



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE ESFUERZO DE LA LÍNEA
30'' P5009-FCAA EN ENAP REGION DEL BÍO BÍO**

POR

Héctor Ignacio Andrés Pérez Bravo

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Carlos Medina Muñoz
Ingeniero Supervisor:
Gonzalo Cabeza Ramírez

Agosto 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Héctor Ignacio Andrés Pérez Bravo

© 2023 Héctor Ignacio Andrés Pérez Bravo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o
procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi profundo agradecimiento a mi familia. A mi mamá, Virginia, por su amor incondicional, apoyo constante y dedicación que me han impulsado a alcanzar este logro. A mi papá, Héctor, cuyo apoyo y presencia siento en todo momento. A mi hermana, Claudia, quien siempre ha sido mi inspiración y modelo a seguir. A mi polola, Emily, quien ha sido un pilar fundamental durante esta etapa de mi vida universitaria.

Quiero dar mi agradecimiento a la Universidad por brindarme una educación de calidad y por llenar mi experiencia con valiosos recuerdos. Reconozco la labor de los profesores que me guiaron y enseñaron a lo largo de este camino, en especial a Carlos Medina, Su compromiso y dirección fueron fundamentales para la realización de esta tesis.

También quiero agradecer a mis amigos, quienes han estado a mi lado en las buenas y malas. En particular, a Daniel Zambra, cuya ayuda fue esencial en esta etapa.

Agradezco a ENAP por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica profesional y posteriormente mi memoria de título. Mi gratitud se extiende a todas las buenas personas que conocí en esta empresa, en especial a Gonzalo Cabeza, quien me permitió trabajar en esta memoria de título. Sus enseñanzas han sido invaluable durante mi tiempo en la empresa. Agradezco también a Diego Garrido y Carlos Zapata por su compañerismo y amistad.

Este logro no habría sido posible sin el respaldo y apoyo de cada uno de ustedes. Mi más sincero agradecimiento por formar parte de este camino.

Resumen

El objetivo de este trabajo es crear un modelo detallado y realizar un análisis de esfuerzos en la línea de tubería 30" P5009-FCAA utilizando el software CAESAR II. La elaboración de este modelo detallado servirá para realizar modificaciones de forma interna tanto en la línea de tubería como en la estructura de soporte. Esta capacidad de realizar ajustes contribuirá significativamente a mejorar el proyecto en caso de que ENAP determine la necesidad de introducir ciertas modificaciones durante la etapa de ejecución en el terreno.

Para lograrlo, se inició con una revisión completa del proceso de cracking catalítico, abordando tanto los aspectos fundamentales como los elementos que conforman el sistema de tubería. Luego, se procedió a modelar la futura configuración de la tubería utilizando el software CAESAR II, incorporando todas las modificaciones propuestas por la empresa de ingeniería asociada al proyecto. Esto se llevó a cabo para realizar una comparación entre los resultados obtenidos y los proporcionados por la entidad. Ambos análisis emplearon los mismos escenarios de carga y condiciones límite, con el propósito de entender las diferencias identificadas. Se observó una convergencia en los resultados entre ambos estudios, reforzando la confiabilidad de la herramienta de análisis. No obstante, diferencias en el enfoque sísmico causaron discrepancias en ciertos casos, indicando la importancia de considerar enfoques adecuados en análisis de carga sísmica.

Uno de los hallazgos dentro de la comparación fue que la empresa de ingeniería subestimó la temperatura del regenerador, lo que contribuye a tener resultados inexactos debido a la expansión térmica que experimentan los equipos conectados a la tubería, esta temperatura se considera en el estudio posterior.

Luego, se creó el modelo actual de la tubería y se utilizó el modelo con la configuración futura mencionada anteriormente para realizar una comparación entre los dos modelos, donde se incorporó la temperatura real de diseño del regenerador. En la configuración actual, el caso 3 presentó los mayores esfuerzos, aunque dentro del rango elástico del material, con un margen de seguridad con respecto al esfuerzo de fluencia. Se destaca que la planta ha estado operativa sin incidentes durante 56 años, lo que evidencia la fiabilidad de la configuración actual. Al realizar una comparación con la configuración futura, se observó que los esfuerzos máximos se mantuvieron similares o incluso disminuyeron en algunos puntos.

La verificación en terreno demostró que no existen interferencias en términos de desplazamientos entre las tuberías y equipos cercanos, validando el diseño propuesto.

Respecto a la integridad de las boquillas, se ha recurrido al boletín WRC-107 para confirmar que los esfuerzos máximos de la configuración futura no superan los presentes en la configuración actual.

En última instancia, se ha constatado que las bridas de la válvula de aislamiento operan dentro de los límites admisibles, asegurando su correcto desempeño en el sistema. En conjunto, estos hallazgos respaldan la factibilidad de incorporar la válvula en la nueva configuración y ratifican la continuidad de la seguridad del sistema de tuberías.

Abstract

The objective of this work is to create a detailed model and perform a stress analysis on the 30" P5009-FCAA pipeline using the CAESAR II software. The development of this detailed model will serve to make internal modifications to both the pipeline and the support structure. This capability to make adjustments will significantly contribute to improving the project in case ENAP determines the need for certain modifications during the field execution stage.

To achieve this, the process of catalytic cracking was thoroughly reviewed, addressing both fundamental aspects and the elements comprising the pipeline system. Subsequently, the future pipeline configuration was modeled using the CAESAR II software, incorporating all the modifications proposed by the engineering company associated with the project. This was done to compare the results obtained with those provided by the entity. Both analyses utilized the same loading scenarios and boundary conditions, with the purpose of understanding the identified differences. There was a convergence in the results between both studies, reinforcing the reliability of the analysis tools. However, differences in the seismic approach caused discrepancies in certain cases, highlighting the importance of considering appropriate approaches in seismic load analysis.

One of the findings within the comparison was that the engineering company underestimated the regenerator's temperature, which contributes to inaccurate results due to the thermal expansion experienced by the equipment connected to the pipeline. This temperature is considered in the subsequent study.

Next, the current pipeline model was created, and the model with the aforementioned future configuration was used to compare the two models, incorporating the actual regenerator design temperature. In the current configuration, Case 3 exhibited the highest stresses, though still within the material's elastic range, with a safety margin with respect to yield stress. It's worth noting that the plant has operated without incidents for 56 years, demonstrating the reliability of the current configuration. When comparing with the future configuration, it was observed that the maximum stresses remained similar or even decreased at certain points.

Field verification demonstrated that there are no interference issues in terms of displacements between nearby pipes and equipment, validating the proposed design.

Regarding the integrity of the nozzles, the WRC-107 bulletin has been referenced to confirm that the maximum stresses of the future configuration do not exceed those present in the current configuration.

