industria petrolera, tales como construcción y mantenimiento de la infraestructura petrolera, tanto en tierra como en mar; y logística para transporte y almacenamiento de combustibles líquidos y gaseosos.

ENAP Refinerías Biobío es una empresa perteneciente a ENAP, que posee el 99,95% de las acciones y la Corporación de Fomento de la Producción, CORFO (0.05 %).

Puesta en marcha el 29 de julio de 1966, desarrolla sus actividades en la comuna de Hualpén, y se ubica a 8 kilómetros de la bahía de san Vicente, con la cual se comunica a través de 6 oleoductos que usa como terminales de carga y descarga de petróleo crudo y cargamentos de combustibles refinados.

Las actividades de la empresa consisten, principalmente, en la adquisición de petróleo crudo, refinación, venta y transporte de productos derivados del petróleo, como combustibles y productos petroquímicos para la fabricación de plásticos. Actualmente abastece el 40% del mercado interno de hidrocarburos. Desarrolla un amplio plan de inversiones, que se inicia con la construcción de la Planta Cogeneradora Petropower, que es destinada a generar energía eléctrica, vapor de alta presión y agua desmineralizada, productos requeridos en los distintos procesos de la refinería, o de tratamiento de residuos para transformarlos en combustible. El funcionamiento de la planta Petropower se logra con la alimentación de coque de petróleo que es producida en el horno de la planta coquer (perteneciente a Enap), que transforma los residuos de vacío, provenientes de crudos más pesados que los procesados en la actualidad.

#### 2.2 Plantas

Enap Refinerías S.A. opera las Refinerías Aconcagua y Biobío y los terminales portuarios de Quintero (Quinta Región) y San Vicente (Octava Región). A través del Departamento de Almacenamiento y Oleoductos (DAO) opera las plantas de almacenamiento de combustibles de Maipú, San Fernando y Linares; y el oleoducto que corre entre Refinería Biobío y la planta de San Fernando. Además, es propietaria del Terminal Vinapu, en Isla de Pascua, cuya misión es abastecer con combustibles este territorio insular chileno.

#### 1) Refinería Aconcagua:

Esta refinería se ubica en la comuna de Concón, en la Región de Valparaíso y produce la mayor parte de los combustibles que consume la Región Metropolitana. Tiene capacidad instalada para procesar (destilar) 104.000 barriles día de petróleo crudo y cuenta con una dotación de alrededor de 785 empleados.

#### 2) Refinería Biobío:

Inaugurada el 29 de julio de 1966, esta Refinería de ENAP vino a complementar la producción de combustibles que paulatinamente fue requiriendo el incremento de la demanda nacional. Se ubica en la comuna de Hualpén, en la Región del Biobío y tiene capacidad para procesar (destilar) 116.000 barriles/día. Cuenta con una dotación de alrededor de 666 trabajadores y en torno a ella se levanta el más importante complejo petroquímico y energético del país, con alrededor de 20 industrias que operan con materias primas aportadas por Refinería Biobío.

#### 3) **R&C Magallanes:**

Las actividades de R&C Magallanes se desarrollan en el área de refinación, almacenamiento y transporte de combustibles. El proceso de refinación de petróleo crudo se realiza en la Refinería Gregorio y el proceso de fraccionamiento de Raw Product en la Planta Cabo Negro.

#### 2.3 Refinación

La refinación es una agrupación de procesos físicos y químicos mediante los cuales se separan y luego se transforman los distintos componentes que conforman el petróleo crudo para aumentar su valor. Para desarrollar este proceso, las refinerías de ENAP cuentan con una gran variedad de plantas que intervienen en él.

#### 2.3.1 Productos obtenidos en la planta

a) Gas licuado de petróleo (GLP): Producto del refino del petróleo, denominado GLP, que está compuesto de propano, butano, o una mezcla de los dos y puede ser total o parcialmente licuado bajo presión con objeto de facilitar su transporte y almacenamiento.

**b**) **Gasolina:** Mezcla de hidrocarburos cuyas propiedades de octanaje y volatilidad permiten ser utilizados como combustible en motores de vehículos. La gasolina que se encuentra en forma natural se conoce como condensado.

c) Kerosene: Es un combustible de hidrocarburo líquido usado ampliamente como un combustible, en la industria y en los hogares. Es usado comúnmente como combustible para cocinar.

c) Kerosene de aviación: Se utiliza ampliamente en motores a reacción de los aviones (combustible para aviones) y algunos motores de cohetes.

**d**) **Petróleo Diésel:** También denominado gasoil, es un hidrocarburo líquido, compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores diésel.

e) Petróleo Combustible: También llamada fuel oíl, es un compuesto oscuro y viscoso, y para su empleo es necesario trabajarlo en temperaturas que varían entre 40 y 70 °C, se obtiene de los productos más pesados del petróleo.

Este combustible en general alimenta hornos y calderas, y en la generación de electricidad. En Chile se comercializa el fuel oíl N°6 y en una pequeña cantidad el N°5.

La viscosidad es la propiedad más importante del fuel oíl, mide la resistencia de un líquido a fluir, indica que tan fácil se puede atomizar el combustible en un quemador.

**f**) **Azufre:** Es un elemento químico utilizado en multitud de procesos industriales, como la producción de ácido sulfúrico para baterías, la fabricación de pólvora y el vulcanizado del caucho.

**g**) **Solventes:** Es una sustancia que permite la dispersión de otra sustancia en ésta, a nivel molecular o iónico. Los producidos en Enap son el aguarrás, Xileno, Gasolina blanca y solventes para la minería.

**h**) **Asfaltos:** Los asfaltos, también denominados betún, es un material viscoso, pegajoso y de color negro. Se utiliza mezclado con arena o gravilla para pavimentar caminos y como revestimiento impermeabilizante de muros y tejados. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de betún bitumen. El asfalto es una sustancia que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo.

i) **Petroquímicos:** Además de los combustibles, del petróleo se obtienen derivados que permiten la producción de compuestos químicos que son la base de diversas cadenas productivas que terminan en una amplia gama de productos conocidos genéricamente como petroquímicos, utilizados en la industria agrícola, alimenticia, farmacéutica, química y textil, entre otras. (Etileno y propileno).

**j**) **Gas natural:** El gas natural es una de las varias e importantes fuentes de energía no renovables formada por una mezcla de gases ligeros que se encuentra disuelto o asociado con el petróleo. Es comprado y producido a baja producción en la planta de Magallanes y es vendido para uso domiciliario e industrial.

El gas que se produce en Enap Refinerías Biobío es el LPG (gas licuado de petróleo) para uso industrial.



Figura 2.1: Productos obtenidos del petróleo.

Fuente: Obtenido de los archivos de productos obtenidos de la refinería, Enap Refinerías Biobío.

## 3. Descripción de la planta Coker

La unidad coker está diseñada para procesar 12.000 barriles diarios de pitch de vacío, lo que equivale a 1908  $m^3/dia$  provenientes del crudo Tía Juana 24, con una razón de reciclo de 1,15 es decir, la carga al horno puede llegar a 2194  $m^3/dia$ , produciendo una determinada cantidad de productos como Diesel, gas Oíl pesado, Nafta, Gas ácido y carbón coque de petróleo. El pitch es proveniente de los fondos de unidades de Vacío (Topping 1 y 2). La unidad puede operar hasta con un mínimo del 50 % de la carga de diseño.

Es importante destacar de esta planta, que con el coque de petróleo obtenido en el proceso de coquización retardada se alimenta a la planta Cogeneradora Petropower. Esta planta genera electricidad, la cual abastece a Enap refinerías Biobío y vapor de alta presión de ser necesario, siendo un punto clave en varios procesos.

En la figura 3.1 se ilustra el diagrama de flujo general de la planta Coker y Hidrotratamiento (HDT).



Figura 3.1: Unidad coker/ Unidad de Hidrotratamiento.

Fuente: Modificado y obtenido del Manual de la planta Coker, Archivo técnico, Enap Refinerías Biobío.

#### 3.1 Componentes de la planta

La planta posee varios equipos para que el proceso de coquificación se lleve a cabo. El proceso se puede ver en la fig 3.3.

#### Elementos generales de la planta:

-Horno H-1401: Es el encargado de calentar el producto a una temperatura adecuada para luego hacer ingreso a las cámaras de reacción D-1401A/B donde se producirá la coquificación retardada.

-Intercambiadores de calor E-1402A, E-1402B, E-1402C y E-1402D: Son los encargados de precalentar la carga antes de que pasen por primera vez a la torre fraccionaria y puedan ser extraídos los primeros vapores de hidrocarburos.

-Cámaras de reacción D-1401A y D-1401B: Estas cámaras son en donde se produce la coquificación retardada y se obtienen parte de los vapores de hidrocarburos y el carbón de coque.

-Fraccionadora T-1401: Es el equipo donde se fraccionan los gases de hidrocarburos obtenidos del proceso, para generar productos nuevos.

-Acumulador D-1415: Es donde se acumula todo el producto que es enviado desde las unidades de vacío para luego ser usado en el proceso.

-Condensador E-1401A/E: Este equipo condensa los vapores obtenidos de la torre fraccionaria, volviéndolos nuevamente líquidos (cambio de fase) para continuar con el Proceso de refinamiento.

#### Sección Recipientes de Purgas:

Este sistema fue diseñado con el fin de minimizar la contaminación atmosférica durante la operación normal de decoquizado. Incluye los siguientes equipos:

-Acumulador de purga D-1404: Su objetivo es separar del vapor de agua las ceras residuales (Hidrocarburos que no reaccionaron en la cámara de coque) que son enviadas desde la cámara de coque durante su proceso de enfriamiento. El flujo ingresa a una

temperatura entre los 154 a 449 °C, donde se produce la separación y las ceras son enviadas al fondo del acumulador o recipiente, donde se le extrae toda el agua que contiene (con presión y temperaturas adecuadas el agua se evapora).

-Aeroenfriadores E-1411: Son intercambiadores de calor, cuya función es enfriar el producto que pasa por su interior, ya sea en estado de gas o líquido. La planta cuenta con 4 de estos equipos que son utilizados para enfriar y condensar los hidrocarburos livianos y el vapor de agua que sale por el tope del acumulador de purgas cuando es dividido de las ceras.

-Acumulador de condensado de coque D-1402: Es un acumulador que recepciona todo los condensados que quedan en las líneas de vapor.

-Acumulador D-1405: Acá es donde llegan los hidrocarburos y vapores de agua condensados, luego de que sean enfriados por los cuatro aeroenfriadores (E-1411).

Los equipos nombrados, son solamente los principales de la planta, ya que debido a la variedad de equipos no es necesario entrar en detalle, ya que no es relevante en lo que se tendrá que evaluar. Cada uno de estos equipo va distribuido en diferentes partes de la planta (véase Fig. 3.2) con sus respectivos Tags.

De acuerdo al glosario, Tag es una sigla clasificadora de los diferentes equipos de la planta. A continuación se detalla en la tabla 3.1 los Tags de los equipos más importantes de la planta coker:

Equipo	Tags
Horno coker	H-1401
Compresor de gases	C-1401
Cámara de reacción	D-1401 <sup>a</sup>
Cámara de reacción	D-1401B
Acumulador de condensado de coque	D-1402
Acumulador de Purga	D-1404
Acumulador (condensados del acumulador de purga)	D-1405
Separador de Alta	D-1409
Acumulador Vapor-Aire	D-1411
Acumulador (Donde se recibe el producto enviado de Topping)	D-1415
Separador de baja	D-1416
Intercambiador de calor	E-1402 A
Intercambiador de calor	E-1402 B
Intercambiador de calor	E-1402 C
Intercambiador de calor	E-1402 D
Aeroenfriadores de calor	E-1411
Enfriadores de aceite de recirculación	E-1410
Precalentador	EH-1401
Torre fraccionadora	T-1401
Stripper Diésel	T-1402
Stripper G.O.P	T-1403
Estanque (Para el corte de agua)	TK-1401

## Tabla 3.1: Tags de equipos de la planta Coker

A continuación la distribución de la planta Coker (véase Fig.3.2)



Fuente: Obtenido del plano geográfico de la planta coquer, Archivo técnico, Enap Refinerias Biobío.

## 3.2 Proceso de coquificación retardada



*Fuente:* Elaboración propia basado en el proceso de coquificación retardada.

En simples palabras, la coquización retardada es un proceso de conversión de hidrocarburos poco valiosos, en productos de alto valor agregado, esto se logra calentando la carga de forma rápida en un horno, para luego ser enviada a una cámara de reacción donde bajo condiciones específicas de temperatura y presión, el efluente líquido que procede del horno se transforma en coque y en vapores de hidrocarburos. El coque que es retenido en la cámara de reacción se retira de forma mecánica y los vapores se envían a la torre fraccionaria donde se obtienen productos.

La carga para este proceso es el producto de fondo de las unidades de vacío y es denominado "PITCH".

En este proceso se pueden distinguir fácilmente algunas etapas:

- Vaporización parcial y craqueo leve de la carga o alimentación cuando pasar a través del horno.
- El craqueo del vapor a medida que pasa a través del tambor o cámara de reacción.
- Craqueo y polimerización del líquido contenido en la cámara hasta que es convertido en vapor y coque.

Todo este proceso comienza en el acumulador de carga que recepciona el pitch, donde una bomba lo succiona y lo envía a 4 intercambiadores (E-1402A, E-1402B, E-1402C y E-1402D), donde recibe el calor de reflujo intermedio de la torre fraccionaria (T-1401) antes de ingresar por el fondo de esta. Esto logra que se liberen algunos vapores de hidrocarburos que suben por la torre fraccionaria, mientras que la carga fresca diluida es tomada por bombas que la envían hacia el horno (H-1401), el que opera con dos pasos u hogares. (Ver Fig. 3.3)

La carga entra al horno por la zona de convección, donde es precalentada aprovechándose el calor de los gases de combustión que fluyen hacia la chimenea o hacia el sistema de precalentadores, donde alcanza una temperatura aproximada de 280°C.

Seguido de esto, luego de hacer abandono de la zona de convección entra a la zona de radiación, donde alcanza una temperatura aproximada de 500°C, que es la necesaria para que se produzcan las reacciones de coquización retardada.

Una vez que se abandona el horno, la carga es enviada a dos cámaras de reacción que son dos tambores de gran tamaño (D-1401A y D-1401B), cada una mide entre 8 o 9 metros de diámetro y 25 de alto. En uno de estos tambores se deja reaccionar el producto por 24 horas para su coquización, donde se le inyecta vapor y presión, mientras el otro tambor se prepara para recibir el producto, una vez que el tambor anterior tenga que ser despojado del producto obtenido. El sólido que queda en la cámara de reacción es el coque, éste es cortado a través de una lanza que dispara agua a presión. Primero es cortado de forma vertical creando un agujero en la zona central y luego de forma horizontal dejando precipitar el coque a un patio de cemento, donde luego es tomado por una excavadora y es introducido en una cinta transportadora hacia el domo (lugar donde se almacena el coque) o si no directamente es enviado a la planta Cogeneradora.

Este proceso tal como se explica es alternado, primero se llena un tambor y seguido que se termina de llenar, es llenado el otro, mientras que el primero deja reaccionar su producto y luego descarga el coque que se obtuvo para luego ser preparado y nuevamente llenado. Así continua el ciclo sin detenerse.

Los gases y vapores de hidrocarburos que no coquificaron en la cámara de coque, son extraídos por el tope de la cámara y enviados nuevamente a la torre fraccionaria para que vuelvan a extraerse productos, además que esta corriente nueva que es inyectada sirve como proceso de precalentado para las corrientes que son inyectadas al inicio.

Al llevar a cabo este proceso se obtienen los siguientes productos:

- Gas
- Nafta
- Diésel
- Gas oil pesado
- Coque

El coque obtenido en el proceso es prácticamente carbón puro con un alto poder calorífico y es conocido bajo el nombre de coque esponja, y es solo de uso industrial. En Enap es utilizado como combustible en la caldera de la unidad de Cogeneración perteneciente al proyecto Petropower, donde se genera vapor de alta presión y energía eléctrica, que primordialmente se ocupa en abastecer a la refinería y adicionalmente el excedente se exportara vía Transelec, hacia la empresa distribuidora de energía, Endesa.

#### 3.2.1 Sección de alimentación y carga del horno

Esta unidad tiene dos fuentes de alimentación, una fría desde el área de almacenamiento y una alimentación caliente desde el fondo de las torres de vacío.

La alimentación del horno es controlada en cada paso. El pitch entra por la zona de convección y luego pasa por la zona de radiación, emergiendo de ahí la temperatura deseada (500 °C). Los controles de temperatura mantienen las temperaturas individuales de cada serpentín del horno, regulando el flujo de gas combustible a los quemadores en cada paso del horno. Se inyecta vapor de alta presión (150  $lb/pulg^2$ ) a la entrada de cada serpentín como se requiera, especialmente cuando se opera a menor capacidad de diseño, para que se mantenga la velocidad de flujo y se minimicé la formación de coque en el horno.

Los rendimientos y calidad de los productos obtenidos en este proceso están relacionados directamente con las siguientes variables:

- 1) Temperatura
- 2) Presión
- 3) Razón de reciclo
- 4) Calidad de la carga

## 4. Hornos

## 4.1 Hornos en la industria:

Un horno o también llamado calentador por combustión, es un intercambiador de calor en el que el fluido de proceso fluye dentro de tubos y se calienta por radiación procedente de una llama de combustión que es generada al oxidar un combustible y por convección donde son aprovechados los gases calientes de dicha combustión. Estos equipos son el corazón de las plantas y operan de modo similar a las calderas.

La industria identifica estos hornos con nombres comunes tales como calentadores de proceso, horno, horno de proceso y calentadores de fuego directo.

La función principal de un horno de procesos es proveer una cantidad específica de calor al fluido que está siendo calentado, con altos niveles de temperatura, sin ocasionar sobrecalentamientos localizados del fluido o de los componentes estructurales. El tamaño de un horno de proceso está definido en términos de la capacidad de absorción de diseño o duty.

Hoy en día hay una enormidad de hornos en las industrias que son utilizados en diferentes procesos, que funcionan con diferentes cargas, pero todos cumplen la misma función que es intercambiarle calor a un fluido.

#### 4.1.1 Componentes del horno

a) Hogar o cámara de combustión: Espacio donde se produce la combustión completa de un combustible mediante una llama limpia y estable con la entrega de importantes cantidades de calor por radiación a un fluido en proceso.

**b) Zona Radiante:** En esta zona se produce transferencia de calor hacia la carga principalmente por radiación, pero también interiormente en los tubos se trasmite calor por conducción y convección.