Ultimately, it has been verified that the isolation valve flanges operate within permissible limits, ensuring their proper performance in the system. Collectively, these findings support the feasibility of incorporating the valve in the new configuration and reaffirm the continued safety of the pipeline system.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iii
Lista de Tablas	vii
Lista de Figuras	viii
Glosario	xi
Símbolos.....	xii
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Antecedentes.....	4
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Condiciones de diseño	7
1.6 Metodología.....	8
CAPÍTULO 2: Marco teórico	10
2.1 Definiciones básicas	10
2.1.1 Momento de inercia (I).....	10
2.1.2 Módulo de elasticidad (E).....	10
2.1.3 Desplazamiento térmico	11
2.1.4 Coeficiente de expansión térmica (α).....	11
2.1.5 Factor de flexibilidad (k) y Factor de reducción de rangos de esfuerzos (f)	11
2.1.6 Rigidez y flexibilidad	12
2.1.7 Temperatura y presión de diseño.....	13
2.2 Análisis de Esfuerzo de un sistema de tuberías	13
2.3 Cargas Solicitantes	14
2.3.1 Cargas estáticas.....	14
2.3.2 Cargas dinámicas	14
2.3.3 Carga sísmica.....	15
2.4 Esfuerzos solicitantes	16
2.5 Normativas aplicables a los sistemas de tuberías	16
2.5.1 ASME B31.3	17
2.6 Esfuerzos según código ASME B31.3	17

2.6.1 Esfuerzos admisibles	18
2.6.2 Esfuerzos sostenidos o primarios	18
2.6.3 Esfuerzos por expansión o secundarios	19
2.6.4 Esfuerzos ocasionales	21
2.7 Elementos del sistema de soporte	21
CAPITULO 3: Modelado de línea 30" P5009-FCAA	22
3.1 Componentes del sistema	22
3.1.1 Reactor D-101, regenerador D-100, estructura soportante y torre E-100A.....	22
3.1.2 Tubería.....	23
3.1.3 Codos y Brida.....	24
3.2 Configuraciones del sistema de tuberías	24
3.2.1 Configuración 1: sistema de tubería actual.....	24
3.2.2 Configuración 2: línea de tubería en configuración futura.....	30
3.3 Ingreso de datos a CAESAR II.....	35
3.3.1 Caso sísmico	38
3.4 Modelo de línea condición actual en CAESAR II.....	39
3.5 Modelo de línea condición futura en CAESAR II.....	40
3.6 Casos de carga	43
CAPITULO 4: Resultados	45
4.1 Resultados de la empresa de ingeniería.....	45
4.1.1 Caso de carga 1	46
4.1.2 Caso de carga 2.....	46
4.1.3 Caso de carga 3.....	47
4.1.4 Caso de carga 4.....	48
4.1.5 Caso de carga 5.....	49
4.2 Comparación de configuración futura y configuración actual	51
4.2.1 Caso de carga 1	51
4.2.2 Caso de carga 2.....	51
4.2.3 Caso de carga 3.....	52
4.2.4 Caso de carga 4.....	53
4.2.5 Caso de carga 5.....	53
4.2.6 Resumen de casos de carga configuración actual.....	54
4.2.7 Resumen de casos de carga configuración futura.....	55

CAPITULO 5: Conclusiones	57
Bibliografía.....	59
Anexo A	60
Anexo A1: Carta Gantt.....	60
Anexo B.....	61
Anexo B1: Diagrama de Bloques de plantas en ENAP Bío Bío.....	61
Anexo B2: Información de PI System.....	62
Anexo C.....	63
Anexo C1: Descripción de procesos	63
Empresa Nacional Del Petróleo.....	63
Refinería Bío Bío.....	63
Plantas de proceso en ENAP Refinería Bío Bío.....	64
• Separación de productos primarios derivados del crudo (Topping y Vacío).....	64
• Síntesis de hidrocarburos nobles y depuración de los productos	64
Funcionamiento del Cracking Catalítico (FCCU)	65
Planta FCCU en ERBB.....	67
Anexo C2: Diagrama con temperatura y presión de diseño en base a PI System.....	68
Anexo D	69
Anexo D1: Isométricos de la línea	69
Anexo D2: Planos de equipos involucrados.....	71
Anexo D3: Soportes.	73
Anexo E.....	79
Anexo E1: Casos de carga.....	79
Anexo E2: análisis de configuración actual	80
Resultados configuración actual	80
Caso de carga 1	81
Caso de carga 2.....	82
Caso de carga 3.....	83
Caso de carga 4.....	85
Caso de carga 5.....	86
Anexo E3: análisis de configuración futura	88
5.3.1 Caso de carga 1	88

5.3.2 Caso de carga 2.....	90
5.3.3 Caso de carga 3.....	92
5.3.4 Caso de carga 4.....	94
5.3.5 Caso de carga 5.....	96
Anexo E4: Análisis de boquillas con boletín WRC-107.....	99
Anexo E5: Cargas en soportes para cada caso	101
Anexo F.....	103
Anexo F1: Dificultades del proyecto	103

Lista de Tablas

Tabla 1: Condiciones de operación de la línea de tubería.	8
Tabla 2: Propiedades mecánicas de ASTM A-691 Grado 1,25 Clase 22.	23
Tabla 3: Dimensiones del diagrama tridimensional.	30
Tabla 4: Especificaciones de junta de expansión.	32
Tabla 5: Dimensiones del diagrama tridimensional futuro.	35
Tabla 6: Parámetros definidos para el modelo en CAESAR II.	37
Tabla 7: Cargas sísmicas aplicadas.	38
Tabla 8: Casos de carga.	79
Tabla 9: Desplazamientos relativos en soportes y guías configuración existente.	80
Tabla 10: Valor de colores para esfuerzos.	80
Tabla 11: Desplazamientos relativos en soportes y guías configuración futura.	88
Tabla 12: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 1).	90
Tabla 13: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 2).	92
Tabla 14: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 3).	94
Tabla 15: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 4).	96
Tabla 16: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 5).	98
Tabla 17: Cargas en soportes.	101

Lista de Figuras

Figura 1: Matriz energética secundaria (Gobierno de Chile, 2019).....	1
Figura 2: Línea 30” P5009-FCAA (Planta cracking catalítico).....	3
Figura 3: Posición de la paleta de 30".....	4
Figura 4: Estructura existente.....	5
Figura 5: Diagrama de flujo de metodología.....	9
Figura 6: Factor de flexibilidad e intensificación de esfuerzos de un codo (The American Society of Mechanical Engineers, 2014).....	11
Figura 7: Factor de intervalo de esfuerzo, f	12
Figura 8: Esfuerzos solicitantes en una tubería.....	16
Figura 9: Momentos en codos.....	20
Figura 10: Esfuerzos admisibles, fluencia y ruptura para distintas temperaturas (Cadetech, SERVICIO ANÁLISIS LÍNEA 30-P-5009 NORMA NCH2369, 2020).....	23
Figura 11: Soportes en la línea horizontal.....	25
Figura 12: Soporte E-1.....	26
Figura 13: Soporte E-2.....	26
Figura 14: Soportes en la línea vertical.....	27
Figura 15: Soporte E-3.....	27
Figura 16: Soporte E-4.....	28
Figura 17: Soporte E-5.....	28
Figura 18: Diagrama tridimensional del sistema existente.....	29
Figura 19: Soporte N-1.....	31
Figura 20: Soporte N-2 y Válvula de aislamiento.....	31
Figura 21: Soporte N-4.....	32
Figura 22: Soporte N-6.....	33
Figura 23: Diagrama tridimensional de línea en su configuración futura.....	34
Figura 24: Temperatura ambiente definida en CAESAR II.....	36
Figura 25: Parámetros operaciones definidos en CAESAR II.....	36
Figura 26: Modelamiento de codo en CAESAR II.....	38
Figura 27: Modelo de línea de tubería existente.....	40
Figura 28: Modelo de configuración futura de la línea.....	41
Figura 29: Detalle de modificaciones en CAESAR II.....	42
Figura 30: Soportes línea vertical en CAESAR II.....	43
Figura 31: Comparación esfuerzos caso de carga 1.....	46
Figura 32: Comparación esfuerzos caso de carga 2.....	47
Figura 33: Comparación esfuerzos caso de carga 3.....	48
Figura 34: Comparación esfuerzos caso de carga 4.....	49
Figura 35: Comparación esfuerzos caso de carga 5.....	50
Figura 36: Comparativa caso 1 configuración existente v/s futura.....	51

Figura 37: Comparativa caso 2 configuración existente v/s futura.....	52
Figura 38: Comparativa caso 3 configuración existente v/s futura.....	52
Figura 39: Comparativo caso 4 configuración existente v/s futura.....	53
Figura 40: Comparativo caso 5 configuración existente v/s futura.....	54
Figura 41: Resumen casos para configuración actual.....	55
Figura 42: Resumen casos de carga configuración futura.....	56
Figura 43: Diagrama de Bloques de plantas en ENAP Bío Bío (Archivo tecnico ENAP).....	61
Figura 44: Resultados PI System E-100A.....	62
Figura 45: Resultado PI System Convertidor.....	62
Figura 46: Refinería ENAP refinería Bío Bío (Earth, 2023).....	63
Figura 47: Diagrama de Cracking Catalítico.....	65
Figura 48: Unidad FCC configuración Stacked de UOP (Sadeghbeigi, 2012).....	66
Figura 49: Diagrama simplificado planta FCCU con temperaturas de diseño.....	68
Figura 50: Isométrico 1.....	69
Figura 51: Isométrico 2.....	70
Figura 52: Plano Torre E-100A.....	71
Figura 53: Plano del Convertidor.....	72
Figura 54: Plano soporte SE-001.....	73
Figura 55: Plano soporte SE-002.....	74
Figura 56: Plano soporte SE-003.....	75
Figura 57: Plano soporte SE-004.....	76
Figura 58: Plano soporte ST-001.....	77
Figura 59: Plano soportes E-3, E-4 y E-5.....	78
Figura 60: Esfuerzos máximos caso 1 configuración actual.....	81
Figura 61: Esfuerzos máximos caso 1 configuración actual (grafica).....	82
Figura 62: Esfuerzos máximos caso 2 configuración actual.....	83
Figura 63: Esfuerzos máximos caso 2 configuración actual (grafica).....	83
Figura 64: Esfuerzos máximos caso 3 configuración actual.....	84
Figura 65: Esfuerzos máximos caso 3 configuración actual (grafica).....	84
Figura 66: Esfuerzos máximos caso 4 configuración actual.....	85
Figura 67: Esfuerzos máximos caso 4 configuración actual (grafica).....	86
Figura 68: Esfuerzos máximos caso 5 configuración actual.....	87
Figura 69: Esfuerzos máximos caso 5 configuración actual (grafica).....	87
Figura 70: Esfuerzos máximos caso 1 configuración futura.....	89
Figura 71: Esfuerzos máximos caso 1 configuración futura (grafica).....	89
Figura 72: Esfuerzos máximos caso 2 configuración futura.....	91
Figura 73: Esfuerzos máximos caso 2 configuración futura (grafica).....	91
Figura 74: Esfuerzos máximos caso 3 configuración futura.....	93
Figura 75: Esfuerzos máximos caso 3 configuración futura (grafica).....	93
Figura 76: Esfuerzos máximos caso 4 configuración futura.....	95
Figura 77: Esfuerzos máximos caso 4 configuración futura (grafica).....	95

Figura 78: Esfuerzos máximos caso 5 configuración futura.	97
Figura 79: Esfuerzos máximos caso 5 configuración futura (grafica).	97
Figura 80: Esfuerzos boquilla reactor D-101 configuración existente.....	99
Figura 81: Esfuerzos boquilla reactor D-101 configuración futuro.	99
Figura 82: Esfuerzo boquilla torre E-100A configuración actual.	100
Figura 83: Esfuerzo boquilla torre E-100A configuración futuro.....	100

Glosario

PI System	:	Programa utilizado para el monitoreo y registro de datos en tiempo real.
NCH2369	:	Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
ASCE 7	:	Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.
ASME	:	American Society of Mechanical Engineers.
ENAP	:	Empresa Nacional del Petróleo.
TAG	:	Etiqueta para identificar los equipos y componentes.
Hidrocarburo	:	Compuestos orgánicos formados por átomos de carbono e hidrógeno.
FCCU	:	Fluidized catalytic cracking unit.
Gap	:	Espacio entre la tubería y el soporte o guía.
UdeC	:	Universidad de Concepción

Símbolos

D	:	Diámetro exterior de la tubería
d	:	Diámetro interior de la tubería
S_L	:	Esfuerzo sostenido
S_a	:	Rango de tensión axial debido a deformaciones por desplazamiento
i_a	:	Factor de intensificación de esfuerzos axiales
S_t	:	Esfuerzo por torsión
M_t	:	Momento torsional
S_b	:	Esfuerzo por flexión resultante
S_h	:	Esfuerzo admisible a la máxima temperatura del metal
i_i	:	Factor de Intensificación de Esfuerzos (plano interno)
i_o	:	Factor de Intensificación de Esfuerzos (plano externo)
M_i	:	Momento flector en el plano
M_o	:	Momento flector fuera del plano
r_2	:	Radio medio del área transversal del ramal o reducción
T_s	:	Espesor de pared efectivo del ramal
T_h	:	Espesor de la tubería del cabezal
T_b	:	Espesor de la tubería del ramal
M_t	:	Momento torsional
Z	:	Módulo de sección de tubería
A_p	:	Sección transversal de la tubería,
F_a	:	Fuerza longitudinal por cargas sostenidas, p. ej., presión y peso
I_a	:	Índice de fuerza longitudinal sostenida.
f	:	Factor de reducción de esfuerzos (por efectos cíclicos)
$S_{fluencia}$:	Esfuerzo de fluencia
S_{ul}	:	Esfuerzo a la ruptura

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

La producción de energía ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo humano, mejorando el bienestar y la esperanza de vida de las personas. En esta tarea, los combustibles derivados del petróleo contribuyen aproximadamente con un tercio del suministro total de energía a nivel mundial, utilizándose no solo en el sector del transporte, como la gasolina, el diésel y el combustible de aviación, sino también en aplicaciones de calefacción (Sadeghbeigi, 2012).

En Chile, el consumo final de energía, representado por la matriz de energía secundaria, alcanzó las 301.629 Teracalorías en 2019, y destaca que los derivados del petróleo constituyen el componente principal, reuniendo el 58% del total (Gobierno de Chile, 2019). Esto se puede ver gráficamente en la Figura 1.

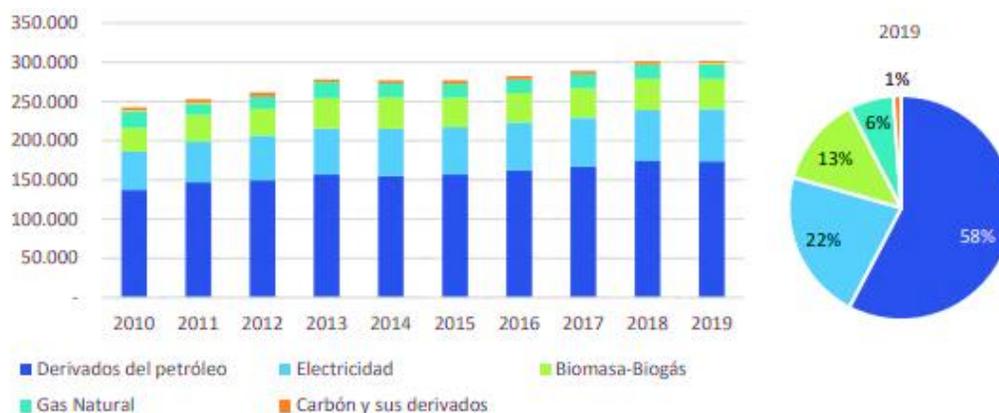


Figura 1: Matriz energética secundaria (Gobierno de Chile, 2019).