En un horno cilíndrico vertical, la ganancia de calor llega hasta un 80% del total del calor recuperado. Los tubos siempre se encuentran refrigerados por el líquido a calentar (crudo reducido, etc).

c) **Zona Convectiva:** Es la zona del horno de procesos en la cual la transferencia a los tubos es primariamente por convección. Permite la recuperación de hasta un 25% del calor perdido.

**d**) **Tubos:** Realizan el transporte de masa dentro del horno y en este transporte se efectúa la transferencia de calor al fluido. Podemos encontrar tubos desnudos y aletados (mayor área de transferencia de calor).

-Tubos aletados: Con la finalidad de transferir la mayor cantidad de calor, los tubos de la zona convectiva han tenido una evolución en el tiempo (véase Fig.4.1). Presentan buena transferencia de calor, pero alta caída de presión y sobre todo la característica de un alto nivel de suciedad por el material particulado de los humos de combustión u hollín de combustibles líquidos, aún cuando se utilicen sopladores de hollín (equipo con bayoneta que inyecta vapor de 15 a 17  $kg/cm^2g$  sobre los tubos de la zona convectiva)



**Figura 4.1:** Tubos aletados **Fuente:** Imágenes obtenidas de la página tubos aletados www.aletasybirlos.com.

-Tubos aletados segmentados: Posteriormente se diseñaron tubos aletados segmentados que permiten una mejor limpieza por parte de los sopladores de hollín, la eficiencia térmica después de la limpieza con vapor es mejor que los tubos aletados pero la caída de presión es aún alta. (Véase Fig. 4.2)



**Figura 4.2:** Tubos aletados segmentados **Fuente:** Imágenes obtenidas de la página tubos aletados www.aletasybirlos.com.

e) Chimenea: conducto vertical usado para descargar los gases de combustión a la atmosfera. La altura de la chimenea depende normalmente de requisitos de contaminación atmosférica por dilución de humos. También hay que tener en cuenta el tiro de la chimenea cuando este es natural.

**f**) **Refractario:** La estructura metálica del cilindro se recubre internamente con un material aislante térmico. Además de cumplir la función de prevenir el sobrecalentamiento de la estructura de acero, el aislante sirve para mantener el calor de la cámara de combustión a altas temperaturas por la radiación del calor hacia el tubo y con ello además minimiza las pérdidas de calor. Este aislante sirve también como una barrera para prevenir la fuga de material particulado de los gases de combustión a través de la estructura metálica.

**g**) **Termocuplas:** Son dispositivos para medir temperatura. En los hornos se utilizan para controlar la temperatura del metal de los tubos, además evitan que estos excedan la temperatura máxima permisible, se encuentran soldada a las pareces de los tubos.

**h**) **Serpentín de tubos (coils):** Los serpentines de tubos del horno, están compuestos por tubos rectos y U-bends. La posición del serpentín, con referencia al eje del tubo, es horizontal o vertical. Los de posición horizontal tienen ventajas desde el punto de vista de proceso ya que se observa una mejor estabilidad de un flujo.

i) **Dámper:** Es una compuerta ubicada en la chimenea en el trayecto de los gases de combustión. Permite manipular la presión interna del horno, de manera que se alcance el nivel de tiro recomendado en la cámara de combustión.

**j**) **Soporte de tubos:** Estos componentes se utilizan para soportar los tubos internos del horno. Para soportar un tubo vertical, solo son necesarios dos soportes independientemente de la longitud del tubo. La disposición de tubos verticales es más ventajosa que la de los tubos horizontales, ya que para soportar un tubo horizontal se necesitan más de dos soportes por tubo.

**k**) **Quemadores:** Los quemadores tienen por finalidad provocar la mezcla interna del aire y el combustible para obtener la combustión más completa posible.

Todos los quemadores poseen entradas de aire primario y aire secundario; el aire primario tiene como objetivo el suministro de aire en exceso para la combustión, el aire secundario permite modular la forma de llama en la cabina de la zona radiante.

El combustible desemboca en la corriente de aire en el centro de un anillo refractario, que por el calor que irradia, asegura la estabilidad de la llama.

I) Mirillas y puertas de entrada: Las mirillas son aberturas que sirven para poder observar la llama y su posible incidencia en el serpentín de los tubos dentro de la cámara de radiación. Las puertas de entrada permiten el acceso al interior del horno para la inspección y mantenimiento de los componentes internos con el equipo fuera de servicio. Estos accesorios no deben permanecer abiertos ya que se promueve ingreso de aire que afecta la eficiencia térmica del horno.

**m**) **Deshollinadores:** En el caso que el horno utilice petróleo industrial como combustible, es necesario el uso de deshollinadores o "Soot Blowers". Son lanzas de vapor que pueden rotar y que van inyectando vapor a través de orificios existentes a lo largo del a lanza. Permite la remoción de cenizas, óxidos de vanadio y otros depósitos que se forman en la superficie extendida de los tubos de la zona convectiva.

**n**) **Zona bridgewall:** también llamada zona de choque, se encuentra entre las zonas de radiación y convección. Tiene por objetivo, proteger la zona convectiva de la radiación directa de la llama (ver fig. 4.6)

El horno H-1401 es el corazón de la planta coker, opera en la refinería Enap Bío-Bío desde el año 1996 y es el encargado de suministrar energía necesaria para efectuar el proceso productivo o de conversión para el cual fue diseñado (coquificación retardada).

Este horno es del tipo indirecto con doble cabina y posee zonas radiantes y convectivas gemelas, tubos dispuestos horizontalmente tanto la zona de radiación como la de convección y fuego vertical para ambas caras, además posee dos pasos lo que significa que posee dos hogares o cámaras totalmente independientes, por donde los gases de cada cámara sale por ductos separados encontrándose en una salida donde los gases son enviados hacia el pre-calentador de aire o hacia una chimenea común.



**Figura 4.3:** Vista frontal y lateral del horno H-1401 **Fuente:** Archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

Los tubos de la zona radiante se disponen en una sola fila con una distancia entre centros de 305 y 203 mm y en la zona convectiva se tienen 3 filas de tubos desnudos y 9 filas de tubos aletados. (ver Fig. 4.5 y 4.6)

La presión de diseño de los tubos es:

Proceso: 10  $[kg/cm^2 g]$  para diseño elástico y 53  $[kg/cm^2 g]$  para ruptura.

Recalentamiento de vapor: 12,3  $[kg/cm^2 g]$ 

Las dimensiones generales del horno son de 23,13 x 12 x 3 m y de altura sin contar los ductos y su chimenea es de 12,35 m.

Actualmente se encuentra operando por encima de la capacidad de diseño (2.300 o más  $[m^3/dia]$ ) de la unidad de carga actual promedio frente a los 13.200 BPD de capacidad de diseño que corresponden a aproximadamente 2.100  $[m^3/dia]$ 

Cada paso posee 36 quemadores de fuel gas que van montados a los costados de cada hogar con sus respectivos pilotos (ver fig.4.4). El interior del horno va revestido en sus paredes con ladrillos refractarios que sirven para contener el calor y también como resistencia para que la carcasa del horno no sobrecaliente su temperatura máxima de diseño.



**Figura 4.4:** Quemadores del horno H-1401 **Fuente:** Archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

El horno cuenta con dos zonas para el intercambio de calor como se nombró anteriormente, una es la zona de convección del horno, por donde la carga entra a 312°C y gracias al aprovechamiento de los gases de combustión, el fluido aumenta su temperatura hasta llegar a los 380°C aproximadamente.

La segunda zona es la de radiación. Esta zona es donde el flujo recibe la mayor cantidad de energía, ya que el incremento de temperatura que se logra es alto, llegando hasta los 505 °C en la salida del efluente en el horno (ver Fig. 4.5 y 4.6)



*Figura 4.5:* Componentes de un horno tipo cabina del tipo indirecto (H-1401). *Fuente:* Elaboración propia basado en el horno H-1401.

1 Pared refractaria	4 Plataforma	7 Mirilla	10 Tubos
2 Ducto	5 Pilar	8 Soporte de tubos	11 Cajas
3 Arco	6 Vigas	9 Espesor pared	12 Lana cerámica
El flujo que pasa por el interior de este horno es el denominado Pitch, que como fue visto anteriormente, es el flujo que se extrae de las torres de vacío 1 y 2 (también denominadas Topping 1 y 2).

En resumen el horno entrega energía calórica al flujo de carga que pasa por sus coils (pitch), logrando un incremento considerable de temperatura (aprox. 307°C a 496°C), que es la temperatura necesaria para que se evaporen los hidrocarburos ligeros y se logre la conversión de coque en las cámaras de reacción.

Una vez que sale la carga de pitch con la temperatura incrementada, se dirige hacia las cámaras de coque para continuar con el proceso.

Para tener una mejor claridad de las zonas del horno vea fig. 4.6.

Diseño Mecánico						
Sección del horno	Radiante	Convección 2	Convección 1	Convección	Unidad	
	Pitch	Pitch	Pitch	Vapor		
Numero de pasos	2	2	2	2		
Largo tubos	22.880	22.880	22.880	23.435	mm	
Número de tubos desnudos por paso	20	6	0	0		
Número de tubos aletados	0	10	4	4		
Superficie expuesta tubos desnudos	328,6	98,6	0	0	$m^2$	
Superficie expuesta tubos aletados	0	1942	434	434	$m^2$	
Espaciamiento entre tubos (centros)	2x305 & 203	203,2	203,2	203,2		
Espaciamiento entre tubos y muro		101,6	101,6	101,6	mm	
Espesor adicional por corrosión	6	6	6	6	mm	

Tubos					
Posición	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	
Diámetro externo Tubos	114,3	114,3	114,3	114,3	mm
Espesor de pared (promedio)	11,3	11,3	8,5	8,5	mm
Temperatura máxima de metal					°C
(diseño)	645	645	482	482	C
			11/4%Cr-1/2%	11/4%Cr-1/2%	
Material de tubos	9%Cr-1% Mo-V	9%Cr-1% Mo-V	Мо	Мо	
Tipo de aletas	ninguno	aletas solidas	aletas solidas	aletas solidas	
Material de aleta x espesor		12%Cr x 1,5	12%Cr x 1,5	12%Cr x 1,5	
Temperatura máxima aletas		485	538	538	°C

Fuente: Pares&Alvares Ingenieros asociados, Ficha horno H-1401, noviembre 2006.



*Figura 4.6:* Zonas del hogar del horno H-1401 *Fuente:* Elaboración propia basada en los planos del horno H-1401.

## 4.2.1 Composición del horno:

#### Armario:

-Deflectores de espesor 5 mm.

-Material aislante fibra cerámica 128  $[kg/cm^3]$ , espesor 75 mm.

-Compuerta de la caja de cabezales fijada con pernos.

#### Aislación:

El horno cuenta con ladrillos refractarios y otros materiales más como aislante:

-Piso:

El piso del horno está constituido por varios materiales, primero encontramos un casing de 6 mm aproximados + 177 mm de Insulation Concrete Class LW MIX 106 + 75 mm de Insulation Concrete Class LW MIX 124 + 53 mm de ladrillo refractario de primera calidad, lo que da un total de **315 mm de espesor.** En la fig. 4.7 se puede apreciar cómo está compuesto el piso del horno.



*Figura 4.7:* Espesor de piso de la aislación del horno h-1401 *Fuente:* Dibujo obtenido del plano 8196-A1-24-004, Archivo técnico, Enap Refinerías Biobío.

-Paredes:

Las paredes de los costados cuentan con dos capas que suman 50.8 mm de fibra cerámica + 170 mm de ladrillo refractario K-28 lo que da un total de **220,8 mm de espesor.** En la figura 4.8 se puede apreciar cómo está constituida la pared.



*Figura 4.8:* Espesor de la pared del horno h-1401 *Fuente:* Dibujo obtenido del plano 8196-A1-24-004, Archivo técnico, Enap Refinerías Biobío.

Las paredes frontal y trasera cuentan con un **espesor de 190 mm** que consiste en 38 mm de fibra cerámica de 128  $[kg/m^3]$  con una capacidad nominal de 1280°C + 50.8 mm de fibra cerámica de 96  $[kg/m^3]$  con una capacidad nominal de 1280°C + 2 mm de asphaltic cutback behind al ceramic fiber + 5 mm PL.

### 4.2.2 Operación

La carga que es enviada desde las torres de vacío 1 y 2, entra al horno por la zona de convección, donde es precalentado el pitch aprovechando el calor de los gases de combustión, que fluyen hacia la chimenea o hacia el sistema de pre-calentadores de aire.

Seguido de esto, abandona de la zona de convección para entrar a la de radiación, donde aumenta su temperatura hasta alcanzar una temperatura de operación que fluctúa entre los 496°C a 505°C. Estas temperaturas son controladas con los TC132A y TC132B, que son controladores de temperatura que se encuentran en ambos pasos del horno, que actúan en cascada sobre los FC169 A y B que son controladores de flujo que controlan la cantidad de fuel gas a combustionar en cada paso del horno.

La presión en las cámaras de coque es de 1,05  $[kg/cm^2]$  y es una resultante que depende directamente de la presión controlada de la succión del compresor de gas (C-1401) y de las pérdidas de carga del sistema.

El aire que se necesita para quemar el fuel gas proviene del sistema de pre-calentadores de aire o del ambiente, si el horno está en tiro natural. Estando los hornos en tiro forzado, la cantidad de aire para una buena combustión en el hogar se controla por medio de otros medidores de flujo (FC168A y FC168B), usando parámetros de ajuste, los analizadores de exceso de oxigeno que están instalados en el techo de radiación de cada celda del horno.

Operación				
Sección del horno	Radiante/convección	Convección	Convección	Unidad
Fluido	Pitch	Vapor #1	Vapor #2	
Densidad	870			kg/m <sup>3</sup>
Caudal	89.529	6.944	1.167	kg/h
Caudal	13.200			BPSD
Temperatura de entrada	298	190	186	°C
Temperatura de salida	504	220	343	°C
Presión de entrada (limpio)	19,8	12	10,6	kg//cm <sup>2</sup> g
Presión de salida	3,5	11,7	10,5	kg//cm <sup>2</sup> g
Calor absorbido por el Pitch	17,023	0,139	0,101	M kcal/h
Densidad de calor (calculada)	36.620			kcal/h/m <sup>2</sup>
Temp. Diseño Metal Tubo	645	482	482	°C
Rendimiento Rad.	92,5			%
Temp. Humos Salida conv.	380			
Temp. Humos salida APH		°C		
Perdidas en la zona de radiacion		%		
Calor Liberado	]	18,14		M kcal/h

Tabla 4.2: Parámetros de operación del horno H-1401

Fuente: Ficha horno H-1401, Pares&Alvares Ingenieros asociados, noviembre 2006.

### 4.2.3 Combustión:

La combustión es un proceso de oxidación mediante el cual se libera energía química de un combustible en forma de calor. El combustible utilizado en el horno H-1401, es el denominado "fuel gas", el cual es una mezcla de hidrocarburos provenientes de todas las plantas de la refinería.

Dada las variaciones en la composición del fuel gas, el consumo del horno puede variar para ajustarse a los requerimientos del sistema de control.

Enap Refinerías Biobío lleva un riguroso registro de datos de la composición del "fuel gas", datos que serán utilizados para el cálculo.

La tabla 4.3 entrega las especificaciones del fuel gas para la operación de diseño y para la operación actual.

Dado que los valores de composición van variando y no cuentan con una composición fija, se ha sacado un promedio en cada componente para estimar la composición.

Las características de los quemadores que posee el horno son:

#### Quemadores:

-Lineal con puertos de ignición, para gas solamente.

-Cantidad: 72, 36 por paso.

-Locación: inclinado al muro.

-Pilotos: uno por quemador, con aire aspirado del plenum.

-Calor liberado por quemador con exceso de aire de diseño:

-Normal: 0,26 Mkcal/h con aire @ 310 °C; 0,29 Mkcal/h con aire ambiental.

-Máxima: 0,32 Mkcal/h con aire @ 310 °C; 0,35 Mkcal/h con aire ambiental.

4.3: Composición volumétrica del Fuel gas				
	Unidad	Operación de Diseño	Operación actual	
$H_2S$	% mol	0	0,06	
$H_2$	% mol	40	33,62	
<i>O</i> <sub>2</sub>	% mol	0	0,03	
$N_2$	% mol	0	2,92	
СО	% mol	0	0,43	
<i>CO</i> <sub>2</sub>	% mol	0	0,53	
CH <sub>4</sub>	% mol	30	37,51	
$C_2H_6$	% mol	10	8,08	
$C_2H_4$	% mol	2	2,11	
$C_3H_8$	% mol	5	4,77	

2

3

3

1

1

1

1

0

1,56

2,56

2,4

0,34

0,44

1,07

0,45

0

Tabla 4.3:	Composición	volumétrica	del	Fuel	gas
------------	-------------	-------------	-----	------	-----

Componente

Ácido Sulfhídrico

Monóx. Carbono Dióx. Carbono

Hidrógeno Oxígeno Nitrógeno

<u>Metano</u> Etano Etileno Propano

Propileno

Isobutano

n-Butano

t-Buteno

1-Buteno

iso-Buteno

cis-Buteno

1,3-Butadieno

1 Isopentano  $C_5 H_{12}$ % mol 0,49 0 0,18 n-Pentano  $C_5 H_{12}$ % mol 0 0.51 Hexanos+pesados  $C_6 H_{14}$ % mol Fuente: Elaboración propia basado en los componentes obtenidos del departamento de ingeniería, Enap

% mol



 $C_3H_6$ 

 $C_4 H_{10}$ 

 $C_4 H_{10}$ 

 $C_4H_8$ 

 $C_4H_8$ 

 $C_4H_8$ 

 $C_4H_8$ 

 $C_4H_6$ 



Figura 4.9: Distribución de los componentes del Fuel Gas. Fuente: Elaboración propia basado a partir de los componentes del Fuel gas.

#### 4.2.3.1 Consumo de combustible en el horno H-1401

En la Fig. 4.10 se puede apreciar el consumo de fuel gas del horno desde el 09-11-2014 al 06-03-2015, que considera el periodo de la puesta en marcha después de la limpieza de los tubos hasta la semana que se realiza la limpieza siguiente.



**Figura 4.10:** Consumo de fuel gas en el periodo Noviembre-Marzo **Fuente:** Elaboración propia basado a partir de los datos obtenidos sobre el consumo del Fuel gas.

*Obs:* En el gráfico de la figura 4.10 se puede apreciar un incremento en el consumo del *Fuel gas, esto implica que el espesor de la costra de coque es más grande por lo que requiere un mayor consumo de combustible para alcanzar la temperatura esperada para el pitch.* 

#### 4.2.3.2 Condiciones de combustión:

Estos datos son los entregados por el fabricante

- Tipo de Combustible: Gas
- Exceso de aire: 10%
- Eficiencia garantizada: 92%
- Eficiencia calculada: 92,5%
- Pérdida por radiación: 3 %
- Temperatura Fuel Gas abandonando sección radiante: 843 °C (diseño)

- Temperatura Fuel Gas abandonando pre calentador de aire: 143 °C
- Velocidad de masa de Fuel Gas de sección de convección:  $1(kg \cdot m^2/s)$
- Coeficiente convectivo de los gases de combustión: 8,5 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
- Temperatura ambiente (min, máx.) de diseño: [-1, 30 31] °C
- Succión en quemadores: 7,5 mm $H_2O$
- Liberación de calor calculada: 18,52 Mkcal/h

La eficiencia calculada sin precalentador es de 82%.

(Valores sacados del manual de operaciones de la planta coker)

#### 4.2.3.3 Características del combustible:

-Tipo: Gas

- -Peso molecular: 20,63 (kg/kmol)
- -Densidad: 0,79 ( $kg/m^3$ )

-Poder calorífico inferior: 11250 (kcal/kg)

-Poder calorífico superior: 9752 ( $kcal/m^3$ )

(Valores sacados del manual de operaciones de la planta coker)

## 4.2.4 Condiciones de entrada y salida del pitch

#### Condiciones de entrada Pitch

Densidad Pitch	6,4	[API]	1025,08	[kg/m3]
Viscosidad cinemática	5,46	[CKS]	5,46E-06	[m^2/s]
Viscosidad dinámica	5,6	[cP]	5,60E-03	[kg/m*s]
Temperatura de entrada	307	[°C]		
Calor especifico Pitch	0,696	[kcal/kg°C]	2,913	[kJ / kg]
Conductividad térmica	0,076	[kcal/hm°C]	0,088	[W/ m K]

### **Condiciones de salida Pitch**

Densidad Pitch	0,3	[API]	1072,52	[kg/m3]
Viscosidad cinemática	0,014	[CKS]	1,40E-08	[m^2/s]
Viscosidad dinámica	0,015	[cP]	1,50E-05	[kg/m*s]
Temperatura de salida	496	[°C]		
Calor especifico Pitch	0,714	[kcal/kg°C]	2,989	[kJ / kg]
Conductividad térmica	0,055	[kcal/hm°C]	0,064	[W/ m K]

## 5. Coquificación en hornos

### 5.1 Formación de coque

La refinación es el proceso que se encarga de la transformación de los hidrocarburos en productos derivados, comprendiendo una serie de procesos de separación y purificación, mediante los cuales el crudo es convertido en subproductos tales como: combustibles y productos químicos de uso doméstico e industrial. Todos estos procesos implican un deterioro considerable en las tuberías de los serpentines de los hornos donde estos son procesados, los que implica su mantenimiento para un buen funcionamiento, ya que el crudo cuando se somete a condiciones de presión y altas temperaturas debido a su composición molecular, inicia un proceso de coquificación, el cual se adhiere a las paredes internas de las tuberías de los serpentines, que se encuentran en el horno y forma una especie de costra. Este fenómeno además de reducir el diámetro interno de la tubería (lo que ocasiona una merma considerable en su capacidad volumétrica), incrementa la temperatura de piel de tubo, esto debido a que el coque es un aislante térmico natural, imposibilitando la refrigeración del tubo, ocasionando que el tubo sobrepase su temperatura de diseño y afectando de manera considerable la transferencia de calor que se produce desde el hogar del horno al fluido. Este incremento en la temperatura de piel de tubo, ocasiona deformaciones mecánicas produciendo un fenómeno llamado "creep". Creep es una falla mecánica por termofluencia, que ocurre cuando un material es sometido a altas temperaturas y presiones y tiende a deformarse con el tiempo, llegando a un punto que sobrepasa su límite elástico y se produce ruptura (véase Fig.5.1). Esto pone en riesgo la integridad del horno debido a eventuales fugas de producto que puedan originar explosiones.



Figura 5.1: Tubo dañado por creep. Fuente: Archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

Además del creep, la formación de coque en el interior del tubo genera una eventualidad de efectos negativos tales como: corrosión en la cara interna y externa de la tubería por el aumento de temperatura de piel de tubo de los serpentines, disminución de la conductividad térmica por la formación del coque en la cara interna de la tubería, daño a nivel molecular de la metalurgia de los tubos, aumento de la caída de presión producto de la reducción del diámetro interno de los pasos, la cual ocasiona un fluido desuniforme a lo largo de los mismos, la disminución del espesor del tubo, pandeo y fuga (véase Fig.5.2) entre otras. La razón primaria de que se formen estos depósitos, es el excesivo flujo calórico sobre una determinada zona, bajo flujo y velocidad del fluido dentro de los tubos, alto índice de viscosidad que hace que se adhiera más el producto a la superficie del tubo, esto se debe ya que el pitch no recibe todo el calor que debería, por lo tanto no alcanza la temperatura necesaria y por ende su viscosidad es más alta de lo que debiera.



*Figura 5.2:* Pandeo de tubos al interior del horno. *Fuente:* Archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

El proceso de coquificación en la tubería de los hornos es producto de la vaporización que sufre el flujo anular del crudo en la zona terminal de radiación por efecto del proceso térmico. Este efecto incrementa la velocidad lineal del flujo anular desplazando a las paredes de la tubería, en forma de flujo laminar, residuos aromáticos y origina una caída de presión y disminución de la velocidad de dicho flujo produciendo una solidificación del producto petrificándolas y estacionándolas en la superficie interna de la tubería (véase Fig.5.3).



*Figura 5.3:* Costra de coque formado en el interior del tubo. *Fuente:* Archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

La formación de coque es una anomalía que no se puede eliminar en forma permanente, y por más que se limpie volverá a formarse una costra, por lo que las mantenciones en los tubos cada cierto tiempo son indispensables para que el horno funcione adecuadamente. Debido a esto se han buscado formas para que la formación de coque se pueda desacelerar de modo que se pueda tener el horno el mayor tiempo en funcionamiento antes de realizar su mantenimiento

El parámetro que se utiliza principalmente en la empresa para medir esta anomalía es la temperatura.

Es esencial señalar que de los 20 tubos que hay en la zona de radiación del horno, cuatro poseen termocuplas (son los 4 primeros tubos de la parte inferior de la cabina). Estos tubos son los críticos del horno y son los que se encuentran expuestos a mayor radiación por parte de los quemadores.

Las termocuplas son utilizadas para tener un monitoreo constante de temperaturas de piel de los tubos. Cuando las temperaturas de diseño son sobrepasadas se solicita realizar una inspección termográfica, por ende se envía a un inspector de mantención, quien a través de una cámara especial realiza una termografía en los puntos afectados, analizando en detalle los puntos calientes del metal y visualizando si el tubo adquiere un color más anaranjado, para luego realizar un informe y dar conocimiento del problema a operaciones. Ellos toman la decisión si es momento o no de realizar un Decoquificado. Cabe señalar que el espesor máximo permitido en el horno según planos de diseño es de 5 mm.

Cuando ya varios tubos son los que presentan temperaturas sobre la de diseño se llama a una empresa contratista de mantenimiento, que en este caso es Nexxo, y éste realiza el Decoquificado de ambos pasos del horno.

## 6. Decoquificado

El Decoquificado es un mantenimiento que en resumidas cuentas ayuda a eliminar los residuos adheridos en las paredes internas de los tubos de un horno de proceso. Por lo tanto el objetivo del decoquificado es impedir que se ocasione el sobrecalentamiento del serpentín del horno, eliminando la resistencia térmica (capa de coque) que impide la refrigeración de los tubos y ayuda a que la vida útil de estos pueda ser más duradera. Este tipo de mantenimiento es primordial en la planta ya que algún evento catastrófico o

alguna parada repentina de planta conlleva pérdidas enormes a la empresa.

El Decoquificado es un mantenimiento que se ha desarrollado ya hace años y como cada ciencia y tecnología, ha ido evolucionando con el tiempo, y se han implementado nuevas técnicas, unas más eficientes que otras, pero todos con el mismo fin, la limpieza de los tubos.

## 6.1 Tipos de decoquificado:

Los principales decoquificados que se usan hoy en día en refinerías son los siguientes:

#### 6.1.1 Decoquificado mecánico mediante Piggs (Pigging Decoking):

Este tipo de Decoquificado es uno de los más nuevos en la industria. Es un sistema de limpieza que es realizado con una herramienta llamada "Pigg" (ver fig. 6.1) que tiene resaltes metálicos específicos para cada proceso (según sea la dureza del carbón). Este dispositivo es utilizado para raspar el coque adherido al interior de los serpentines del Horno impulsado por agua a presión.

#### 6.1.1.1 Terminología:

1) Lanzaderas: Estructura cilíndrica de distintos diámetros, encargados de realizar el lanzamiento/recibimiento de Piggs ya sea por medio de presión hidráulica o neumática. Los lanzadores son partes de las conexiones iníciales del horno.

2) **Spool:** Es un circuito de cañerías soldadas que es utilizada para poder trabajar en un sitio alejado al sitio principal de trabajo o montaje, creándose un nuevo circuito que esté

más accesible para los obreros y técnicos. En esta ocasión es utilizado para servir de apoyo en la instalación de las lanzaderas, de modo que ambas queden a nivel de piso y se tenga un mejor manejo y control durante el proceso de limpieza. El Spool se instala en la entrada convectiva del Horno y como ésta queda en altura, el tubo va instalado en forma vertical, de modo que la lanzadera sea instalada a la misma altura que la que sale de la zona de radiación.

**3) Bombas:** Estas bombas (dos) son las que le dan la presión necesaria al Pigg para que pueda romper y arrastrar el coque adherido a las paredes interiores de los tubos del serpentín.

**4) Sala de Motores:** Sala del camión en donde se encuentran los dos motores encargados de realizar la Operación de Decoquificado según etapas del procedimiento.

**5**) **Sala de control:** Sala del camión en donde se lleva un completo análisis y control de la Operación de "Decoking" del Horno o Equipo a intervenir.

**6) Piggs:** Es un dispositivo flexible de limpieza interna de tuberías con capacidad de navegar a través de áreas coquificadas (ver Fig.6.1), curvaturas de 180°C y Plug heads 90°, con una dureza que permite arrastrar y desprender cualquier tipo de coque que se encuentre adherido internamente. Está diseñado y fabricado a base de mezclas de diferentes polímeros.



**Figura 6.1:** Piggs. **Fuente:** Archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

Son utilizados dos tipos de Piggs:

**Pigg cortador:** Posee espárragos más filosos y es el encargado de arrancar el coque adherido.

Para la selección del Pigg adecuado se tendrá en cuenta:

-La dureza del depósito

-El tiempo de acumulación del coque

-La ubicación del depósito

-El material específico de la tubería

Cabe señalar que los Pigg poseen diferentes tamaños, pero como el diámetro de los tubos del hogar de los hornos de la planta son hasta 4" se utilizan pigg en un rango de 2" hasta 4".

Los Piggs poseen espárragos diferentes ya sea para cortar o pulir las paredes de coque en cada pasada, a continuación algunos de los espárragos más utilizados en el proceso:

**Tipo TBC Tipo HMT** Tipo SH Tipo HW6 Tipo TWB Función: Función: cortar Función: Función: Tajar la Función: Remover coque de las Remover partículas de coque el coque con Cortar el superficie del coque paredes del tubo no excediendo del dejadas mayor coque de liberando de esta forma 8% al 10% del diámetro interno de en las tuberías y al mismo superficie de mayor su presión interna la tubería, combinando la forma de tiempo ejercer una contacto. grosor en la fragilizándolo para que ataque con el uso de arandelas. acción de pulitura en superficie sea removido por los la sección interna de del tubo. siguientes espárragos. la misma. Permitiéndose exceder de un 10% o 12 % del diámetro interno de la tubería.

Tabla 6.1: Tipos de espárragos de los Piggs

Figura 6.2: Tipos de espárragos de los Piggs.

*Fuente:* Descoque Descostre Tecnología C.A. (empresa contratista que desarrollo decoquificados en Enap), www.descoque.com.

## 6.1.1.2 Equipos y herramientas

- 1) Sala de motores y sala de control.
- 2) Bombas
- 3) Lanzadores

42

- 4) Piggs (raspadores y pulidores)
- 5) Herramientas de torque.
- 6) Grúa horquilla y/o camión pluma (de requerir)
- 7) Spool
- 8) Todo el EPP (elementos de protección personal) requerido.
- 9) Herramientas varias (extensiones de mangueras, carrito para transportar herramientas, etc).
- 10) Transformadores, extensiones eléctricas, iluminación interior/exterior.

#### 6.1.1.3 Actividades de procedimiento

La empresa antes de realizar cualquier tipo de acción o instalación de faena realiza un vaporizado en los tubos de manera que puedan "ablandar" un poco más el material adherido a los tubos. Este vaporizado en teoría debería durar 12 horas, pero eso depende de la persona encargada en el proceso.

Antes de la operación de decoquizado, es requerida suficiente agua para llenar los pasos del horno y el depósito de agua limpia para las unidades de bombeo.

Una válvula de bola llena separa cada lanzador/ receptor de la tubería del horno. Al operar estas válvulas, los lanzadores/ recibidos pueden ser periódicamente aislados del sistema para cargar, recobrar o cambias los Piggs.

Una vez que los tubos de los hornos están llenos, los técnicos circulan agua solamente, con el fin de eliminar los hidrocarburos restantes y los residuos sueltos.

El proceso de eliminación del coque se inicia con un Pigg de prueba tipo esponja, que se lanza a través de la tubería, hasta ser recibido en la correspondiente entrada o salida de ésta. Después de inspeccionar la densidad de la espuma y el estado del Pigg de prueba, se determina el diámetro deseado para la limpieza de la tubería.

Durante el procedimiento, se incrementa el tamaño de los Pigg y el tipo a utilizar. Estos se determinan en base a la experiencia y entrenamiento de los técnicos y es un factor determinante dentro del proceso de limpieza.

El número de pasadas por Pigg es relativo, se verá en el transcurso del proceso. La experiencia del operador de la sala de control del camión, será el que considere cuantas

pasadas y qué tipo de Piggs se utilizarán en el decoquificado, pero generalmente son 10 pasadas por Pigg.

Enumerando de manera general los procedimientos a seguir.

1) La empresa realiza un vaporizado en el paso al cual se le aplicará el decoquificado, este proceso idealmente debería durar unas 12 horas.

2) Se realiza ASR (análisis sistemático de riesgo) para dar a conocer posibles riesgos durante la operación.

3) La sala de motores y la sala de control queda instalado a un costado del horno para iniciar decoquificado.

4) Una grúa se instala en un sector cercano al horno.

5) Se espera la autorización para luego proceder a la instalación de faena.

6) Se instala la manguera a la red contra incendios.

7) Se inicia el montaje del spool y lanzaderas.

8) Se realiza el desmontaje de carretes en la zona convectiva y radiante.

9) Se comienza el montado de andamios en el sector sur del horno.

10) Retiro de tapas en el sector sur del horno.

11) Se abren compuertas y se revisan las condiciones para inicial el decoquificado.

12) Se inicia un Test de fluido inicial para luego dar comienzo al decoquificado del paso.

13) Se realizan varias pasadas con diferentes piggs y se utilizan esponjas para cerciorarse que vaya quedando limpio.

14) Una vez finalizado el decoquificado, se comienza con la prueba de hermeticidad e inspección del horno.

15) Es realizada la prueba de hermeticidad a 54 bar por una hora para cerciorarse de que no ocurran filtraciones ni hayan daños en la cañería.

16) Después de realizada la prueba con total éxito se comienza a normalizar el paso.

17) Una vez finalizado el primer paso se realizara exactamente lo mismo para el paso dos.

Generalmente en los decoquificados para que no pare la producción, se tiene funcionando un hogar por lo que la carga trabaja al 50%, mientras que el otro entra en mantención. Una vez que este sea decoquificado y normalizado, entra en funcionamiento para luego poner en mantención el hogar que estaba en proceso.

En cambio durante las paradas generales de planta, en vez de parar un hogar, se paran ambos, deteniendo por completo la producción, para decoquificar los dos hogares al mismo tiempo.



**Figura 6.3:** Procedimiento de decoquificado mecánico mediante Piggs. **Fuente:** Elaboración propia basado en un circuito visto en archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

En la Fig. 6.3 se puede observar de manera gráfica el proceso de limpieza del serpentín. El pigg es depositado en el lanzador y es impulsado por agua a presión (bombas), dándole el sentido con el uso de válvulas, de modo que vaya raspando el coque adherido. En este proceso, como se dijo anteriormente, se utilizan variados tamaños de pigg. Por lo general los serpentines del hogar de los hornos, son de 4" de diámetro como máximo por ende se utilizarán pigg menores a este tamaño de modo de no producir daños en los tubos.

Se realizarán muchas pasadas de Piggs, las necesarias para que se desprenda el coque alternando los pigg cortadores con los pulidores y siempre el proceso de limpieza comenzará con Piggs de diámetros más pequeños. Se irá aumentando el tamaño conforme

vaya desprendiéndose el coque, de modo de no forzar el proceso de limpieza y no causarle daños al serpentín.

Cada vez que el pigg recorra todo el circuito ya sea de la zona de radiación a convección o viceversa (depende del sentido que se le dé con las válvulas) el coque que saldrá irá a un depósito de coque (ver Fig.6.4)



**Figura 6.4:** Proceso de decoquificado (depósito de coque). **Fuente:** Elaboración propia basado en un circuito visto en archivos DIM (División ingeniería mantención), Enap Refinerías Biobío.

El depósito de coque posee un filtro (malla) para que todo el coque que se extraiga del serpentín sea separado del agua, y pueda ser utilizado.

### 6.1.2 Decoquificado vapor-aire

El procedimiento de decoquificado con vapor-aire, se divide en dos partes, barrido y quemado. Durante el barrido, el vapor se introduce a altas velocidades mientras se sube la temperatura del horno al paso que va a ser decoquificado. El coque es barrido de los coils de hidrocarburos y conducido fuera de él. Luego que el barrido se ha terminado, se reduce la cantidad de vapor y el aire se introduce al coil para iniciar el quemado. La pequeña cantidad de coque remanente es removido por oxidación directa.