El petróleo crudo que se extrae y se procesa de los pozos es un recurso a base de carbono y es una mezcla compleja de compuestos de hidrocarburos, generalmente con cantidades menores de compuestos que contienen nitrógeno, oxígeno y azufre que varían mucho en cuanto a clase y proporción.

La refinación del petróleo crudo implica transformar esta materia prima en hidrocarburos más livianos, que tienen mayor valor agregado de comercialización y que son demandados como combustibles. De esta manera, el proceso de refinación permite producir las distintas variedades de productos que se crean para el consumo humano.

En Chile, ENAP Refinerías es la empresa responsable de la refinación. Fue fundada en 2004 como resultado de la fusión de las refinerías de Concón y Petrox, ubicadas en las regiones de Valparaíso y Biobío, respectivamente.

Actualmente, ENAP Refinerías opera tres instalaciones: Aconcagua, Bío Bío y Gregorio, con una capacidad de destilación de 220.000 barriles por día, capaces de abastecer más del 80% de los requerimientos de combustibles en Chile. Esta filial exporta parte de su producción a Perú y destaca por la alta calidad de sus combustibles, cumpliendo con los estándares más exigentes a nivel mundial (ENAP, www.ena.cl, 2020).

Por su parte, ENAP Refinería Bío Bío tiene una capacidad de destilación de 116.000 barriles/día. Las principales plantas de procesamiento de crudos y cargas complementarias se pueden ver en el diagrama de bloques del Anexo B1.

El proyecto en cuestión se enfoca en la planta de Cracking Catalítico Fluidizado (FCCU) de ENAP Refinería Bío Bío. La FCCU es una instalación especializada en el procesamiento de hidrocarburos de alto peso molecular con un punto de ebullición superior a los 350°C. Esta sección utiliza un catalizador para romper los enlaces de las largas cadenas de carbono, generando hidrocarburos de menor peso molecular y mayor valor agregado a una temperatura cercana a los 500°C. El producto principal de la reacción es la gasolina, que tiene un rendimiento volumétrico aproximado del 45% (Leprince, 2001). Para obtener una comprensión más detallada sobre ENAP y el funcionamiento del FCCU, se encuentra información en el Anexo C1.

1.2 Descripción del problema

En la Refinería Bío Bío de ENAP, se ha planteado una propuesta para independizar la torre E-100A respecto al reactor D-101 en la planta de cracking catalítico. Esta propuesta consiste en la instalación de una válvula de cuchilla de aislamiento en la línea 30" P5009-FCAA, como se muestra en la Figura 2 que representa tanto la planta como la línea de tubería.



Figura 2: Línea 30" P5009-FCAA (Planta cracking catalítico).

Actualmente, cuando se detiene la planta para realizar labores de mantenimiento, se requiere la instalación de una paleta de 30" en la línea de tubería para aislar la torre E-100A. Este trabajo conlleva un alto riesgo y requiere la presencia de personal de brigada especializado en respuesta a emergencias.

La incorporación de la válvula en la línea de tubería ofrece varias ventajas en comparación con el procedimiento actual. A continuación, se detallan estas ventajas:

1. Da una mayor seguridad a la maniobra, por lo que no se necesita la presencia de personal de brigada.
2. Disminuye significativamente el tiempo asociado a los trabajos de paro de planta de cracking catalítico, lo que conlleva a minimizar considerablemente las pérdidas económicas debido a tiempos de no producción.
3. Durante un paro de unidad FCC no se necesita enfriar para poder aislar la torre.

La posición de la paleta se encuentra en la línea 30" P5009-FCAA, justo en la entrada de la torre E-100A, tal como se indica en la Figura 3.

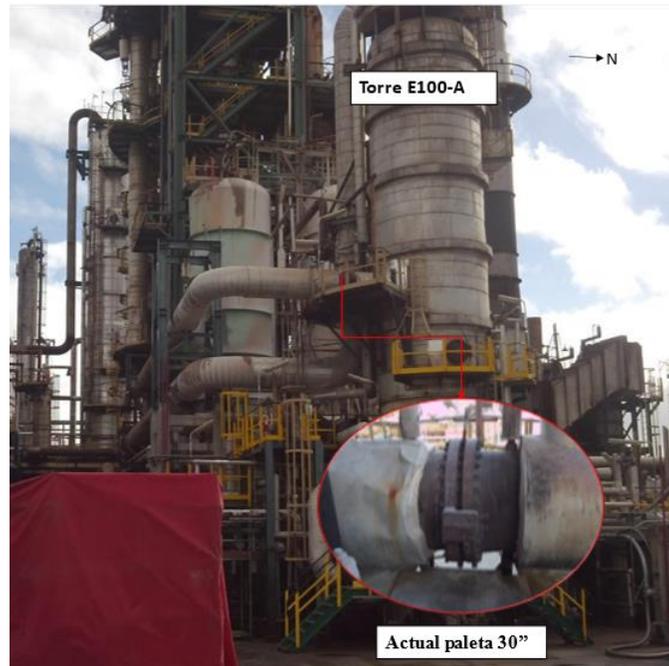


Figura 3: Posición de la paleta de 30".

1.3 Antecedentes

El proyecto de independización de la torre E-100A se inició en 2016 y los antecedentes se presentan a continuación. En primer lugar, se llevó a cabo la ingeniería conceptual en el mismo año, donde se consideraron dos opciones para la ubicación e instalación de la válvula de aislamiento en la línea de tubería:

1. La primera opción es montar la válvula entre la brida de conexión y la torre E-100 A (misma posición en que se instala la paleta de 30"), la ventaja de esta opción es que no se debe modificar la línea. Por otro lado, las desventajas a tener en cuenta es que el espacio disponible en la línea es mínimo, además en el piso no hay espacio suficiente de construir una estructura que soporte las 8 toneladas que pesa la válvula.
2. La segunda opción plantea montar la válvula cerca de la estructura vertical existente, que se ilustra en la Figura 4 y se encuentra a 8 metros de la torre E-100A en dirección al reactor D-101. Esta opción permite modificar la estructura para la instalación de la válvula, ya que había suficiente espacio tanto en el piso como verticalmente. Además, se podía utilizar la misma estructura para soportar las nuevas plataformas necesarias para acceder al accionamiento de la

válvula. Sin embargo, la principal desventaja es la necesidad de mover algunas líneas de tuberías que quedarían aguas arriba del conjunto válvula-brida. A pesar de esta modificación requerida, se consideró factible de realizar.

En ese momento, los ingenieros a cargo llegaron a la conclusión de que la segunda opción era la más viable desde el punto de vista técnico. Por lo tanto, se solicitó el desarrollo de la ingeniería básica y de detalle para esta opción.



Figura 4: Estructura existente.

En julio de 2017, se adquirió la válvula de guillotina que fue vendida por Zimmermann & Jansen, Inc. (IMI Z&J).

El mismo año la primera empresa de ingeniería se adjudicó la licitación que realizó ENAP con el objetivo de ejecutar la ingeniería básica (IB) y la ingeniería de detalle (ID).

Durante el desarrollo de la ingeniería de detalle, se realizó el primer análisis de esfuerzos y flexibilidad de la línea 30" P5009-FCAA. Sin embargo, se consideró insuficiente para examinar la interacción entre las estructuras existentes y las proyectadas para soportar la válvula.

En consecuencia, en 2018, una segunda empresa de ingeniería asociada al proyecto de la válvula llevó a cabo un análisis de resistencia estructural basado en la ID del primer estudio, utilizando el programa SAMCEF, para cumplir con la norma sísmica chilena NCh2369 y los estados de carga. Se determinó que la nueva ingeniería no cumplía con la norma NCh2369 debido a que las solicitudes de esfuerzo no cumplían con los valores admisibles.