Antes de iniciar el proceso el paso del horno debe estar sin carga y completamente apagado.

#### Luego:

1) Una vez que es quitada la presión al paso al cual se le realizará el servicio se procede a unir las salidas de ésta al acumulador D-1411 por medio de flanges para empezar el decoquificado.

2) Se comienza a encender el número de quemadores que el horno necesite, para iniciar la subida de temperatura.

3) Se utiliza la temperatura de fuel gas al máximo en la sección de radiación ajustando los registros de aire de cada quemador y temperatura de metales del coil para controlar la razón y uniformidad de la subida de temperatura. Tener presente que la temperatura del fuel gas no debe exceder de 732°C.

4) Se comienza a inyectar vapor al coil cuando la temperatura de metales alcanza los 148
°C, con esta temperatura se evita la condensación del vapor en el coil.

Un caudal de 2106 kg/h es recomendado para tubos de 4.5" de diámetro.

5) Se sube la temperatura a razón de 50 °C/h hasta lograr los 450°C de temperatura de metales.

6) Se permanece en esa condición y se observa el efluente para ver si hay desprendimiento, si es que lo hay, se mantiene la temperatura hasta que éste termine, dando pequeños golpes de vapor, para asegurar de que ya no existe desprendimiento a esa temperatura.

7) Se continúa subiendo la temperatura en el coil hasta que empiece a ver desprendimiento de coque en el efluente del D-1411. Cuando se logre eso se mantiene la temperatura mientras el desprendimiento sea continuo. Cuando el desprendimiento sea mínimo en el coil se deben realizar pequeños golpes de vapor, cortando unos 500 kg/h y volviendo a normalizar después de uno o dos minutos.

8) Cuando ya ni con golpes de vapor exista desprendimiento, se sube nuevamente la temperatura a la misma razón anterior hasta que se reinicie el desprendimiento.

9) Con este proceso descrito se debe continuar subiendo la temperatura teniendo como límite máximo 645°C como temperatura de metales y 537-593 °C en la salida del vapor del coil o 732 °C en humos.

Cabe señalar que durante el barrido con vapor del coque (desprendimiento), el color de éste es gris o negro, durante el proceso de quemado, el color del efluente es gris suave y durante la finalización del decoquizado, el color es rosado o rojizo.

10) Cuando se termina el barrido con vapor, se debe bajar la temperatura de los metales nuevamente hasta 480°C aproximadamente, además se debe bajar la inyección de vapor a 816 kg/h e inyectar 147 kg/h de aire. Con esto se iniciará el proceso de quemado del coke residual y se debe comenzar a subir la temperatura en el coil.

11) El control de subida de temperatura del coil que se está decoquificando, se llevará con la temperatura del efluente del coil, además se tendrá como referencia la temperatura de metales y humos.

12) Durante la etapa de quemado se deben dar golpes de vapor con el objetivo de soplar el coque parcialmente quemado y desprendido de la pared del tubo, para ello, se debe cortar el aire y también aumentar bruscamente el flujo de vapor hasta tener un caudal de unos 2000 kg/h por uno o dos minutos, luego se debe volver a ajustar los flujos de vapor aire a los valores antes mencionados.

13) Cuando la subida de temperatura llegue a alguno de los límites mencionados en el proceso de barrido con vapor y no exista indicios de quemado (efluente gris) y además el efluente del D-1411, tenga una coloración rosada o rojiza, se procederá a muestrar los gases del efluente de la etapa de quemado.

14) Con un análisis ORSAT de los gases del efluente, se dará por finalizado cuando el  $CO_2$  sea menor de 0,5%.

15) Después de finalizado el decoquificado se debe cortar la inyección de aire manteniendo la inyección de vapor, luego se procede a bajar la temperatura hasta quedar solamente con un par de pilotos.

16) Se procede a retirar las cajas del casing del paso para su posterior retiro de tapones por parte de la División de Equipos Estáticos para limpieza y posterior normalizado.

17) Se realizan pruebas de hermeticidad a 70  $kg/cm^2$ 

18) Se normaliza las cajas de casing.

6.1.3	Tabla comparativa	de los proceso	de limpieza:
-------	-------------------	----------------	--------------

Comparaciones de variables	Descoque por vapor aire	Decoquificado a través de Piggs
Erosión en tubería	Si, desgaste por defecto	No
Recalentamiento a la estructura (elongación)	Si, cambio en la estructura molecular.	No
Impacto ambiental	Si, vapores, sólidos y líquidos contaminantes.	No
Tiempo de ejecución	Medio	bajo
Taponamiento de tubería	SI, riesgo moderado durante descostre.	No
Riesgo laboral	Si, altas temperaturas.	No
Efectividad Global	75% no hay garantía física del total del desprendimiento de coque	Cercano al 100% de limpieza total.

#### Comentarios:

-La tecnología Piggs ayuda a preservar el equipo ya que el sistema empleado es de tipo "mecánico" y no utilizan ningún tipo de sustancia química, ni altas temperaturas y presiones, por lo que la tubería del serpentín no estará sometida a los cambios bruscos de temperaturas y acciones corrosivas (ácidas) que ocasionan los procesos de fatiga en el material de la tubería.

-La tecnología Aire-Vapor resulta ser la más económica (el aire y el vapor que se utiliza lo genera la misma planta) entre las tecnologías de limpieza de hornos, pero sin embargo los ciclos son más cortos, lo cual obliga a las unidades a pararse de manera más frecuente, acarreando problemas con el cumplimiento de la producción debido a las paradas no programadas.

-Dentro de las diferentes tecnologías empleadas para la limpieza de hornos, la de Piggs garantiza una limpieza casi del 100% de cualquier tipo de adherencias que se encuentren a lo largo de la sección interna de la tubería.

## 7. Transferencia de calor en hornos

#### 7.1 Transferencia de calor por radiación directa en la sección de radiación:

La radiación directa en la zona radiante de un horno de proceso se puede evaluar de la siguiente forma:

$$Q_{r=} \sigma \cdot \alpha \cdot A_{tc} \cdot F[T_g^4 - T_p^4] \qquad (7.1)$$

 $Q_r = Calor radiante transferido [W]$ 

 $\mathbf{O} = Constante \ de \ Stefan-Boltzmann \ [W / m^2 \cdot K^4].$ 

 $\alpha$  = *Factor de efectividad relativa del banco de tubos.* 

 $A_{tc} = Area de transferencia de calor del banco de tubos (plano frio). [m<sup>2</sup>].$ 

F = Factor de intercambio de radiación desde los gases calientes o factor de forma.

 $T_g$  = Temperatura de los gases de combustión [K].

 $T_p$  = Temperatura promedio de la pared de los tubos [K].

### **7.1.1** Constante de Stefan-Boltzmann (σ):

La constante de proporcionalidad de la ley de Stefan-Boltzmann: es la energía total radiada por unidad de superficie de un cuerpo negro por unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

El valor de la constante de Stefan-Boltzmann en unidades SI corresponde al valor de:

**O:** Constante de Stefan-Boltzmann 5.6704 x  $10^{-8}$  [W /  $m^2 \cdot K^4$ ].

### **7.1.2** Factor de efectividad relativa (**α**):

Este factor corrige el valor del calor que absorben los tubos, ya que los tubos no absorben todo el calor que es irradiado al plano. El gráfico utilizado para corregir este valor posee 3 curvas que dependerá de la configuración de tubos que posea el horno.

Total one Row: Configuración de tubos de una fila frente a la pared refractaria.Total two Row: Configuración de Tubos de dos líneas frente a la pared refractaria.Direct one Row: Configuración de tubos calentados en ambos lados.



**Figura 7.1:** Gráfico para determinación del factor de efectividad relativa. **Fuente:** Lobo, Wimpress, and Evans, J.E., Heat Transfer in the Radiant Section of PetroleumHeaters, Trans. of AIChE, Vol. 35, 1939,

## 7.1.3 Área de plano frio de los tubos.

$$A_{cp} = N_{tubos} \cdot P_{tubos} \cdot L_{tubos}$$
(7.2)

Dónde:

N<sub>tubos</sub>: Número de tubos

 $P_{tubos}$ : Perímetro de tubos (m)

 $L_{tubos}$ : Largo efectivo de los tubos (m)

#### 7.1.4 Factor de intercambio "F":

El factor de intercambio F representa la fracción de calor disponible por radiación de la llama que realmente se absorbe por la superficie fría de los tubos. Es función de la emisividad de los gases y de la relación  $A_R / \alpha \cdot A_{cp}$ .

Una vez obtenidos los valores de la emisividad y de la relación  $A_R / \alpha \cdot A_{cp}$ , se obtiene F del gráfico de la fig. 7.2.

#### -Área refractaria:

La efectividad de la transferencia de energía radiante depende de la cantidad de área refractaria no cubierta por tubos que están disponibles en el horno. El área refractaria  $A_R$  se define como:

$$A_R = A_h - \alpha \cdot A_{cp} \tag{7.3}$$

 $m{A}_R = egin{array}{ll} A_R = egin{arra$ 



**Figura 7.2:** Gráfico para cálculo del factor F. **Fuente:** Lobo, Wimpress, and Evans, J.E., Heat Transfer in the Radiant Section of PetroleumHeaters, Trans. of AIChE, Vol. 35, 1939,

<u>-Emisividad del gas de combustión</u>: Para el cálculo de la emisividad del gas se utilizan las curvas presentada por Lobo y Evans, a la AICHE, 32nd Annual Meeting, Noviembre 1939. La emisividad de los gases calientes en el horno depende de P, L y de la temperatura de equilibrio del gas en la sección radiante.

*PL* Corresponde al producto de la presión parcial del dióxido de carbono y el agua multiplicado por la Longitud del rayo radiante, en atm-pie.

La temperatura de equilibrio del gas es la temperatura después de que la llama ha dado todo su calor a los tubos. Es la temperatura a la que entran los gases en los tubos de choque de la sección de convección ( $T_q$ )



**Figura 7.3:** Gráfico para el cálculo de la emisividad del gas. **Fuente:** Lobo, Wimpress, and Evans, J.E., Heat Transfer in the Radiant Section of PetroleumHeaters, Trans. of AIChE, Vol. 35, 1939.

## -Presión parcial del $CO_2$ y vapor de $H_2O$ (P):

Para calcular las presiones parciales del  $CO_2$  y vapor de  $H_2O$ , se deberá realizar un balance estequiométrico, y además obtener los balances del carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno de la ecuación de combustión.

Luego de obtenidas las presiones parciales de los componentes, se deberá realizar la suma de los valores obtenidos:

$$P = PCO_2 + PH_2O \tag{7.4}$$

En la unidad de cálculo se podrá analizar a detalle el balance estequiométrico a desarrollar.

## -Longitud media del rayo radiante (L):

L es la función del ángulo esférico que tiene un pie cuadrado de superficie absorbente con la llama.

Su valor se obtiene en función de las dimensiones del horno (largo, ancho y alto) divididas por la menor de ellas en modo creciente. Los valores son:

Tabla 7.1: Longitud media del rayo radiante	

Hornos rectangulares			
Dimensiones en orden creciente	Longitud media del rayo radiante		
1-1-1 a 1-1-3	$2/\sqrt[3]{Volumen horno}$		
1-2-1 a 1-2-4	/3 <i>Volumen nor</i> no		
1-1-4 a 1-1-∞	1 vez dimensión menor		
1-2-5 a 1-2-∞	1,3 veces dimensión menor		
1-3-3 a 1-3-∞	1,8 veces dimensión menor		

*Fuente:* Lobo, Wimpress, and Evans, J.E., Heat Transfer in the Radiant Section of PetroleumHeaters, Trans. of AIChE, Vol. 35, 1939.

# 7.1.5 Temperatura de los gases de combustión ( $T_g$ )

Para poder desarrollar los cálculos, se necesitará la temperatura de gases promedio del hogar, para ello se deberá poseer la temperatura de entrada en la zona de radiación y de entrada en la zona de convección.

Temperatura de los gases combustión en zona de radiación: Dado que esta zona no posee termocuplas que puedan medir la temperatura de los gases cuando ingresan a la zona radiante, se tendrá que desarrollar el cálculo de esta, para ello se tomará como temperatura la de diseño (843°) y luego a través de iteración se llegará a la temperatura correspondiente.

 Temperatura de los gases combustión en la entrada de convección: Se desarrolló un gráfico que muestra las tendencias de temperaturas de los gases de combustión que ingresan a la zona convectiva, en el rango de tiempo que se consideró anteriormente, cuando está en operación el horno.

El horno pose dos medidores antes de entrar a la zona de convección, estos son:



El normo pose dos medidores unes de entrar a la zona de convección, estos se

*Figura 7.4:* Gráfico de temperaturas de los gases de combustión. *Periodo:* noviembre 2014-marzo 2015.

*Obs:* Lo que se puede concluir del gráfico de la figura 7.4, es que durante las mediciones, las temperaturas de los gases en la entrada convectiva se mantuvieron relativamente estables, entre los 680°C y los 725 °C, además se puede apreciar que se está realizando una combustión desuniforme ya que hay variaciones de hasta 35°C, entre los dos medidores (instalados al igual que las termocuplas en ambos extremos del tubo n°20 de la zona radiante).

## 7.1.6 Temperatura de la pared de tubos $(T_p)$

Esta temperatura depende de la temperatura del fluido del proceso, de su coeficiente de transferencia de calor, la resistencia térmica que posea la pared del tubo, la densidad del flujo calórico y el ensuciamiento.

Para el monitoreo constante de las temperaturas de metales de los tubos, son utilizadas las termocuplas. Estos dispositivos están instalados en diferentes puntos de los tubos de la zona de radiación (el horno H-1401 solo posee 5 tubos con termocuplas), y por medio de un programa llamado "PI ProcessBook", se pueden observar las variaciones de temperatura que existe a cada minuto.

Como fue comentado anteriormente, uno de los indicadores importantes para saber si el tubo se encuentra con capas de coque, es la temperatura de su superficie, por ende las termocuplas son esenciales para tener una noción si hay temperaturas altas sobre las de diseño, lo que después daría paso a una inspección termográfica, que servirá para corroborar si la anomalía es certera o no.

Las termocuplas que utiliza el horno son de tipo K y su material consta de cromel, que es una aleación de Ni-Cr.



*Figura 7.5 :* Instalación termocupla instalada en los tubos del H-1401. *Fuente:* Archivo Técnico. División de mantención, Enap Refinerías Biobío.

Estas termocuplas van distribuidas en los primeros 4 tubos de cada paso (dos por cada tubo), que se ven más expuestos a la radiación de la llama y en el último tubo de la zona de radiación (tubo 20) que sirve para ver si la combustión se realiza de forma pareja.

Las distribuciones de las termocupla son las siguientes:





Figura 7.6: Distribución termocuplas paso 1.





Figura 7.7: Distribución termocuplas paso 2.

Los respectivos Tags de las termocuplas son las siguientes:

Paso 1		Paso 2	
Descripción	Тад	Descripción	Тад
Termocupla 1	14:TI196A.PV	Termocupla 9	14:TI197A.PV
Termocupla 2	14:TI196B.PV	Termocupla 10	14:TI197B.PV
Termocupla 3	14:TI196C.PV	Termocupla 11	14:TI197C.PV
Termocupla 4	14:TI196D.PV	Termocupla 12	14:TI197D.PV
Termocupla 5	14:TI196E.PV	Termocupla 13	14:TI197E.PV
Termocupla 6	14:TI196F.PV	Termocupla 14	14:TI197F.PV
Termocupla 7	14:TI196G.PV	Termocupla 15	14:TI197G.PV
Termocupla 8	14:TI196H.PV	Termocupla 16	14:TI197H.PV

Para el cálculo solo se tomarán los valores del paso 1 ya que el procedimiento del paso 2 es exactamente el mismo.

Se desarrollaron gráficos en Excel con los datos medidos por las termocuplas, para poder apreciar una tendencia de temperatura a medida que pasan los días. Estos gráficos fueron elaborados con los máximos y los promedios de las temperaturas de forma diaria de cada termocupla del paso 1, para tener una mejor apreciación sobre el aumento de temperatura a través del tiempo.

En la Fig. 7.8 se puede apreciar el promedio de todos los valores obtenidos por cada termocupla, para mejor apreciación de la tendencia de cada termocupla, los gráficos se encontrarán en el capítulo 13.1.

Se puede visualizar que la temperatura de los tubos se va incrementando a través de las semanas de operación, debido a la resistencia térmica que va oponiendo el espesor de coque que se va adhiriendo a la superficie interior.

Este es un parámetro que utilizan los operadores de la empresa, para definir en qué momento debe realizarse la limpieza de los tubos, pero sin conocer el espesor de la costra.



Figura 7.8: Tendencia de temperaturas de metales.

Fuente: Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.

*Obs: En el gráfico de la figura 7.8 se puede ver claramente un incremento considerable en las temperaturas de metales a lo largo del tiempo, pero dentro de las temperaturas de diseño de los tubos.* 

## 7.2 Transferencia de calor por convección en la sección de radiación:

$$Q_c = h_g \cdot A_t \cdot (T_g - T_p) \quad (7.5)$$

 $Q_c = Calor transferido por convección [W]$ 

- $h_g$  = Coeficiente convectivo de los gases de combustión [ W /m<sup>2</sup>  $\cdot$  K]
- $A_t =$ Área del banco de tubos [ $m^2$ ]
- $T_g = Temperatura de los gases de combustión [K]$
- $T_p$  = Temperatura promedio de la pared de los tubos [K]

(El procedimiento de cálculo de hg está explicado en la pág. 65)

### 7.3 Flujo de calor total transferido

El calor que recibirá el pitch en primer lugar, llegará por convección y radiación de los gases de combustión hacia la superficie exterior de los tubos y después se transferirá por conducción a través del espesor de la cañería y de la costra de coque. Finalmente el pitch recibirá el calor por convección desde la superficie interior del tubo.

Una vez calculado el flujo de calor por radiación y por convección se deberá sacar un flujo total, que recibe la superficie exterior.

$$Q_t = Q_c + Q_r \tag{7.6}$$

### 7.4 Transferencia de calor a través de los tubos:

Transferencia en tubos limpios:

**Convección exterior** 

$$Q = h_{\rm g} 2\pi r_1 \cdot L(T_{\infty 1} - T_1) \qquad (7.7)$$



Conducción a través de la pared del tubo limpio

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi L \lambda_1} ln \frac{r_2}{r_1}}$$
(7.8)

**Convección interior** 

$$Q = h_{\rm p} 2\pi r_2 \cdot L(T_2 - T_{\infty 2}) \quad (7.9)$$

Conducción y convección

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_g} + \frac{1}{2\pi L \lambda_1} ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_p}} \quad (7.10)$$

## 7.4.1 Transferencia en tubos sucios

Convección y conducción entre fluido exterior e interior:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_g} + \frac{1}{2\pi L \lambda_1} ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi L \lambda_2} ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_p}}$$
(7.11)


Otro procedimiento para calcular el calor transferido que llega al pitch es a partir del conocimiento de la temperatura exterior de la cañería (a través de termocuplas), por lo tanto, todo el calor recibido por convección y radiación en la superficie exterior se transferirá por conducción a través del espesor de la cañería y de la costra de coque y finalmente por convección interior llega al pitch.



 $R_{tubo} = Resistencia térmica del tubo.$  $R_{coque} = Resistencia térmica de la costra de coque.$  $R_{Ci} = Resistencia a la convección interior.$ 

#### 7.4.2 Coeficiente global de transferencia de calor:

$$U = \frac{1}{\sum R_{t\acute{e}rmica}}$$
(7.13)  
$$\sum R_{t\acute{e}rmica} = R_{tubo} + R_{coque} + R_{Ci}$$

Dónde:

$$U_{sucio} < U_{limpio}$$

# 7.4.3 Coeficiente convectivo del Pitch $(h_p)$

Para el cálculo del coeficiente convectivo se necesitará determinar: Reynolds, Prandtl y Nusselt.

Como el pitch va por el interior de los tubos, se usará el Reynolds respectivo.

$$R_e = \frac{V \cdot d}{v} \qquad (7.14)$$

 $V = Velocidad \ del \ flujo \ (m/s)$  $d = Diámetro \ interior \ tubo \ (m)$  $v = Viscosidad \ cinemática \ (m^2/s)$ 

# $R_e > 3000 Regimen Turbulento$

Luego se calcula Prandtl:

$$P_r = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda_2} \qquad (7.15)$$

 $C_p = Calor \ específico \ (J / kg \cdot K)$   $\lambda_2 = Conductividad \ térmica \ coque \ de \ petróleo \ (W / m \cdot K)$  $\mu = Viscosidad \ dinámica \ (kg / m \cdot s)$ 

Nusselt:

Regimen Turbulento:

$$1.5 < P_r < 500$$

$$Nu = 0,012 \left( R_e^{0,87} - 280 \right) P_r^{0,4} \left[ 1 + \left( \frac{d}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$
(7.16)

#### l = Longitud característica. (m)

Una vez con el Nusselt calculado, se puede despejar hp con la siguiente ecuación:

$$N_u = \frac{h_p \cdot d}{\lambda_2} \qquad (7.17)$$

# 7.4.4 Coeficiente convectivo de los gases de combustión $(h_a)$

Según los parámetros de diseño del horno, el  $h_g$  de diseño es de 8,5 [ $W/m^2 \cdot K$ ] (véase pág. 35)

Para el cálculo del  $h_g$  de operación, se necesita sacar una temperatura de referencia, para ello se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$T_r = \frac{1}{2}(T_e + T_s)$$
 (7.18)

 $T_s$ = Temperatura de salida gas (sección convección).  $T_e$ = Temperatura de entrada (sección de radiación).

Obtenida esta temperatura de referencia, se deberá utilizar la tabla de las propiedades del aire seco a presión atmosférica ubicado en el capítulo 13.2, para obtener el N° Prandtl, densidad, calor específico, viscosidad, conductividad térmica.

Como el fluido es por exterior de cañería:

$$R_e = \frac{V \cdot l}{v} \qquad (7.19)$$

V = Velocidad del flujo (m/s) l = Longitud equivalente (m) v = Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)



$$l = \frac{\pi}{2}d \cdot n^{\circ} tubos \quad (7.20)$$

Para el cálculo de la velocidad, primero se necesitará conocer el flujo de gases de combustión.

La metodología de cálculo que se debe seguir para obtener el flujo es el siguiente:

$$\dot{V} = \frac{V_g}{V_c} \cdot F_c \qquad (7.21)$$

Dónde:

 $\dot{V}$  =Flujo de los gases de combustión. ( $m^3/s$ )  $V_a$  =Volumen de los gases de combustión. ( $m^3$ )  $V_c$  =Volumen del combustible. (m<sup>3</sup>)  $F_c$  =Consumo de combustible (fuel gas). (m<sup>3</sup>/s)

Para la obtención de los volúmenes se utilizará la ecuación de estado de los gases ideales:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$$
 (7.22)

Dónde:

 $P = Presión \ atmosférica, [Pa]$   $n = kmoles \ del \ gas.$   $R = Constante \ universal \ de \ los \ gases, \ 8314 \quad \left[\frac{J}{kmol \ K}\right]$   $T = Temperatura \ del \ gas, \ [K]$ 

Una vez que se obtenga  $\dot{V}$  la velocidad será calculada con la fórmula:

$$Velocidad = \frac{A_{horno}}{\dot{V}}$$
(7.23)

Obtenido los valores se entrará a calcular el Nusselt, y como es un flujo por exterior de cañería, se usará la siguiente ecuación:

$$N_u = 0.3 + \sqrt{N_{u_{lam}}^2 + N_{u_{turb}}^2}$$
(7.24)

Dónde:

$$N_{u_{lam}} = 0,664 R_e^{0.5} \cdot P_r^{0.33}$$
 (7.25)

$$N_{u_{turb}} = \frac{0.037 R_e^{0.8} P_r}{1 + 2.443 R_e^{-0.1} (P_r^{2/3} - 1)}$$
(7.26)

Teniendo el Nusselt, se despeja de la siguiente ecuación el coeficiente convectivo de los gases.

$$N_u = \frac{h_g \cdot l}{\lambda_1} \rightarrow h_g = \frac{N_u \cdot \lambda_1}{l}$$
 (7.27)

# 7.5 Temperatura de entrada y salida de la carga:

A través de los gráficos obtenidos se determinará los valores de entrada y salida de la carga cuando el horno está en operación. (Véase Fig. 7.9 y 7.10)



*Figura 7.9: Temperaturas de entrada. Periodo: noviembre 2014-febrero 2015.* 

*Obs:* Lo que se puede concluir del gráfico de la figura 7.9, es que las temperaturas de operación son mayores a las de diseño. Las temperaturas se mueven entre los 300 y 317°C aproximadamente. Para el cálculo se tomará un valor intermedio de este rango (307°C) y se considerará que entra a temperatura constante.



*Figura 7.10: Temperaturas de salida. Periodo: noviembre 2014-febrero 2015.* 

*Obs:* Lo que se puede concluir del gráfico de la figura 7.10, es que las temperaturas de salida del pitch son menores a las de diseño, y se mantienen casi constantes alrededor de los 496 °C, salvo pequeñas bajas que se pueden ver, por problemas específicos de proceso.

Temperatura de entrada: 307°C (zona convectiva)

Temperatura de salida: 496°C (zona radiante)

# 8.1 Cálculos de transferencia de calor:

# Zona radiante:

-Factor de efectividad relativa ( $\alpha$ ):

 $\frac{Distancia\ entre\ centros}{\emptyset\ Tubos} = \frac{203}{114,3} = 1,77\ mm$ 

Según el gráfico de la fig. 7.1 se obtiene:

 $\alpha = 0,74$ 

-Área de transferencia de calor del banco de tubos (plano frío):

Según ecuación (7.2) se obtiene:

$$A_{cp} = 20 \cdot \pi \cdot \left(\frac{114,4}{1000}\right) \cdot \left(\frac{22880}{1000}\right)$$
$$A_{cp} = 164,317 \ [m^2]$$

#### -Factor de intercambio (F):

Para el cálculo del factor de intercambio se necesita saber las dimensiones del horno, para ello se realizó un dibujo resumen (creado en Inventor), de las medidas obtenidas de los planos del horno para poder desarrollar el cálculo, incluyendo el espesor de la pared correspondiente, ya sea en las paredes y el piso (cada medida está en mm).

#### VISTA FRONTAL





*Figura 8.1:* Dimensiones del horno H-1401. *Fuente:* Elaboración propia basado en el plano de diseño.

 $A_{h} = \text{ área paredes costados + área paredes trasera y delantera + área piso + área techo}$  $A_{h} = (22750 * 4685) * 2 + \left( (4685 * 1360) * 2 + \left( 589 * \frac{4685}{2} \right) * 4 - (31 * 1690) * 4 \right) + (2476 * 22750) + (22750 * (1360 - 486)) = 307.433 m^{2}$ 

Según ecuación (7.3) se obtiene:

$$A_R = A_h - \alpha \cdot A_{tc}$$
  
 $A_R = 307,433 - 0,74 * 164,317 [m^2]$   
 $A_R = 185,838 [m^2]$ 

$$\frac{A_R}{\alpha \cdot A_{cp}} = \frac{185,838}{0,74 \cdot 164,317} = 1.528$$

-Emisividad del gas de combustión:

Para calcular (P) se debe determinar las presiones parciales del  $H_2O$  y del  $CO_2$ , para ello se debe hacer un balance estequiométrico (combustión ideal).

Según la composición del Fuel Gas de operación (Tabla 4.3) la ecuación para **''combustión ideal''** es la siguiente:

$$33,62 \cdot H_2 + 2.92 \cdot N_2 + 0,43 \cdot CO + 0,53 \cdot CO_2 + 37,51 \cdot CH_4 + 8,08 \cdot C_2H_6 + 2,11 \cdot C_2H_4 + 4,77 \cdot C_3H_8 + 1,56 \cdot C_3H_6 + 4,96 \cdot C_4H_{10} + 2,3 \cdot C_4H_8 + 0,67 \quad \cdot C_5H_{12} \cdot 0,51 \cdot C_6H_{14} + A \cdot O_2 + 3,76 \cdot A \cdot N_2 = X \cdot CO_2 + Y \cdot N_2 + Z \cdot H_2O$$

Haciendo los balances correspondientes:

PM = 1 [atm]

-Balance del carbono:

 $X = 0,43 + 0,53 + 37,51 + 8,08 \cdot 2 + 2,11 \cdot 2 + 4,77 \cdot 3 + 1,56 \cdot 3 + 4,96 \cdot 4 + 2,3 \cdot 4 + 0,67 \cdot 5 + 0,51 \cdot 6$  (a)

-Balance del nitrógeno:

$$Y = 2,92 + 3,76 \cdot A$$
 (b)

-Balance del oxígeno:

$$2 \cdot A + 0,43 + 0,53 \cdot 2 = 2 \cdot X + Z$$
 (c)

-Balance del hidrógeno:

 $2 \cdot Z = 33,62 \cdot 2 + 37,51 \cdot 4 + 8,08 \cdot 6 + 2,11 \cdot 4 + 4,77 \cdot 8 + 1,56 \cdot 6 + 4,96 \cdot 10 + 2,3 \cdot 8 + 0,67 \cdot 12 + 0,51 \cdot 14$  (d)

De (a), (b), (c) y (d), se obtiene:

A = 213.8 X = 113.3 Y = 806.7 Z = 202.5

Se deben desarrollar las siguientes ecuaciones para obtener las presiones parciales del  $CO_2$  y  $H_2O$ 

$$PCO_2 = \frac{PM \cdot X}{(X+Y+Z)} \qquad PH_2O = \frac{PM \cdot Z}{(X+Y+Z)} \qquad Pgases = PCO_2 + PH_2O$$

Reemplazando se obtiene:

$$PCO_2 = 0.1009 \text{ [atm]}$$
  $PH_2O = 0.1804 \text{ [atm]}$   $Pgases = 0.2814 \text{ [atm]}$ 

R= La presión parcial de los gases corresponde a 0,2814 [atm] si se logra combustión ideal.

La ecuación para la "combustión real" con exceso de aire es la siguiente:

$$\begin{aligned} 33,62 \cdot H_2 + 2.92 \cdot N_2 + 0,43 \cdot CO + 0,53 \cdot CO_2 + 37,51 \cdot CH_4 + 8,08 \cdot C_2H_6 + 2,11 \cdot C_2H_4 \\ &+ 4,77 \cdot C_3H_8 + 1,56 \cdot C_3H_6 + 4,96 \cdot C_4H_{10} + 2,3 \cdot C_4H_8 + 0,67 \quad \cdot C_5H_{12} \cdot 0,51 \\ &\cdot C_6H_{14} + (1 + EXC) \cdot A \cdot O_2 + 3,76 \cdot A \cdot (1 + EXC) \cdot N_2 \\ &= D \cdot CO_2 + E \cdot O_2 + F \cdot N_2 + G \cdot H_2O \end{aligned}$$

Haciendo los balances correspondientes:

PM = 1 [atm]

-Balance del carbono:

$$D = 0,43 + 0,53 + 37,51 + 8,08 \cdot 2 + 2,11 \cdot 2 + 4,77 \cdot 3 + 1,56 \cdot 3 + 4,96 \cdot 4 + 2,3 \cdot 4 + 0,67 \cdot 5 + 0,51 \cdot 6$$
 (a)

-Balance del nitrógeno:

$$F = 2,92 + 3,76 \cdot A \cdot (1 + EXC) + 3,76 \cdot A \quad (\mathbf{b})$$

-Balance del oxígeno:

$$0,43 + 0,53 \cdot 2 + 2 \cdot A \cdot (1 + EXC) + 2 * A = 2 \cdot D + 2 \cdot E + G$$
 (c)

-Balance del hidrógeno:

$$2 \cdot G = 33,62 \cdot 2 + 37,51 \cdot 4 + 8,08 \cdot 6 + 2,11 \cdot 4 + 4,77 \cdot 8 + 1,56 \cdot 6 + 4,96 \cdot 10 + 2,3 \cdot 8 + 0,67 \cdot 12 + 0,51 \cdot 14$$
 (d)

De (a), (b), (c) y (d), se obtiene:

$$D = 113,3$$
  $E = 21,38$   $F = 887,1$   $G = 202,5$ 

Se deben desarrollar las siguientes ecuaciones para obtener las presiones parciales del  $CO_2$  y  $H_2O$ 

$$PCO_2 = \frac{PM \cdot D}{(D+E+F+G)} \qquad PH_2O = \frac{PM \cdot G}{(D+E+F+G)} \qquad Pgases = PCO_2 + PH_2O$$

Reemplazando se obtiene la siguiente tabla resumen para cada porcentaje de exceso de aire (Todos estos datos fueron calculados con el programa EES, tanto para la combustión de diseño, como para la combustión real de operación).

	Combustión real							
Exceso de	<i>PCO</i> <sub>2</sub>	<b>PH</b> <sub>2</sub> <b>O</b>	Pgases					
aire %	[atm]	[atm]	[atm]					
0	0.1015	0.1794	0.2809					
5	0.09712	0.1716	0.2687					
10	0.09307	0.1644	0.2575					
15	0.08934	0.1578	0.2472					
20	0.0859	0.1518	0.2377					
25	0.08272	0.1461	0.2289					
30	0.07976	0.1409	0.2207					
35	0.07701	0.136	0.2131					
40	0.07444	0.1315	0.2059					
45	0.07204	0.1273	0.1993					

Tabla 8.1: Tabla resumen de presiones parciales para combustión real con diferentes excesos de aire.

R: La presión parcial calculada en la combustión del horno con un exceso de aire del 10% es: P = 0.2575 [atm]

### -Longitud media del rayo radiante (L):

Basándose en las medidas obtenidas de la figura 8.1:

 $Beam \ leght = \left(\frac{largo}{2}; ancho; \ alto\right)$ 

 $(11.375;\ 2.476;\ 4.685) \to (5;\ 1;\ 2)$ 

Por lo tanto, según la tabla 7.1:

Beam legth =  $1,3 \cdot Dimensión más pequeña (pie)$ Beam legth =  $1,3 \cdot 2.476 \cdot 3.28 = 10.558$  (ft)

Luego, se calcula el producto de:

 $P \cdot L = 0.2575 \cdot 10.558 = 2.72 \ (atm \cdot ft)$ 

Para el cálculo de la emisividad, es necesario tener la temperatura promedio de los gases de combustión, y dado que se desconoce la temperatura de entrada de los gases, se deberá realizar el cálculo para obtenerlas.

Para ello se utilizará la relación de transferencia de calor entre el fluido caliente y el fluido frio, pero considerando que en la transferencia de calor de los gases al pitch se producen pérdidas de calor, se estimaran pérdidas del 8%:

Balance de energía:

$$Q_{pitch} \cdot 1,08 = Q_{gases}$$
$$\dot{m}_{pitch} \cdot Cp_{pitch} \cdot (T_{E \ pitch} - T_{S \ pitch}) \cdot 1,08 = \dot{m}_{Gases} \cdot Cp_{gases} \cdot (T_{E \ gases} - T_{S \ gases})$$

De la relación anterior, lo que falta por conocer es el flujo másico de los gases de combustión, el cp de los gases y la temperatura de entrada de los gases.

#### Flujo másico:

El flujo másico dependerá de la temperatura de los gases de entrada y como ésta es la variable que se está buscando, se estimará un valor y luego a través de iteración se obtendrá el valor real.

-La temperatura que se utilizará será la de diseño: 843°C

-Utilizando los valores obtenidos en el balance de combustión (Pág.72)

n= kmoles, este valor se obtiene sumando D, E, F y G

	n	Xi	PMi	$\sum xi \cdot PMi$
<i>CO</i> <sub>2</sub>	113,3	0,0925	44	4,07
02	21,38	0,017	32	0,544
<i>N</i> <sub>2</sub>	887,1	0,724	28	20,272
<i>H</i> <sub>2</sub> <i>O</i>	202,5	0,1673	18	3,0114
	$\sum 1224,28$		PM total =	27,8974

#### Se obtiene un n= 1224

Usando la ecuación de estado de los gases ideales (Form.7.22)

$$P \cdot V_g = n \cdot R \cdot T_g$$
  
101325  $\cdot V_g = 1224 \cdot 8314 \cdot (273 + 843)$   
 $V_g = 112082,8 m^3$ 

Para el Fuel gas:

$$P \cdot V_c = n_c \cdot R \cdot T_{quemador}$$
  
101325 \cdot V\_c = 100 \cdot 8314 \cdot (50 + 273)  
$$V_c = 2650 m^3$$

-Observación: Para el cálculo del volumen del combustible, se debe utilizar la temperatura del quemador. En primera instancia el valor que se utiliza al comienzo es la de diseño, que son 50 °C (se ven reflejados en la fórmula), pero a medida que las semanas pasan y como se debe calentar aún más los gases de combustión, esta temperatura va en aumento y dado que se desconoce el aumento que tiene se estimó que cada semana aumentaba en 10 grados.