Debido a esto, en el año 2019, ENAP solicitó a la segunda empresa de ingeniería determinar la factibilidad técnica de realizar cambios en la rigidez de la línea 30" P5009-FCAA y otras modificaciones necesarias para cumplir con la norma sísmica chilena.

Tras el estudio, se llegó a la conclusión de que es factible realizar la instalación de la válvula de independización, considerando la nueva ingeniería desarrollada previamente e incorporando las modificaciones recomendadas en el estudio. Estas mejoras se analizarán con mayor detalle más adelante, junto con las consideraciones correspondientes para incorporarlas al modelo.

Es importante mencionar que en el trabajo realizado por la segunda empresa de ingeniería, se entregaron los resultados pertinentes obtenidos mediante el programa SAMCEF. Sin embargo, ENAP también necesita contar con el modelo de la línea de tubería en el programa CAESAR II para tener la opción de realizar modificaciones estructurales en el software.

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es crear un modelo detallado de la línea de tubería 30" P5009-FCAA y realizar un análisis de esfuerzos mediante el software CAESAR II. El desarrollo de un modelo detallado ayudará a mejorar el proyecto en caso de que ENAP determine la necesidad de introducir ciertas modificaciones durante la etapa de ejecución en el terreno.

Con el fin de alcanzar este objetivo, se utilizará la licencia del software CAESAR II que ENAP posee. Esta herramienta es ampliamente utilizada en la industria para el análisis de esfuerzos en tuberías, y permite realizar simulaciones precisas y detalladas de las líneas de tubería por parte de ENAP. El uso de este software brinda la capacidad de modelar y evaluar diferentes escenarios.

Es crucial señalar que el modelo a desarrollar se basará en los trabajos previos las empresas de ingeniería. Al aprovechar los conocimientos y la experiencia previa de estas empresas, se podrán evitar posibles errores o inconsistencias en el modelo y en el análisis de esfuerzo.

Cabe destacar que el trabajo se llevará a cabo utilizando un nombre genérico, “empresas de ingeniería”, para hacer referencia a las dos compañías involucradas en el proyecto.

1.4 Objetivos

Objetivo general

OG1. Realizar el Modelamiento y analizar los esfuerzos de la línea 30'' P5009-FCAA en ENAP Refinería Bío Bío.

Objetivos específicos

Con el fin de cumplir con el objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

OE1. Realizar descripción y levantamiento de información del sistema para así obtener un modelo realista de la línea 30'' P5009-FCAA.

OE2. Revisar de la ingeniería básica y de detalle para instalar la válvula hechas por las empresas de ingeniería asociadas al proyecto.

OE3. Implementar el modelo en el software CAESAR II.

OE4. Realizar un análisis de esfuerzo de la línea 30'' P5009-FCAA.

1.5 Condiciones de diseño

El estudio del problema se llevará a cabo considerando las condiciones de operación y diseño establecidas en la Tabla 1. Es importante destacar que, dado que las condiciones de diseño son más exigentes que las de operación, este caso cubrirá también la evaluación de esta última. Esto permitirá tener una visión completa de la respuesta de la línea ante escenarios extremos y garantizar un diseño seguro.

Tabla 1: Condiciones de operación de la línea de tubería.

	Condiciones de operación	Condiciones de diseño
Fluido	Gas efluente del reactor con finos de catalizador	-
Densidad del fluido	$0,00011 \frac{lb}{in^3}$ ($3,127 \frac{kg}{m^3}$)	-
Presión de proceso	25,6 <i>psi</i> (0,041 MPa)	45,83 <i>psi</i> (0,57 MPa)
Temperatura de proceso	984 °F (529 °C)	1.025 °F (552 °C)
Temperatura de ambiente	70 °F (21°C)	-
Caudal de gas normal	$149,454 \frac{kg}{h}$	-
Peso molecular del vapor	73,95	-
Compresibilidad del vapor	0,9971	-

Realizando el modelo y el análisis de esfuerzo de la línea de tubería 30'' P5009-FCAA en CAESAR II y luego, obteniendo la resistencia de dicha línea, es posible agregar la válvula de aislamiento.

1.6 Metodología

La metodología de este trabajo se compone de varias etapas. En primer lugar, se lleva a cabo una búsqueda y recopilación de información sobre ENAP Región del Bío Bío, el proceso de refinación y las distintas plantas involucradas en la refinación del petróleo crudo para obtener productos de mayor valor. Se presta especial atención al proceso de cracking catalítico, ya que la línea de tubería se encuentra en esta planta.

A continuación, se reúnen antecedentes del proyecto, incluyendo las contribuciones proporcionadas por las empresas de ingeniería. Estos antecedentes proporcionan una visión más clara de lo que se ha realizado previamente en el proyecto y ayudan a establecer una base para el análisis.

Además, se recopila toda la información necesaria para llevar a cabo el proyecto. Esta información proviene de diversas fuentes, como textos especializados, tesis de grado, páginas web, estándares y entrevistas informales con el personal del área. Se registra detalladamente información sobre la tubería, sus accesorios, soportes, conexiones con los equipos involucrados y las variables importantes para el análisis de esfuerzo.

Posteriormente, se procedió a modelar la configuración futura de la tubería, integrando todas las modificaciones propuestas por fuentes externas. Este paso se realizó con el fin de facilitar un análisis

comparativo junto a los resultados ofrecidos por la segunda empresa de ingeniería asociada al proyecto. Ambos análisis utilizan los mismos casos de carga y condiciones límite, persiguiendo así la meta de analizar y comprender las variaciones identificadas.

A continuación, el estudio se fragmentó en dos fases esenciales. Inicialmente, se estableció el modelo correspondiente a la configuración actual de la tubería. Posteriormente, se empleó el modelo que refleja la configuración futura previamente mencionada y se hace un contraste en los esfuerzos generados en las dos configuraciones. Ambos modelos incorporaron la temperatura real de diseño del regenerador obtenida mediante el programa PI System.

Es crucial subrayar que para aprovechar eficazmente el programa, se requiere una comprensión sólida de los cálculos generados, las regulaciones empleadas y los distintos componentes que conforman un sistema de tuberías.

En la Figura 5 se presenta un diagrama de flujo con la metodología propuesta.