Teniendo los volúmenes del combustible y de los gases, el siguiente paso es calcular el flujo volumétrico de los gases y para ello es necesario tener el consumo de combustible ( $F_c$ )

A continuación un ejemplo del proceso de cálculo:

$$\dot{V} = \frac{V_g}{V_c} \cdot F_c = \frac{129931.7}{2650} \left[ \frac{m^3 gas}{m^3 combustible} \right] \cdot 0.58 \left[ \frac{m^3 combustible}{s} \right]$$
$$= 28.4 \left[ \frac{m^3 gas}{s} \right]$$

Obtenido el flujo volumétrico, es necesario conocer la densidad del fluido para cada temperatura.

Para la densidad se utiliza la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{pg}{Rp, g \cdot Tg} = \frac{101325}{298,06 \cdot (273 + 1006)} = 0,266 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

*Rp*, *g*: *corresponde* a la constante particular de una mezcla de gases

Este desarrollo se hará para cada semana. A modo de resumir el procedimiento todos los resultados se verán reflejados en la tabla número 8.2

Caudal Pitch kg/h	Q del pitch kcal/h	Q de los gases	consumo de combustible m3/s	Temperatura salida °C	Temperatura entrada dada °C	volumen del combustible m3	volumen del gas m3	Flujo gases de comb m3/s	Densidad del gas kg/m3	Flujo masico del gas kg/h	cp gases kcal/kg °C	Temperatura real entrada °C
40572,64	12356802,9	13345347,10	0,58	649,6	1020,72	2650,3	129931,7	28,4	0,263	26898,14	1,391	1006,31
52000,00	15837120,0	17104089,60	0,60	680,0	1153,99	2732,4	143315,9	31,5	0,238	26990,06	1,391	1135,58
53307,23	16235250,3	17534070,31	0,60	682,8	1183,25	2814,4	146254,8	31,2	0,233	26203,18	1,391	1163,82
54059,87	16464473,8	17781631,73	0,62	686,1	1191,64	2896,5	147098,1	31,5	0,232	26309,57	1,391	1172,02
54355,73	16554581,0	17878947,45	0,64	687,0	1193,34	2978,5	147268,2	31,6	0,232	26410,11	1,391	1173,68
54476,26	16591291,3	17918594,55	0,66	688,0	1195,64	3060,6	147499,3	31,8	0,231	26505,25	1,391	1174,01
54501,77	16599059,5	17926984,31	0,70	695,3	1184,98	3142,6	146428,5	32,6	0,233	27384,19	1,391	1165,97
54592,92	16626820,0	17956965,56	0,72	698,0	1186,85	3224,7	146616,1	32,8	0,233	27474,51	1,391	1167,87
54684,76	16654791,0	17987174,28	0,74	700,0	1189,11	3306,7	146843,7	32,9	0,233	27505,75	1,391	1170,12
56546,59	17221830,5	18599576,95	0,76	703,1	1207,82	3388,8	148722,6	33,4	0,230	27565,15	1,391	1188,23
57453,39	17498003,2	18897843,41	0,80	707,2	1205,85	3470,8	148525,1	34,1	0,230	28257,80	1,391	1187,94

3552,9

3634,9

3717,0

3799,0

3717,0

150898,8

152288,5

158541,5

160334,1

158846,5

34,0

34,3

33,0

32,9

31,5

0,226

0,224

0,215

0,213

0,215

27707,62

27714,53

25580,77

25235,41

24345,76

1,391

1,391

1,391

1,391

1,391

1209,42

1223,07

1283,63

1300,98

1285,32

#### Tabla 8.2: Cálculo de temperaturas de entrada de combustión

58210,47

17728580,3

59390,78 18088054,5 19535098,84

58774,24 17900283,8

58809,42 17910996,7

59333,39 18070576,0

19146866,69

19332306,46

19343876,40

19516222,11

0,80

0,82

0,77

0,78

0,74

712,6

721,6

740,0

745,0

708,5

semana 1

semana 3

semana 4

semana 5

semana 8

semana 10

semana 1

semana 1

Tal y como se señalo anteriormente se utilizó la temperatura 843 °C y su cp respectivo 1,322 kcal/kg°C y por medio de iteración se logro dar con las temperaturas reales de entrada.

1229,49

1243,33

1305,59

1323,43

1308,62

El Cp de los gases utilizado al final de las iteraciones (1,391) es el cp promedio de todas las temperaturas reales calculadas, de modo de agilizar más el cálculo.

*Obs: Todos los cálculos de los calores específicos utilizados, fueron obtenidos a través de un programa propio creado en EES (Engineering Equation Solver), programa que irá adjuntado al informe de título en el capítulo 12.4 de Anexos.* 

Para poder apreciar mejor las temperaturas de entrada y salida de los gases de combustión se adjunta la Fig. 8.2 obtenido después de los cálculos.



*Figura 8.2:* Temperaturas de entrada de los gases de combustión *Fuente:* Elaboración propia basado cálculos obtenidos.

Obtenido las temperaturas de los gases se sacará un promedio entre los valores de entrada y de salida para el cálculo de la emisividad del gas.

El valor obtenido es: 960 °C = 1760 °F aprox.

Observando el gráfico de la figura 7.3 utilizando la temperatura de los gases (2200 °F) y  $P \cdot L$  (2.72  $atm \cdot ft$ ) se obtiene:

*Emisividad* = 0.44 Aprox. para operación y 0,48 para diseño (utilizando temperatura de gases de 843°C)

Conocida la emisividad y la relación  $A_R / \alpha \cdot A_{cp}$  se puede calcular el factor F usando el gráfico de la figura 7.2

$$F = 0,63$$
 (Para operación)  
 $F = 0,67$  (Para diseño)

## 8.2 Cálculos de calor radiante:

Una vez calculadas todas las variables se puede calcular el flujo de calor por radiación directa en la sección de radiación con la fórmula 7.1.

$$Q_r = \sigma \cdot \alpha \cdot A_{cp} \cdot F\left[T_g^4 - T_p^4\right]$$

Qr de diseño:

$$Q_r = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,74 \cdot 164,317 \cdot 0,67 \cdot [(843 + 273)^4 - (530 + 273)^4]$$
$$Q_r = 5244,99 \, [kW]$$

Considerando un 3% de pérdidas en las paredes el valor que queda es:

$$Q_r = 5087,64[kW]$$

#### Qr de operación:

Del mismo modo que con las temperaturas de los gases, los cálculos fueron hechos para cada semana. A continuación se desarrollará el cálculo de la primera semana a modo de ejemplo de cómo se obtuvieron los valores y luego una tabla resumen.

Las temperaturas de los gases utilizadas es el promedio de las de salida con las de entrada.

$$Q_r = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,74 \cdot 164,317 \cdot 0,63 \cdot [(832 + 273)^4 - (588 + 273)^4]$$
$$Q_r = 4114,27[kW]$$

Considerando un 3% de pérdidas en las paredes el valor que queda es:

$$Q_r = 3990,84 \, [kW]$$

semana	Temp. de metales	Temp, de gases	Qr [kW]	Promedio de caudales m3/día	Promedio de caudales m3/s	Velocidad pitch m/s	Qr menos perdida
1	588,01	831,90	4114,27	949,92	0,01	1,66	3990,85
2	584,43	908,61	6161,32	1292,42	0,01	2,26	5976,48
3	588,33	923,46	6554,61	1248,07	0,01	2,19	6357,97
4	593,42	928,90	6661,46	1265,69	0,01	2,22	6461,61
5	595,96	930,17	6670,78	1272,62	0,01	2,23	6470,66
6	599,00	930,83	6655,99	1275,44	0,01	2,24	6456,31
7	589,35	930,65	6760,66	1276,04	0,01	2,24	6557,84
8	592,31	932,93	6797,11	1278,17	0,01	2,24	6593,20
9	595,12	935,06	6830,51	1280,32	0,01	2,24	6625,60
10	600,46	944,82	7073,40	1323,91	0,01	2,24	6861,20
11	606,36	947,03	7073,92	1345,15	0,02	2,32	6861,70
12	615,26	959,78	7378,06	1362,87	0,02	2,36	7156,72
13	623,33	972,33	7695,38	1376,07	0,02	2,39	7464,52
14	623,13	992,82	8407,25	1376,89	0,02	2,41	8155,03
15	629,08	997,05	8482,33	1389,16	0,02	2,41	8227,86
16	628,60	993,01	8344,51	1390,51	0,02	2,44	8094,18

#### Tabla 8.3: Cálculo de Q de radiación

### 8.3 Cálculos calor convectivo en la zona radiante:

#### Qc de diseño:

Para el cálculo de Qc se necesitará usar la fórmula 7.5:

$$Q_c = h_g \cdot A_t \cdot (T_g - T_p)$$
  
 $Q_c = 8.5 \cdot 164,317 \cdot (843 - 530)$   
 $Q_c = 437.16 \text{ [kW]}$   
Oc de operación:

Para ello se necesita calcular el coeficiente convectivo de los gases de combustión. Del mismo modo que con el Q de radiación se enseñara el procedimiento de cálculo con la primera semana y luego una tabla con todos los valores semanales calculados.

Primero se debe calcular la temperatura de referencia (formula 7.18):

Semana 1: 
$$T_r = \frac{1}{2}(T_e + T_s) = \frac{1}{2}(1014,18 + 649,6) = 831,9 \,^{\circ}C$$

Observando la tabla de propiedades del aire seco de la pág. 99 se obtiene los siguientes valores:

Temperatura (°C)	Calor Especifico (kJ/kg K)	Conductividad térmica (W/mK)	Viscosidad Cinemática (m2/s)	N° Prandtl	Viscosidad Dinámica (kg/ms)
831,9	1,159	7,16E-02	1,39E-04	0,717	5,39E-05

Luego se debe calcular la longitud característica (fórmula 7.20):

$$l = \frac{\pi}{2} \cdot d \cdot n^{\circ} tubos = \frac{\pi}{2} \cdot 0,1143 \cdot = 0,180 m$$

Para la velocidad de los gases de combustión, el cálculo es el siguiente:

Utilizamos el flujo de gases de combustión ya calculados en la pág. 77, para la semana 1 corresponde a 28,1 [m3/seg.]

Como el área por donde circulan los gases no es constante, se calculará el área superior e inferior y se sacará un promedio de velocidades.

Las dimensiones utilizadas para el cálculo de las áreas están en la Fig. 8.1



Calculo de velocidades (Form. 7.23):

$$Velocidad_{prom} = \frac{28,29}{34,206} = 0,827 \ [m/s]$$

Teniendo la velocidad se procede a calcular Reynolds (Form.7.19)

$$R_e = \frac{V \cdot l}{v} = \frac{0.827 \cdot 0.180}{1.39 \cdot 10^{-4}} = 1068.3$$

Luego con las Formulas 24, 25 y 26:

$$N_{u_{lam}} = 0,664 R_e^{0.5} \cdot P_r^{0.33} = 0,664 \cdot 1068,3^{0.5} \cdot 0,717^{0.33} = 19,45$$

$$N_{u_{turb}} = \frac{0.037 R_e^{0.8} P_r}{1 + 2.443 R_e^{-0.1} (P_r^{2/3} - 1)} = \frac{0.037 \cdot 1068.3^{0.8} \cdot 0.717}{1 + 2.443 \cdot 1068.3^{-0.1} (0.717^{2/3} - 1)} = 9.27$$

$$N_u = 0.3 + \sqrt{N_{u_{lam}}^2 + N_{u_{turb}}^2} = 0.3 + \sqrt{19.45^2 + 9.27^2} = 21.84$$

Una vez obtenido Nusselts se procede a despejar el coeficiente convectivo (Form. 7.27)

$$N_u = \frac{h_g \cdot l}{\lambda_1} \rightarrow 21,84 = \frac{h_g \cdot 0,180}{0,0716} \rightarrow h_g = 8,71 \ [W/m^2 \cdot K]$$

Del mismo modo se debe calcular hg para cada semana:

Tabla 8.4: Cálculo de coeficiente convectivo

Тb [°С]	Longitud característica [m]	Reynolds	Prandtl	Nusselt Laminar	Nusselt turbulento	Nusselt	Conductividad Térmica [W/mK]	Coeficiente convectivo [W/m2 K]
831,90	0,180	1068,30	0,717	19,45	9,27	21,84	0,0716	8,71
908,61	0,180	1053,20	0,721	19,34	9,17	21,71	0,075	9,07
923,46	0,180	1028,75	0,722	19,13	9,01	21,44	0,0756	9,03
928,90	0,180	1025,26	0,722	19,09	8,99	21,40	0,0759	9,05
930,17	0,180	1030,36	0,722	19,14	9,02	21,46	0,0759	9,07
930,83	0,180	1034,31	0,722	19,18	9,05	21,51	0,076	9,10
930,65	0,180	1062,93	0,722	19,44	9,24	21,83	0,0759	9,23
932,93	0,180	1067,84	0,722	19,49	9,27	21,88	0,076	9,26
935,06	0,180	1070,73	0,722	19,51	9,29	21,91	0,0761	9,29
944,82	0,180	1034,85	0,723	19,19	9,05	21,52	0,0765	9,17
947,03	0,180	1098,97	0,723	19,78	9,48	22,23	0,0765	9,47
959,78	0,180	1059,45	0,724	19,43	9,22	21,81	0,0771	9,36
972,33	0,180	1058,52	0,724	19,42	9,22	21,79	0,0776	9,42

Тb [°С]	Longitud característica [m]	Reynolds	Prandtl	Nusselt Laminar	Nusselt turbulento	Nusselt	Conductividad Térmica [W/mK]	Coeficiente convectivo [W/m2 K]
992,82	0,180	958,52	0,726	18,50	8,54	20,67	0,0791	9,11
997,05	0,180	940,08	0,727	18,33	8,42	20,47	0,0799	9,11
993,01	0,180	930,48	0,726	18,22	8,35	20,34	0,0786	8,91

Ya teniendo el coeficiente convectivo se puede calcular Qr de operación con la Form 7.5:

Al igual que el Q de radiación se calculará el primer valor y luego se entregará una tabla con los cálculos siguientes.

 $Q_c = h_g \cdot A_t \cdot (T_g - T_p)$  $Q_c = 8,68 \cdot 164,317 \cdot (832 - 588)$  $Q_c = 349,08 \text{ [kW]}$ 

La tabla resultante es:

Tabla 8.5:	Cálculo	de Q de	convección.
------------	---------	---------	-------------

Fecha	Temperatura de metales [°C]	Temperatura de gases [°C]	Qc [kW]
semana 1	588,0	832	349,08
semana 2	584,4	909	483,07
semana 3	588,3	923	497,21
semana 4	593,4	929	498,80
semana 5	596,0	930	498,23
semana 6	599,0	931	496,37
semana 7	589,4	931	517,46
semana 8	592,3	933	518,41
semana 9	595,1	935	518,81
semana 10	600,5	945	518,86
semana 11	606,4	947	530,30
semana 12	615,3	960	530,09
semana 13	623,3	972	540,21
semana 14	623,1	993	553,27
semana 15	629,1	997	550,68
semana 16	628,6	993	533,31

### 8.4 Calor total

Una vez calculados todos los valores, se obtiene el Q total, que es la sumatoria entre el Q de radiación y el Q convectivo (Form. 7.6).

Diseño:

 $Q_t = Q_c + Q_r = 437,16 + 5087,64 = 5524,80$  [kW]

Operación:

 $Q_t = Q_c + Q_r = 349,08 + 3990,27 = 4339,92$  [kW]

De modo de tener una mejor apreciación de los datos, se confeccionó un gráfico donde se aprecia como varía el calor de diseño v/s el de operación.



*Figura 8.3:* Q de diseño V/s Q de operación *Fuente:* Elaboración propia basado cálculos obtenidos.

*Obs: Se puede apreciar que a partir de la semana 2, el calor de operación es mayor a la de diseño, esto es debido a que el horno ya comienza a presentar formación de coque en sus tubos, por lo que es necesario aumentar el calor para mantener una transferencia constante y que el fluido salga siempre a la misma temperatura.* 

#### 8.5 Cálculo espesor de coque:

Con los calores totales ya calculados, es posible determinar el espesor del coque en el transcurso del tiempo.

Como en los libros de transferencia de calor no existen datos que indiquen el valor aproximado de la conductividad térmica de la costra de coque, se utilizará un rango de valores aproximados basándose en las propiedades de otros materiales similares, como el asfalto.

Como es conocido, el asfalto es un producto obtenido de la destilación de crudos (el producto más pesado), donde es utilizado el pitch de petróleo o pitch asfaltico, para la creación de carreteras, esto implica que al igual que el coque, el asfalto utiliza la misma sustancia, por ende sus conductividades térmicas deberían ser cercanas.

El asfalto posee una conductividad térmica de 0,7 [W/mK]

Ahora bien de modo de tener un valor dentro de lo real, se utilizará el rango cercano a 0,7, para ello se utilizara valores entre [0,6 a 0,8 W/mK] de modo de ver cómo responden los espesores de coque.

Dado que no se tiene conocimiento de las temperaturas del pitch en cada punto del tramo, y como se conoce su temperatura de entrada y de salida en la zona de radiación (370 y 496°C), de modo de tener un valor lo más cercano a la realidad, se consideró para el cálculo una temperatura promedio de 433 °C ( $T_{\infty 2}$ ).

Para facilitar el cálculo, se elaboró un programa en EES. En este programa, agregando los parámetros requeridos, entregará los valores del espesor de coque formado y el coeficiente global de transferencia de calor. (Ver Fig 8.4)

Los datos de entrada (input), son los siguientes:

- R1 =Radio interior del tubo.
- R2 =Radio exterior del tubo.
- hp = Coeficiente convectivo Pitch.
- $cond_{tubo}$  = Conductividad del tubo.
- *cond<sub>coque</sub>* = Conductividad del coque.
- $A_{tc} =$ Área de transferencia de calor.
- *R*3 = El radio que nos iremos dando (método iterativo).

Los datos de salida (output), que entregará son:

- $esp_{coke}$  = Espesor del coque.
- U =Coeficiente global de transferencia de calor.
- *Rt*2 =Radio iterativo espesor.
- Rt =Radio real del espesor.

El único valor de los datos de entrada que no poseemos es él R3, y como es un método iterativo, tendremos que darnos este radio, que deberá ser menor al radio interior del tubo (R1). El radio iterado será válido cuando se cumpla la siguiente relación: Rt2 = Rt

En la Fig.8.4 podemos ver el diagrama Windows del programa donde se cumple ésta relación:



Figura 8.4: Programa desarrollado en EES para cálculo de espesores.

Toda la programación del programa desarrollado se encuentra en el capítulo 13.4 en anexos.

Con el programa se desarrollaron las siguientes tablas y gráficos:

Semana	Q total [kW]	Hp [W/m2K]	T pared [°C]	conductividad térmica [W/mK]	Radio [m]	Espesor [mm]	U [W/m2K]
semana 1	5525	724 51	578.0	0.6	0.04485	1.00	231.9

Tabla 8.6: Cálculo espesor de coque con una conductividad térmica de	0,6:
--	------

Semana	[kW]	[W/m2K]	[°C]	térmica [W/mK]		[mm]	
semana 1	5525	724,51	578,0	0,6	0,04485	1,00	231,9
semana 2	5525	955,84	584,4	0,6	0,04457	1,28	222,1
semana 3	5525	926,38	588,3	0,6	0,04453	1,32	217
semana 4	5525	938,10	593,4	0,6	0,044455	1,40	210,2
semana 5	5525	942,70	596,0	0,6	0,04442	1,43	206,3
semana 6	5525	944,58	599,0	0,6	0,044375	1,48	202,6
semana 7	5525	944,97	589,4	0,6	0,044495	1,36	215
semana 8	5525	946,39	592,3	0,6	0,044465	1,39	211,5
semana 9	5525	946,39	595,1	0,6	0,044425	1,43	207,6
semana 10	5525	947,82	600,5	0,6	0,044395	1,46	200,8
semana 11	5525	976,67	606,4	0,6	0,044255	1,60	194
semana 12	5525	990,68	615,3	0,6	0,04412	1,73	184,8
semana 13	5525	1002,36	623,3	0,6	0,04401	1,84	176,7
semana 14	5525	1011,04	625,3	0,6	0,043975	1,88	174,9
semana 15	5525	1011,58	629,1	0,6	0,043925	1,93	171,6
semana 16	5525	1020,52	630,0	0,6	0,04391	1,94	170,7

Semana	Q total [kW]	Hp [W/m2K]	T pared [°C]	conductividad térmica [W/mK]	Radio [m]	Espesor [mm]	U [W/m2K]
semana 1	5525	724,51	578 <i>,</i> 0	0,7	0,04469	1,16	231,9
semana 2	5525	955,84	584,4	0,7	0,04437	1,48	222,1
semana 3	5525	926,38	588,3	0,7	0,04433	1,52	217
semana 4	5525	938,1	593 <i>,</i> 4	0,7	0,04424	1,61	210,2
semana 5	5525	942,7	596,0	0,7	0,04419	1,66	206,3
semana 6	5525	944,58	599,0	0,7	0,04414	1,71	202,6
semana 7	5525	944,97	589,4	0,7	0,0443	1,55	215
semana 8	5525	946,39	592,3	0,7	0,04425	1,6	211,5
semana 9	5525	946,39	595,1	0,7	0,0442	1,65	207,6
semana 10	5525	947,82	600,5	0,7	0,04411	1,74	200,8
semana 11	5525	976,67	606,4	0,7	0,044	1,85	194
semana 12	5525	990,68	615,3	0,7	0,04385	2	184,8
semana 13	5525	1002,36	623,3	0,7	0,04371	2,14	176,7
semana 14	5525	1011,04	625,3	0,7	0,0437	2,17	174,9
semana 15	5525	1011,58	629,1	0,7	0,04362	2,23	171,6
semana 16	5525	1020,52	630,0	0,7	0,0436	2,25	170,7

Tabla 8.7: Cálculo espesor de coque con una conductividad térmica de 0,7:

Tabla 8.8: Cálculo espesor de coque con una conductividad térmica de 0,8:

Semana	Q total [kW]	Hp [W/m2K]	T pared [°C]	conductividad térmica [W/mK]	Radio [m]	Espesor [mm]	U [W/m2K]
semana 1	5525,0	724,5	578,0	0,8	0,04718	1,32	231,90
semana 2	5525,0	955 <i>,</i> 8	584,4	0,8	0,04681	1,69	222,10
semana 3	5525,0	926,4	588,3	0,8	0,04676	1,74	217,00
semana 4	5525,0	938,1	593,4	0,8	0,04666	1,84	210,20
semana 5	5525,0	942,7	596,0	0,8	0,04661	1,89	206,30
semana 6	5525,0	944,6	599,0	0,8	0,04655	1,95	202,60
semana 7	5525,0	945,0	589,4	0,8	0,04673	1,77	215,00
semana 8	5525,0	946,4	592,3	0,8	0,04667	1,83	211,50
semana 9	5525,0	946,4	595,1	0,8	0,04662	1,88	207,40
semana 10	5525,0	947,8	600,5	0,8	0,04652	1,98	200,80
semana 11	5525,0	976,7	606,4	0,8	0,04639	2,11	194,00
semana 12	5525,0	990,7	615,3	0,8	0,04622	2,28	184,80
semana 13	5525,0	1002,4	623,3	0,8	0,04607	2,43	176,70
semana 14	5525,0	1011,0	625,3	0,8	0,04603	2,47	174,90
semana 15	5525,0	1011,6	629,1	0,8	0,04596	2,54	171,60
semana 16	5525,0	1020,5	630,0	0,8	0,04594	2,56	170,70



*Figura 8.5:* Gráfico de espesor de coque conforme a las semanas. *Fuente:* Elaboración propia basado cálculos obtenidos.

El criterio térmico utilizado para determinar el espesor del coque a través del tiempo, fue considerar el calor total de diseño, de 5525 [kW] y las temperaturas de los tubos que iban aumentando, lo que se traducía en una mayor resistencia térmica y que es originada por el mayor espesor de coque en el interior de los tubos.

Los espesores que en la práctica se retiraron del horno en el decoquificado realizado en marzo, fueron del rango de 2 a 3 [mm], por lo que las conductividades empleadas del orden de 0,6 a 0,8 tienen coherencia y de este modo se comprobaría que el procedimiento de cálculo es válido.

De acuerdo a la Fig.8.5 la tendencia del espesor del coque es prácticamente lineal. En los puntos de descenso (semana 6 a la 10), se debió a que se bajo el caudal, de modo de que se prolongara el tiempo de funcionamiento del horno ya que esto produjo disminuir un poco las temperaturas de metales.

En los 3 casos que se evaluaron se puede concluir que pese a las conductividades térmicas, cada uno de los cálculos esta dentro del rango en lo que respecta al espesor máximo de diseño que son 5 [mm], lo que implica que dado que en ninguno de los dos parámetros

(espesor y temperatura de metales), se llego a su límite, es posible prolongar la operación del horno por más tiempo.

#### 8.6 Estimación del tiempo de decoquificado:

Al graficar los valores de la temperatura v/s el espesor de coque nos encontramos con el siguiente gráfico.



**Figura 8.6:** Temperatura de metal v/s espesor de coque. **Fuente:** Elaboración propia, realizado por el programa EES, basado en los cálculos adquiridos.

Podemos darnos cuenta que la relación entre el espesor y la temperatura de metales es visiblemente lineal, pero posee dos pendientes diferentes. La primera pendiente es mayor y llega hasta los 585°C aproximadamente y después hay una pendiente no tan pronunciada que se mantiene hasta el final de la operación, esto es debido a que el horno como está entrando a régimen aumenta su temperatura rápidamente ocasionando que la formación de coque sea más rápida, llegando a un punto donde ésta se mantiene.

Para poder estimar el tiempo en el que debe decoquificarse, debemos utilizar una función que refleje el comportamiento del espesor a medida que aumenta la temperatura, por lo que se tomará desde la temperatura 585 °C en adelante, ya que refleja mejor el comportamiento de la recta, para luego realizarle un ajuste de curva y obtener la ecuación de esta. (Véase Fig. 8.7)



**Figura 8.7:** Ajuste de curva realizado al gráfico Temperatura metal v/s Espesor. **Fuente:** Elaboración propia, realizado por el programa EES, basado en los cálculos adquiridos.

Una vez tomado el tramo, realizamos un ajuste de curva y obtenemos la siguiente ecuación:

 $Espesor = -9,69159 + 0,0194485 \cdot T_{metal}$ 

Esta ecuación nos ayudará a estimar un espesor con respecto a cualquier temperatura de metal que queramos darnos.

Para este caso, dado que el espesor de coque es muy por debajo de los 5 mm utilizaremos una temperatura un poco más alta que la de diseño.

$$Espesor = -9,69159 + 0,0194485 \cdot 655 \circ C$$
  
 $Espesor = 3,04 \text{ mm}$ 

El cálculo nos arroja un espesor de 3,04 mm y a pesar de que aumentamos 10 grados la temperatura de diseño, se sigue estando dentro del rango máximo del espesor.

Cabe señalar que los cálculos realizados son en base a los datos de operación del horno utilizados en el programa EES de la pág. 84.

Para calcular los días que debe operar el horno, nos basaremos en la Fig. 7.8, utilizando los valores máximos alcanzados por la temperatura de metales. (Véase fig. 8.8)

En la parte marcada con rojo de la fig.8.8, hay una baja de temperatura considerable, en respuesta a una baja de caudal, lo que retardo un poco el aumento de la temperatura de metales.



*Figura 8.8:* Tendencia de temperaturas máximas de metales. *Fuente:* Elaboración propia, realizado por el programa EES, basado en los cálculos adquiridos.

De la misma manera que con la Figura anterior, utilizaremos los punto más característicos del gráfico, para poder realizar el ajuste de curva y encontrar la ecuación que nos ayude a calcular la cantidad de semanas que debe operar el horno antes del decoquificado. Dado que al bajar el caudal se redujo un poco la temperatura de metales, tomaremos los puntos a partir de esta baja para encontrar la ecuación. (Véase Fig. 8.9)



*Figura 8.9:* Ajuste de curva realizado al gráfico de temperaturas máximas de metales v/s días. *Fuente:* Elaboración propia, realizado por el programa EES, basado en los cálculos adquiridos.

Del ajuste de curva realizado obtenemos la siguiente ecuación:

$$T_{metal} = 540,191 + 0,871705 \cdot dias$$

Con esta ecuación podremos calcular cuántos días deben pasar para realizarse el decoquificado.

Considerando una temperatura de metales de 655°C como máxima obtenemos lo siguiente.

$$655 = 540,191 + 0,871705 \cdot dias$$
$$dias = 131,7 \approx 132 \ dias$$
$$semanas = \frac{132}{7} \approx 19 \ semanas \ Aproximadamente$$

Esto indica que el momento optimo para realizar el decoquificado seria después de 19 semanas en operación, lo que al momento de decoquificar se obtendría un espesor de coque aproximado de 3 mm de espesor.

# 8.7 Calor absorbido por el pitch:

Considerando un PCI promedio de 11.250 kcal/kg y una densidad de 0.79, se calcula el calor liberado por el combustible y de paso el porcentaje de calor que absorbe el pitch de este.

Semanas	consumo de combustible [m3/s]	Densidad [Kg/m3]	Q de combustión [Kcal /h]	Q del pitch [Kcal/h]	Calor absorbido
Semana 1	0,58	0,79	18557100	12356802,9	67%
Semana 2	0,60	0,79	19197000	15837120	82%
Semana 3	0,60	0,79	19197000	16235250,3	85%
Semana 4	0,62	0,79	19836900	16464473,8	83%
Semana 5	0,64	0,79	20476800	16554581	81%
Semana 6	0,66	0,79	21116700	16591291,3	79%
Semana 7	0,70	0,79	22401854	16599059,5	74%
Semana 8	0,72	0,79	23062579	16626820	72%
Semana 9	0,74	0,79	23676300	16654791	70%
Semana 10	0,76	0,79	24316200	17221830,5	71%
Semana 11	0,80	0,79	25530773	17498003,2	69%
Semana 12	0,80	0,79	25625503	17728580,3	69%
Semana 13	0,82	0,79	26223855	17900283,8	68%
Semana 14	0,77	0,79	24751244	17910996,7	72%
Semana 15	0,78	0,79	24956100	18070576	72%
Semana 16	0,74	0,79	23556288	18088054,5	77%

Se puede apreciar que el rango de absorción del pitch o rendimiento del horno es entre 67-85%, lo que significa que el rendimiento del horno esta dentro de lo normal.

A medida que transcurren las semanas, el rendimiento va disminuyendo debido al ensuciamiento de los tubos.

El consumo del combustible baja en las últimas semanas debido a que de poco el horno se le baja la carga debido al ensuciamiento acumulado.

# 9. Parámetros que advierten coquificacion en el interior de los tubos.

Dentro de todo el procedimiento de cálculo realizado, se pudieron observar datos que daban respaldo a la aparición de coque dentro del interior de los tubos.

Los parámetros que se pudieron observar son:

1) Aumento en el consumo del Fuel gas: Como se pudo apreciar en la Fig. 4.10, el aumento de combustible es evidente. La explicación a esto es que debido a la mala transferencia de calor que hay debido al aumento de espesor del aislante natural (capa de coque), el operador se ve en la obligación de aumentar la temperatura para que llegue el pitch a la temperatura necesaria, y para ello hay que aplicar mayor calor que conlleva a un mayor consumo de combustible.

**2**) Aumento en el calor total de operación en comparación al calor total de diseño: Esto puede ser claramente visto en la Fig. 8.3 y tal como se explico, esto es debido a que desde la primera semana ya se empieza a generar resistencia al interior de los tubos.

**3) Temperatura de metales:** Claramente se pudo observar que la temperatura de metales aumentó bastante en las semanas de observación. Dicho crecimiento se vio reflejado en la Fig. 7.8 y es la consecuencia del aumento del Q total que se le aplica a los tubos, que como se explico, es necesario para que el fluido alcance la temperatura deseada (496°C).

**4) Perdida de carga:** Otro parámetro que no se le dio mucho énfasis es la gran pérdida de carga que se ocasiona al generarse el espesor de coque, debido a que el diámetro interior se ve reducido conforme al tiempo. Desde ya el horno posee gran pérdida de carga por la gran cantidad de codos que posee el serpentín, por lo que es necesario aplicarle agua a presión para mantener una velocidad a lo largo del circuito, pero con la reducción del diámetro se dificulta más y la presión cae bastante.

# 10. Mejoras aplicadas al proceso de decoquificado Horno H-1401:

Se proponen algunas mejoras para el proceso:

- La instalación de más termocuplas para ver cómo se comporta el crecimiento de coque en los demás tubos del horno.
- •La baja de temperatura o el apagado de quemadores puntuales del horno: Esto consiste que con el uso de las termocuplas, poder identificar las zonas de los tubos del horno más afectada y por lo tanto como medida de emergencia, bajar la potencia del quemador que impacta en el tubo o bien apagarlo, y aumentar la temperatura a la zona menos afectada (un tubo con menor temperatura), de modo de equilibrar la transferencia y que el producto (pitch) salga a la temperatura indicada (496 °C)
- No sobredimensionar la carga del horno: Otra de las observaciones que se pudieron obtener, es la relación inversa entre el caudal con la temperatura de los tubos y el consumo de combustible, ya que a menor caudal es requerido menos combustible y esto trae consigo que el tubo se caliente menos, lo que lograría aplazar más la mantención de los tubos.
- Disminuir tiempos muertos o complicaciones en la instalación de los equipos de limpieza: Esto hace que se retrasen las tareas y por ende la mantención no se realice en los plazos indicados, incidiendo directamente en los costos de producción.

Las mejoras que podrían disminuir el tiempo a la hora de realizar la limpieza:

 Instalación de la lanzadera: La lanzadera debe instalarse en la entrada y salida del horno. Este equipo es pesado por lo que se necesitan al menos 5 hombres para su instalación, instalación que se hace levantándola en forma manual y apernándola en un tubo que pose flange con el torque indicado. Lo que dificulta la instalación es que debe mantenerse recta en el aire para poder torquear de manera correcta cada perno en el flange. Lo que se pudo apreciar son las reiteradas correcciones a la hora de instalarlo, por el mal apriete de este, esto debido a que se hace mientras las personas sujetan la lanzadera (Ver fig.10.1), además se puede apreciar de que se pone un caballete debajo de esta mientras opera, para que pueda soportar su peso debido a la gran tensión que pone al tubo, proceso muy peligroso.



*Figura 10.1:* Lanzadera instalada apoyada con un caballete. *Fuente:* Archivo Técnico. División de mantención, Enap Refinerías Biobío.

Lo que se propone es el uso de un gancho de soporte de modo que pueda agilizar la instalación y además, no ponga en riesgo la integridad física del personal.

Dado el poco espacio que se posee, no es recomendable una instalación permanente, ya que perjudicaría mantenciones de otros equipos, por lo que es recomendable utilizar un gancho de soporte que sea móvil, de modo que pueda servir para levantar otros equipos.(Véase Fig. 10.2)



*Figura 10.2: Ejemplo de pluma hidráulica móvil. Fuente: imagen obtenida de internet.* 

 Instalación del spool: Lo que dificulta la instalación del spool es que debe utilizarse un camión pluma para poder lograrse la instalación, además de mucho más personal. (Véase Fig. 10.3)



*Figura 10.3:* Instalación spool *Fuente:* Archivo Técnico. División de mantención, Enap Refinerías Biobío.

Para poder ahorrar tiempo y dinero, se recomienda la instalación de un circuito permanente que se utilice al momento de hacer el decoquificado, que ayude a que el proceso de decoquificado pueda hacerse más rápido.

# **11. Conclusiones y recomendaciones:**

# **Operación:**

Se pudo comprobar que con el paso del tiempo el calor total aplicado a los tubos está sobredimensionado en comparación a la de diseño (Fig. 8.3), señalando que desde la primera semana hay un notorio crecimiento de espesor de coque en el interior de los tubos, lo que implicó un aumento en el consumo de combustible y que los gases de combustión estén sobre los valores máximos de diseño.

Idealmente el horno debería operar con caudales cercanos a 2100 [m3/día], sin embargo actualmente se encuentra operando sobre los 2750 [m3/día], por lo tanto presenta un aumento de más del 30% de su capacidad de diseño.

El caudal es una variable crítica ya que un mayor caudal implica un mayor consumo de combustible y además un mayor flujo calórico, ya que el volumen de pitch al que se le debe transferir calor es más grande, trayendo como consecuencia que se genere incrustaciones de coque más rápido en el diámetro interior de los tubos.

Se recomienda mantener el caudal que indica el fabricante para que la generación de coque sea más lenta y el horno pueda operar por más tiempo.