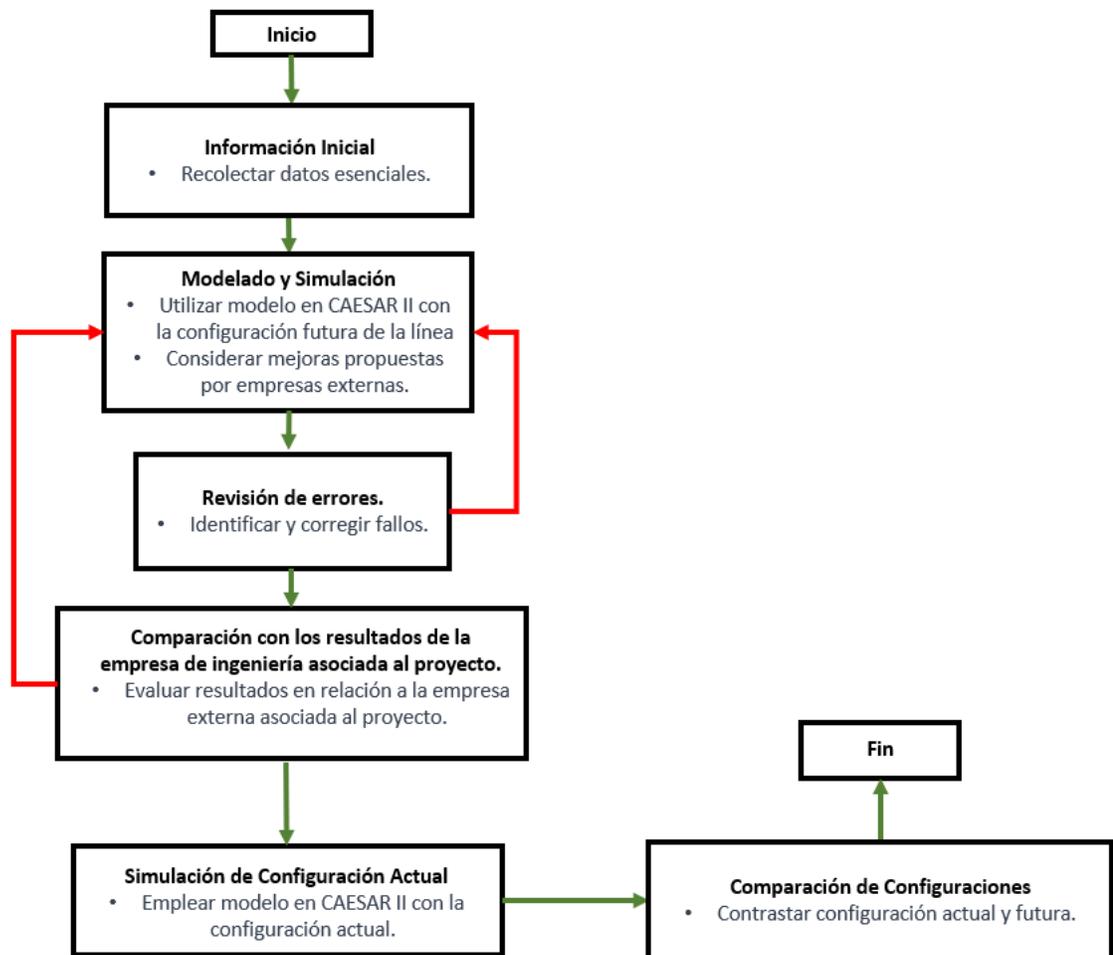


Figura 5: Diagrama de flujo de metodología.

CAPÍTULO 2: Marco teórico

2.1 Definiciones básicas

Las definiciones a continuación están específicamente formuladas para aplicarse a tuberías y para relacionarse con el código B31.3. Todas las mediciones se llevarán a cabo en el sistema de unidades estadounidense.

2.1.1 Momento de inercia (I)

El momento de inercia (I) es una propiedad crucial que describe la resistencia de una sección de tubería al giro en torno a un eje diametral, y está directamente relacionado con la geometría y el tamaño de la tubería, como se indica en la ecuación 1.

$$I = 0,0491 \cdot (D^4 - d^4) \quad [lb \cdot ft^2] \quad (1)$$

Donde D es el diámetro externo y d es el diámetro interno de la tubería. El momento de inercia refleja cómo se distribuye la masa y cómo están dispuestos los materiales en la sección transversal de la tubería. Un momento de inercia mayor indica una mayor rigidez y resistencia al giro, lo que significa que la tubería tiene una capacidad mejorada para mantener su forma bajo cargas de torsión. Por otro lado, un momento de inercia menor implica una mayor facilidad de deformación, lo que puede llevar a cambios significativos en la forma de la tubería en respuesta a las cargas de torsión (Hibbeler, s.f).

2.1.2 Módulo de elasticidad (E)

Conocido también como módulo de Young, el módulo de elasticidad es un factor que indica la rigidez de un material de tubería. A mayor módulo de elasticidad, mayor rigidez tendrá el material. El módulo de elasticidad decrece conforme incrementa su temperatura. Para el caso de análisis de esfuerzo y flexibilidad de tuberías es importante ya que se analiza la modificación del material (propiedades y geometría) generados por la variación de temperatura. Los valores para este parámetro están en la tabla C-6 del apéndice C según código ASME B31.3 (The American Society of Mechanical Engineers, 2014).

2.1.3 Desplazamiento térmico

El movimiento térmico es una forma en la que un objeto puede someterse a esfuerzos. Esto se presenta cuando la temperatura de un objeto cambia y su movimiento se restringe de alguna manera. Las variaciones en la longitud se pueden calcular utilizando la ecuación 2.

$$\delta_T = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad [in] \quad (2)$$

En esta ecuación, δ_T representa el cambio en longitud causado por la variación de temperatura, α es el coeficiente de expansión térmica, L es la longitud original y ΔT es la variación de temperatura (en este contexto, $T_{Diseño\ maxima} - T_{ambiente}$).

2.1.4 Coeficiente de expansión térmica (α)

El coeficiente de expansión térmica es un factor que relaciona unidades longitudinales por deformación y por variación de temperatura. Para tuberías, los valores de este coeficiente se encuentran en el apéndice C, tabla C-1 del código ASME B31.3 (The American Society of Mechanical Engineers, 2014).

2.1.5 Factor de flexibilidad (k) y Factor de reducción de rangos de esfuerzos (f)

El factor de flexibilidad es una propiedad neta de los accesorios en los sistemas de tuberías (tee's y codos). En el caso de los codos, al ser sometida a una fuerza se deformará más que una tubería recta. Este fenómeno se basa en el hecho de que al ser sometido a flexión ocurre una ovalización del área transversal acercando las fibras más externas al eje neutro, reduciendo el momento de inercia (incremento de la flexibilidad).

El código ASME B31.3 define a k en la tabla D300 del apéndice D como se muestra en la Figura 6.

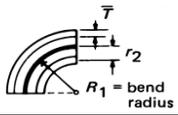
Description	Flexibility Factor, k	Stress Intensification Factor [Notes (1), (2)]		Flexibility Characteristic, h	Sketch
		Out-of-Plane, I_o	In-Plane, I_i		
Welding elbow or pipe bend [Notes (1), (3)-(6)]	$\frac{1.65}{h}$	$\frac{0.75}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_2^2}$	

Figura 6: Factor de flexibilidad e intensificación de esfuerzos de un codo (The American Society of Mechanical Engineers, 2014).

Como se indicó en el punto anterior, los accesorios ocasionan efectos de comportamiento diferentes que con los tramos de tubería recta, es así que se usa un factor de intensificación de esfuerzos (i) para corregir dicha variación.

Por otro lado, el factor de reducción de rangos de esfuerzos (f) es un factor que depende de la cantidad de ciclos de cambio de temperatura durante la vida de operación del sistema. La Figura 7 muestra la forma de determinar este factor (The American Society of Mechanical Engineers, 2014).

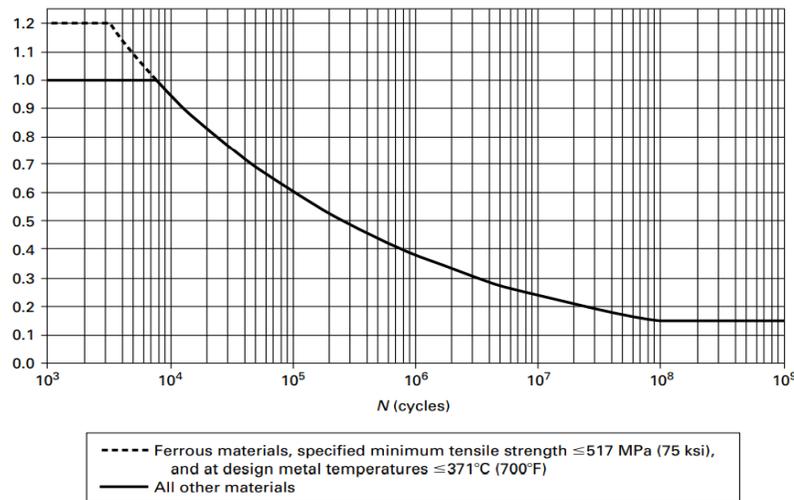


Figura 7: Factor de intervalo de esfuerzo, f .