Se calculó el porcentaje de calor que recibe el pitch del horno cuando este está operando, encontrándonos rendimiento entre 66 a 84% de absorción, lo que indica que el rendimiento del horno es aceptable pese a tener en contra la resistencia del coque.

### Temperatura de los tubos y gases:

Se pudo observar que los tubos más afectados fueron los dos primeros que están más expuestos a la radiación de los quemadores, pero ninguno alcanzando la temperatura máxima de diseño (645°C)

Las temperaturas de los gases eran muy elevadas a las que indica el fabricante (843°C), alcanzando valores hasta de un 1277 °C, es decir, un 50% más por encima de lo recomendado, por lo que se recomienda mayor monitoreo para que las temperaturas no se disparen.

### **Coquificacion de tubos:**

Con respecto a la coquificación se pudo comprobar que los cálculos de espesores estuvieron cercanos a los extraídos después del decoquificado. Estos fueron de un rango de 2 a 3 mm de espesor, por lo que el procedimiento de cálculo optado es correcto.
Los espesores de coque obtenidos indican que están dentro del rango recomendado por el fabricante, ya que el tubo es capaz de soportar un espesor de coque de hasta 5 mm, por lo que cumplía con los estándares de diseño.

Se pudo encontrar que aparte de la temperatura de metales, existen otros parámetros importantes a la hora de evaluar la coquificación de tubos, estos son el consumo de combustible, temperatura de los gases y también la perdida de carga.

Con el programa EES construido se pudo observar también lo sensible que es la conductividad térmica del coque en el cálculo del espesor, ya que la mínima variación de este, hacia que el espesor cambiará bastante. Se opto por el valor de 0,8 [W/mK] para el cálculo de los días, por ser el valor más alto ya que generaba mayor espesor, y con ello se logro obtener que con los datos actuales, el momento adecuado para realizar el decoquificado seria después de 19 semanas de operación y además se obtendría un espesor de coque aproximado de 3,04 mm de espesor. Esto indica que la empresa no estaba muy alejada del tiempo óptimo, ya que ellos después de 16 semanas realizaban el decoquificado sin haber realizado cálculos sobre este.

## Con el Decoquificado se obtuvieron los siguientes beneficios:

-Prevenir el sobrecalentamiento de los tubos para evitar que los mismos pierdan sus propiedades metalúrgicas y se deformen.

-Capacidad de obtener cargas máximas a temperaturas mínimas de operación, trayendo economía en el consumo del fuel gas.

-Reducir el lucro cesante debido a paradas de emergencia por rompimiento de tubos.

-Aumento en la capacidad volumétrica del pitch.

-Obtener un proceso de refinación más eficiente debido al incremento de la transferencia de calor

-Minimizar los costos de Fuel gas.

## 12. Bibliografía:

- API 560, Fired Heaters for General Refinery Service.
- API 573, Inspection of Fired Boilers and Heaters.
- Apuntes Combustión, Profesor Reinaldo Sánchez A.
- Apuntes Combustión, Profesor Luis Cerda M.
- ASTM A-213 Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes.
- EES Versión 9.69
- Incropera Frank P, Fundamentos de transferencia de calor, Mexico, Prentice-Hall 1999.
- Informes de Inspección del Horno H-1401
- Manual De Operaciones Unidad De Coquificación Retardada, ENAP 2006.
- Manual de Hornos para ENAP Refinerías Bío Bío.
- Lobo, Wimpress, and Evans, J.E., Heat Transfer in the Radiant Section of PetroleumHeaters, Trans. of AIChE, Vol. 35, 1939.

## 13. Anexos



## 13.1 Gráficos de temperatura de metales en los tubos del paso 1

Figura 13.1: Tendencia temperatura tubo 1 (termocupla 1).

Fuente: Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.



Figura 13.2: Tendencia temperatura tubo 2 (termocupla 2).

Fuente: Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.



*Figura 13.3: T*endencia temperatura tubo 3 (termocupla 3). *Fuente:* Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.



*Figura 13.4:* Tendencia temperatura tubo 4 (termocupla 4). *Fuente:* Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.



*Figura 13.5: T*endencia temperatura tubo 4 (termocupla 5). *Fuente:* Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.



*Figura 13.6:* Tendencia temperatura tubo 3 (termocupla 6). *Fuente:* Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.



*Figura 13.7:* Tendencia temperatura tubo 2 (termocupla 7). *Fuente:* Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.



*Figura 13.8:* Tendencia temperatura tubo 1 (termocupla 8). *Fuente:* Elaboración propia basado en datos adquirido por las termocuplas del horno H-1401.

13.2 Propiedades del aire seco a presión atmosférica.								
Temperatura	Densidad	Calor esp.	Cond. Térmica	Visc cinem.	N° Prandtl	Visc. Dinám	Dif. Termica	Coef. Dilat.
t (°C)	$\rho$ (kg/m3)	Cp (kJ/kgK)	<sup>λ</sup> (W/mK)	U (m2/s)	Pr	(ka/m s)	( m2/s)	β (1/K)
460	0.481	1.083	5.35E-02	7.16E-05	0.697	3.45E-05	1.03E-04	1.36E-03
465	0.478	1.084	5.38E-02	7.24E-05	0.697	3.46E-05	1.04E-04	1.36E-03
470	0.475	1.085	5.41E-02	7.32E-05	0.697	3.48E-05	1.05E-04	1.35E-03
475	0.472	1.087	5.44E-02	7.40E-05	0.698	3.49E-05	1.06E-04	1.34E-03
480	0.469	1.088	5.46E-02	7.48E-05	0.698	3.50E-05	1.07E-04	1.33E-03
485	0.466	1.089	5.49E-02	7.56E-05	0.698	3.52E-05	1.08E-04	1.32E-03
490	0.463	1.090	5.52E-02	7.64E-05	0.698	3.53E-05	1.10F-04	1.31E-03
495	0.459	1.091	5.55E-02	7.72E-05	0.698	3.55E-05	1.11E-04	1.30E-03
500	0.457	1.093	5.57E-02	7.81E-05	0.699	3.56E-05	1.12E-04	1.29E-03
510	0.451	1.095	5.63E-02	7.97E-05	0.699	3.59E-05	1.14E-04	1.28E-03
520	0.445	1.097	5.68E-02	8.14E-05	0.700	3.62E-05	1.16E-04	1.26E-03
530	0.439	1.099	5.73E-02	8.31E-05	0.700	3.65E-05	1.19E-04	1.25E-03
540	0.434	1.102	5.79E-02	8.48E-05	0.701	3.68E-05	1.21E-04	1.23E-03
550	0.429	1.104	5.84E-02	8.65E-05	0.701	3.71E-05	1.23E-04	1.22E-03
560	0.424	1.106	5.89E-02	8.82E-05	0.702	3.74E-05	1.26E-04	1.20E-03
570	0.419	1.108	5.94E-02	8.99E-05	0.702	3.76E-05	1.28E-04	1.19E-03
580	0.414	1.111	5.99E-02	9.16E-05	0.703	3.79E-05	1.30E-04	1.17E-03
590	0.409	1.113	6.04E-02	9.34E-05	0.703	3.82E-05	1.33E-04	1.16E-03
600	0.404	1.115	6.09E-02	9.52E-05	0.704	3.85E-05	1.35E-04	1.15E-03
610	0.400	1.117	6.14E-02	9.69E-05	0.704	3.87E-05	1.38E-04	1.13E-03
620	0.395	1.119	6.19E-02	9.87E-05	0.705	3.90E-05	1.40E-04	1.12E-03
630	0.391	1.121	6.24E-02	1.01E-04	0.705	3.93E-05	1.43E-04	1.11E-03
640	0.387	1.123	6.29E-02	1.02E-04	0.706	3.95E-05	1.45E-04	1.10E-03
650	0.382	1.125	6.34E-02	1.04E-04	0.706	3.98E-05	1.47E-04	1.08E-03
660	0.378	1.127	6.39E-02	1.06E-04	0.707	4.01E-05	1.50E-04	1.07E-03
670	0.374	1.129	6.44E-02	1.08E-04	0.708	4.03E-05	1.52E-04	1.06E-03
680	0.370	1.131	6.49E-02	1.10E-04	0.708	4.06E-05	1.55E-04	1.05E-03
690	0.366	1.133	6.53E-02	1.12E-04	0.709	4.09E-05	1.57E-04	1.04E-03
700	0.363	1.135	6.58E-02	1.13E-04	0.709	4.11E-05	1.60E-04	1.03E-03
710	0.359	1.137	6.63E-02	1.15E-04	0.710	4.14E-05	1.62E-04	1.02E-03
720	0.355	1.139	6.67E-02	1.17E-04	0.710	4.16E-05	1.65E-04	1.01E-03
730	0.352	1.141	6.72E-02	1.19E-04	0.711	4.19E-05	1.67E-04	9.97E-04
740	0.348	1.143	6.77E-02	1.21E-04	0.712	4.21E-05	1.70E-04	9.87E-04
750	0.345	1.145	6.81E-02	1.23E-04	0.712	4.24E-05	1.73E-04	9.77E-04
760	0.342	1.146	6.86E-02	1.25E-04	0.713	4.26E-05	1.75E-04	9.68E-04
770	0.338	1.148	6.90E-02	1.27E-04	0.713	4.29E-05	1.78E-04	9.59E-04
780	0.335	1.150	6.95E-02	1.29E-04	0.714	4.31E-05	1.80E-04	9.50E-04
790	0.332	1.152	6.99E-02	1.31E-04	0.714	4.34E-05	1.83E-04	9.41E-04
800	0.329	1.153	7.04E-02	1.33E-04	0.715	4.36E-05	1.86E-04	9.32E-04
810	0.326	1.155	7.08E-02	1.35E-04	0.716	4.39E-05	1.88E-04	9.23E-04
820	0.323	1.157	7.13E-02	1.37E-04	0.716	4.41E-05	1.91E-04	9.15E-04
830	0.320	1.158	7.17E-02	1.39E-04	0.717	4.44E-05	1.93E-04	9.07E-04
840	0.317	1.160	7.21E-02	1.41E-04	0.717	4.46E-05	1.96E-04	8.98E-04
850	0.314	1.162	7.25E-02	1.43E-04	0.718	4.48E-05	1.99E-04	8.90E-04
860	0.312	1.163	7.30E-02	1.45E-04	0.718	4.51E-05	2.01E-04	8.83E-04
870	0.309	1.165	7.34E-02	1.47E-04	0.719	4.53E-05	2.04E-04	8.75E-04
880	0.306	1.166	7.38E-02	1.49E-04	0.719	4.55E-05	2.07E-04	8.67E-04
890	0.303	1.168	7.42E-02	1.51E-04	0.720	4.58E-05	2.10E-04	8.60E-04
900	0.301	1.169	7.47E-02	1.53E-04	0.721	4.60E-05	2.12E-04	8.52E-04
910	0.298	1.1/1	7.51E-02	1.55E-04	0.721	4.62E-05	2.15E-04	8.45E-04
920	0.296	1.172	7.55E-02	1.57E-04	0.722	4.05E-05	2.18E-04	8.38E-04
930	0.293	1.1/4	7.59E-02	1.59E-04	0.722	4.67E-05	2.20E-04	8.31E-04
940	0.291	1.1/5	7.03E-02	1.01E-04	0.723	4.09E-05	2.23E-04	8.24E-04
000	0.289	1.1//	7.0/E-U2	1.03E-04	0.723	4.72E-05	2.20E-04	8.18E-04
960	0.286	1.178	7.71E-02	1.00E-04	0.724	4.74E-05	2.29E-04	8.11E-04
970	0.284	1.179	7.75E-02	1.00E-04	0.724	4.70E-05	2.31E-04	8.04E-04
900	0.282	1.101	7.79E-UZ	1.70E-04	0.725	4.70E-05	2.34E-04	7.90E-04
990	0.279	1.182	7.03E-U2	1.72E-04	0.720	4.00E-05	2.37E-04	7.92E-04
1000	0.277	1.184	1.012-02	1.74⊑-04	U.120	4.03⊑-05	∠.40⊑-04	1.00E-04

## 13.3 Planos de diseño del H-1401





D 06-9

\_\_\_\_\_

Be-815



108



A B C D E F G H

L 14 N 15 O P 18 O P 19 R 20 S

109

Ba 815

## 13.4 Programación EES:

#### 1) Programa calculo de espesor:

#### 2) Programa Combustión Fuel gas:

#### "ECUACIÓN COMBUSTIÓN IDEAL DEL FUEL GAS"

 $\begin{array}{l} 33.62 \cdot H2 + 2.92 \cdot N2 + 0.43 \cdot C0 + 0.53 \cdot C02 + 37.51 \cdot CH4 + 8.08 \cdot C2H6 + 2.11 \cdot C2H4 + 4.77 \cdot C3H8 + 1.56 \cdot C3H6 + 4.96 \cdot C4H10 + 2.3 \cdot C4H8 + 0.67 \cdot C5H12 + 0.51 \cdot C6H14 + A \cdot 02 + 3,76 \cdot A \cdot N2 = X * C02 + Y * N2 + Z * H20 \end{array}$ 

#### BALANCE DEL CARBONO

 $X = 0.43 + 0.53 + 37.51 + 8.08 \cdot 2 + 2.11 \cdot 2 + 4.77 \cdot 3 + 1.56 \cdot 3 + 4.96 \cdot 4 + 2.3 \cdot 4 + 0.67 \cdot 5 + 0.51 \cdot 6$ BALANCE DEL NITRÓGENO  $Y = 2.92 + 3.76 \cdot A$ BALANCE DEL OXÍGENO  $2 \cdot A + 0.43 + 0.53 \cdot 2 = 2 \cdot X + Z$ BALANCE DEL HIDRÓGENO  $2 \cdot Z = 33.62 \cdot 2 + 37.51 \cdot 4 + 8.08 \cdot 6 + 2.11 \cdot 4 + 4.77 \cdot 8 + 1.56 \cdot 6 + 4.96 \cdot 10 + 2.3 \cdot 8 + 0.67 \cdot 12 + 0.51 \cdot 14$ PRESION PARCIAL DEL CO2  $P_{CO2} = PM \cdot \left[\frac{X}{X + Y + Z}\right]$ PM = 1 PRESION TOTAL DE LOS GASES . SE CONSIDERA 1 ATMÓSFERA
PRESION PARCIAL DEL VAPOR DE AGUA EN COMBUSTIÓN IDEAL  $P_{H20} = PM \cdot \left[\frac{Z}{X + Y + Z}\right]$ 

SUMA DE LAS PRESIONES PARCIALES DEL CO2 Y VAPOR DE AGUA

 $P = P_{CO2} + P_{H2O}$ 

# "COMBUSTIÓN REAL CON EXCESO DE AIRE EN PORCENTAJE. SE FORMA OXÍGENO LIBRE. SE SUPONE CO=0"

 $\begin{array}{l} 33.62 \cdot H2 + 2.92 \cdot N2 + 0.43 \cdot C0 + 0.53 \cdot C02 + 37.51 \cdot CH4 + 8.08 \cdot C2H6 + 2.11 \cdot C2H4 + 4.77 \cdot C3H8 + 1.56 \cdot C3H6 + 4.96 \cdot C4H10 + 2.3 \cdot C4H8 + 0.67 \cdot C5H12 + 0.51 \cdot C6H14 + (1 + EXC) \cdot A \cdot 02 + 3.76 \cdot A \cdot (1 + EXC) \cdot N2 = D * C02 + E \cdot 02 + F \cdot N2 + G \cdot H20 \end{array}$ 

BALANCE DEL CARBONO

 $D = 0,43 + 0,53 + 37,51 + 8,08 \cdot 2 + 2,11 \cdot 2 + 4,77 \cdot 3 + 1,56 \cdot 3 + 4,96 \cdot 4 + 2,3 \cdot 4 + 0,67 \cdot 5 + 0,51 \cdot 6$ 

BALANCE DEL HIDRÓGENO

2 · G = 33,62 · 2 + 37,51 · 4 + 8,08 · 6 + 2,11 · 4 + 4,77 · 8 + 1,56 · 6 + 4,96 · 10 + 2,3 · 8 + 0,67 · 12 + 0,51 · 14 BALANCE DEL OXÍGENO

$$0,43 + 0,53 \cdot 2 + 2 \cdot A \cdot \frac{EXC}{100} + 2 \cdot A = 2 \cdot D + 2 \cdot E + G$$

BALANCE DEL NITRÓGENO

2,92 + 3,76  $\cdot$  A  $\cdot$   $\frac{\text{EXC}}{100}$  + 3,76  $\cdot$  A = F

EXC = 10 EXCESO DE AIRE EN PORCENTAJE

$$PCO2 = PM \cdot \left[ \frac{D}{D + E + F + G} \right] PRESIÓN PARCIAL DEL CO2$$

$$PH20 = PM \cdot \left[ \frac{G}{D + E + F + G} \right] PRESIÓN PARCIAL DEL VAPOR DE AGUA$$

PGASES = PC02 + PH20 SUMA DE LASPRESIONES PARCIALES DEL CO2 Y VAPOR DE AGUA EN COMBUSTIÓN REAL

Ley de los gases ideales

 $vel_d = vel \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24$ 

 $A_{horno} = 1,918 \cdot 22,75$  [m2]

## 3) Programa cálculo del cp y densidad de los gases de combustión.

Calculo del Cp de los gases horno H-1401

$$T = 843$$

$$cp_{n2} = Cp (N2; T=T)$$

$$cp_{h2o} = Cp (h2o; T=T)$$

$$cp_{oo2} = Cp (CO2; T=T)$$

$$cp_{o2} = Cp (O2; T=T)$$

$$Gi_{n2} = 0.72458 \cdot \frac{28}{27,894}$$

$$Gi_{h2o} = 0.16537 \cdot \frac{18}{27,894}$$

$$Gi_{oo2} = 0.0925 \cdot \frac{44}{27,894}$$

$$Gi_{o2} = 0.01746 \cdot \frac{32}{27,894}$$

$$Gi = Gi_{n2} + Gi_{h2o} + Gi_{oo2} + Gi_{o2}$$

$$cp = cp_{n2} \cdot Gi_{n2} + cp_{h2o} \cdot Gi_{h2o} + cp_{oo2} \cdot Gi_{oo2} + cp_{o2} \cdot Gi_{o2} \quad (kj/kg)$$

$$La conversion de kjoules a kcal es:$$

$$Cp_{total} = cp \cdot 4.1868 \quad (kcal/kg °C)$$

$$Densidad$$

$$p = 101325$$

$$D_{gas} = \frac{p}{298,06 \cdot (T + 273)} \quad (kg/m3)$$