2.1.6 Rigidez y flexibilidad

En el contexto del análisis de esfuerzo en tuberías, la flexibilidad y rigidez se refieren a cómo la tubería responde a las cargas externas.

La flexibilidad es la capacidad de la tubería para deformarse o doblarse bajo la presión del fluido transportado, los movimientos térmicos o las cargas externas aplicadas. Una tubería flexible puede adaptarse a estos cambios sin sufrir daños, lo cual es beneficioso para absorber vibraciones, compensar las variaciones térmicas y permitir ajustes en la posición de la tubería.

Por otro lado, la rigidez se refiere a la resistencia de la tubería a deformarse o doblarse bajo las mismas cargas. Una tubería rígida tiene poca o ninguna flexibilidad y mantiene su forma original. La rigidez es importante cuando se necesita mantener una alineación precisa y evitar movimientos no deseados.

En el análisis de esfuerzo en tuberías, tanto la flexibilidad como la rigidez son consideraciones clave. La flexibilidad ayuda a reducir los esfuerzos y tensiones en la tubería, mientras que la rigidez es necesaria para mantener la integridad estructural y evitar movimientos no deseados.

Para evaluar la flexibilidad y rigidez de una tubería, se tienen en cuenta factores como el material, el diámetro, el espesor de la pared, el tipo de soporte y las cargas aplicadas. El análisis de esfuerzo en tuberías utiliza técnicas como el modelado de elementos finitos para calcular los esfuerzos y deformaciones en diferentes condiciones de carga, asegurando así un funcionamiento seguro del sistema de tuberías.

2.1.7 Temperatura y presión de diseño

Al evaluar la tubería bajo las condiciones de diseño, se asegura que los materiales utilizados y las especificaciones de la tubería sean adecuados para soportar estas situaciones límite. Esto incluye considerar la temperatura y presión máximas previstas en el diseño para asegurar que la tubería pueda resistir las condiciones más severas sin comprometer su integridad. Además, al analizar con la temperatura de diseño, se toman en cuenta los efectos de la expansión térmica, que pueden generar tensiones y desplazamientos importantes en la tubería.

Por otro lado, las condiciones de operación pueden variar y, en muchos casos, ser menos extremas que las de diseño. Analizar la tubería solo en función de las condiciones de operación podría subestimar las tensiones y deformaciones que pueden ocurrir en situaciones de máxima exigencia.

2.2 Análisis de Esfuerzo de un sistema de tuberías

Las tuberías representan entre el 25% y 35% del material utilizado en una planta de proceso, requieren del 30% al 40% de la mano de obra en el montaje y consumen entre un 40% y 48% de las horas de ingeniería. Sin embargo, su verdadera importancia puede superar ampliamente estos porcentajes. Un sistema de tuberías está compuesto por numerosos componentes, y la falla de un solo elemento podría ocasionar el cierre de toda la planta o, peor aún, causar graves problemas de seguridad pública (Peng, 2009). Por consiguiente, la seguridad es prioritaria, ya que la presencia de trabajadores implica la necesidad de minimizar los riesgos en cualquier eventualidad. Por tanto, es crucial analizar los escenarios más adversos para controlar cualquier peligro.

El análisis de esfuerzo en las líneas de tubería es fundamental para poder controlar posibles peligros. Este análisis tiene como objetivo verificar los esfuerzos, fuerzas y momentos resultantes en las tuberías y sus conexiones con equipos, soportes y uniones bridadas, para asegurar que cumplan con los parámetros admisibles establecidos en las normativas de diseño. De esta manera, se garantiza el correcto funcionamiento de los sistemas de tuberías ante las cargas internas y externas a las que están expuestas.

En general, el propósito del análisis de esfuerzo de tuberías se puede resumir en dos amplias categorías: asegurar la integridad estructural y mantener la operabilidad del sistema.

2.3 Cargas Solicitantes

Las cargas son fuerzas, momentos, cambios de presión, cambios de temperatura, gradientes térmicos o cualquier otro parámetro que afecta el estado de esfuerzos. Las cargas que afectan al sistema de tubería pueden ser clasificadas como cargas estáticas y dinámica.

2.3.1 Cargas estáticas

Las cargas estáticas que deben considerarse en el diseño de tuberías son las siguientes:

- **Peso propio (tubería, accesorios, aislación, contenido):** se refiere al peso de los componentes de la tubería, como tuberías, accesorios, aislamientos y el contenido que transportan. Este peso ejerce una fuerza hacia abajo debido a la gravedad.
- **Presión (Interna y Externa):** la presión interna y externa influye en el diseño. La presión interna puede requerir un mayor espesor de pared para resistir fuerzas adicionales. La presión externa también debe considerarse para garantizar la resistencia de la tubería frente a condiciones externas.
- **Expansión y contracción térmica restringida:** las variaciones de temperatura pueden causar expansiones y contracciones térmicas en las tuberías, generando tensiones y deformaciones. Los loops de tubería y las juntas de expansión se utilizan para absorber estos cambios dimensionales.
- **Loop de tubería:** se utilizan para contrarrestar expansiones térmicas en líneas pequeñas, aunque pueden ser más complejos y costosos en diámetros grandes.
- **Juntas de expansión:** permiten el movimiento y la expansión térmica, previniendo tensiones acumuladas y daños en las tuberías.
- **Efectos de soporte, anclaje y movimientos terminales:** los sistemas de tuberías requieren sistemas de soporte para funcionar adecuadamente. Si los puntos de apoyo cambian, como desplazamientos en anclajes o equipos, la tubería experimentará cambios en sus esfuerzos debido al movimiento relativo.

2.3.2 Cargas dinámicas

Las cargas dinámicas que pueden evaluarse son:

1. Fuerza de impacto.
2. Cargas sísmicas.
3. Viento.

4. Vibración.
5. Cargas de descarga.

En este análisis, se recomienda llevar a cabo un estudio sísmico, en conformidad con las normas NCh2369 y ASCE 7. A continuación, se describe la carga sísmica con el fin de proporcionar los conceptos necesarios para el análisis.

2.3.3 Carga sísmica

Existen dos enfoques principales utilizados comúnmente para el diseño sísmico de sistemas de tuberías: el método del coeficiente estático y el método de análisis modal del espectro de respuesta. Cada uno de estos métodos ofrece distintas ventajas y precisiones en sus resultados.

El primer enfoque es el método del coeficiente estático, que se encuentra en los estándares internacionales de diseño sísmico. Este método simplificado implica aplicar una carga estática equivalente al sistema de tuberías para modelar su respuesta sísmica. Aunque esta aproximación ignora la respuesta del sistema a diferentes frecuencias y tasas de amortiguamiento, permite calcular desplazamientos y fuerzas utilizando una única fuerza de aceleración estática equivalente en las direcciones principales (X, Y y Z) de los movimientos sísmicos. Esta carga estática se relaciona directamente con el peso del elemento y se expresa en términos de la constante de aceleración gravitatoria, "g". Por ejemplo, si se modela un terremoto con una carga de 0,35 g en una dirección específica, se aplica una carga uniforme equivalente a 0,35 veces el peso del sistema en esa dirección.

El segundo enfoque, conocido como el método de análisis modal del espectro de respuesta, implica obtener la forma de onda aleatoria esperada de aceleración en función del tiempo causada por el terremoto, representada en un espectro de respuesta. Luego, se realiza un análisis de espectro que estima la respuesta máxima del sistema de tuberías durante la carga transitoria del terremoto. La respuesta depende de los modos de frecuencia natural del sistema y su cantidad. Un sistema con múltiples frecuencias naturales reaccionará de manera diferente a uno con una frecuencia natural más alta, que generalmente implica una mayor rigidez.

En el contexto de Chile, se rige por la norma NCh 2369 "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales". Esta norma establece los requisitos para el diseño sísmico de diversas estructuras industriales, incluyendo sistemas de tuberías, equipos de procesos y anclajes.

Siguiendo esta normativa, las estructuras deben ser analizadas para la acción sísmica en al menos dos direcciones horizontales aproximadamente perpendiculares. Se considera la posibilidad de que los efectos producidos por las componentes horizontales de la acción sísmica no sean concurrentes, lo que permite estudiar los elementos del sistema de tuberías para el sismo actuando en cada dirección de análisis por separado.

Conforme a lo determinado en el punto 5.1.1 de la norma NCh2369, se establece que el sismo vertical debe tomarse en cuenta cuando las cargas permanentes, como el peso propio y el peso del producto, superen el 75% de las cargas totales sobre los equipos evaluados. Aunque el informe de la empresa de ingeniería asociada al proyecto determina que las cargas permanentes representan menos del 75% de las cargas totales, en este trabajo se realizará una verificación adicional (NCh2369-2003, 2003).

2.4 Esfuerzos solicitantes

En general, las cargas solicitantes generan los siguientes esfuerzos:

1. **S_L : Esfuerzo longitudinal** - Este esfuerzo tiende a romper la pared de la tubería a lo largo de una circunferencia.
2. **S_O : Esfuerzo circunferencial** - Tiende a romper la pared de la tubería a lo largo de la generatriz.
3. **S_R : Esfuerzo radial** - El valor de este esfuerzo es significativamente menor que los anteriores nombrados, razón por la cual se desprecia.
4. **τ_T : Esfuerzo de corte** - Su valor tiene una mayor importancia en relación con el momento torsor ocasionado por las dilataciones térmicas.

En la Figura 8 se pueden ver gráficamente los esfuerzos solicitantes en una tubería.

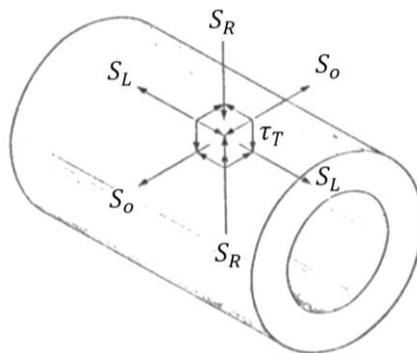


Figura 8: Esfuerzos solicitantes en una tubería.

2.5 Normativas aplicables a los sistemas de tuberías

En el contexto de las regulaciones y normativas aplicables, es importante mencionar que ENAP se rige por el Decreto 160, el cual establece normas para la construcción e instalación de redes de tuberías. De acuerdo con el artículo 118 de dicho decreto, se establece que las redes de tuberías deben

ser construidas e instaladas de acuerdo con una norma nacional. En caso de que no exista una norma nacional específica, se deben seguir las normas extranjeras, como la norma ASME B 31.3, conocida como "Process Piping", que establece los requisitos para el diseño, construcción y operación segura de sistemas de tuberías en la industria.

2.5.1 ASME B31.3

La norma ASME B31.3 establece los requisitos para el diseño, fabricación, inspección, prueba y operación segura de tuberías y sistemas de tuberías utilizados en la industria de procesamiento de hidrocarburos que transportan fluidos a diferentes temperaturas y presiones. Está basado en diversas teorías y principios de ingeniería, tales como la mecánica de materiales, la teoría de la elasticidad, la teoría de la plasticidad, la teoría de fallas y la ingeniería de materiales.

La aplicación de estas teorías y principios en el código ASME B31.3 tiene como objetivo principal garantizar la seguridad y la integridad de las tuberías en diferentes condiciones de operación. El código establece los criterios de diseño y los límites de esfuerzo permisibles para diferentes componentes de la tubería.

Además, dependiendo del tipo de modificación que se quiera realizar en la línea de tubería, se necesita cumplir con otras normas y estándares específicos de la industria, como la norma API 570 para inspección, evaluación y reparación de tuberías.

Cabe destacar que el código proporciona sólo un medio de guía al diseñador para analizar el diseño de un sistema de tuberías, proporcionando las ecuaciones simplificadas para determinar los niveles de esfuerzos, espesores de pared, o la selección adecuada de componentes y los criterios de aceptación para los casos de análisis de esfuerzo (The American Society of Mechanical Engineers, 2014).

Es relevante tener en cuenta que el ASME B31.3 se centra en el diseño de tuberías nuevas, mientras que la línea en estudio es una línea operativa. A pesar de esta diferencia, el ASME B31.3 puede utilizarse como una sólida base para el análisis en este contexto.

2.6 Esfuerzos según código ASME B31.3

En el código ASME B31.3, se definen tres categorías de esfuerzos: esfuerzos sostenidos, de expansión y ocasionales. Estos esfuerzos se tienen en cuenta al diseñar y evaluar la resistencia de las tuberías.

2.6.1 Esfuerzos admisibles

Los esfuerzos admisibles básicos se establecen en función de las propiedades de resistencia mecánica del material, determinadas a través de ensayos de tracción, en distintos niveles de temperatura, y se combinan con un factor global de seguridad. Estos valores de esfuerzos admisibles básicos están detallados en el Apéndice A, Tabla A-1, del código B31.3. Están definidos en función de la temperatura y se fundamentan en el límite de fluencia o la resistencia última del material (The American Society of Mechanical Engineers, 2014).

los esfuerzos admisibles están estrechamente relacionados con los límites de fluencia y la resistencia a la tracción del material. De esta manera, el esfuerzo admisible se presenta como un margen de seguridad que asegura el comportamiento estructural adecuado de las tuberías frente a las condiciones operativas y la fortaleza del material utilizado.

El esfuerzo admisible para un material a la condición fría se denota como S_c , que incluye a los sistemas de piping para servicios criogénicos, o la temperatura ambiente de instalación para tuberías destinadas a servicios de alta temperatura.

Por otro lado, el esfuerzo admisible para un material a la condición de operación caliente se denota como S_h , que puede ser la temperatura de diseño para sistemas que operen a alta temperatura.

2.6.2 Esfuerzos sostenidos o primarios

Los esfuerzos sostenidos o primarios son aquellos que se generan en la dirección longitudinal de una tubería debido a cargas continuas tales como el peso de la tubería, el aislamiento, el fluido transportado, fuerzas (concentradas o distribuidas), momentos aplicados y presión. Estos esfuerzos se caracterizan por no ser autolimitantes, lo que significa que su acción continua puede provocar deformación plástica o incluso la falla inminente del material.

Según el código ASME B31.3, la suma de todas las componentes de los esfuerzos longitudinal (S_L) debido a presión, peso, y alguna otra carga sostenida no debe superar el esfuerzo admisible a la máxima temperatura del metal S_h (Ver 302.3.5 en ASME B31.3).

Los esfuerzos sostenidos se calculan según la ecuación 3:

$$S_L = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2 \cdot S_t)^2} \leq S_h \quad [psi] \quad (3)$$

Donde S_L es el esfuerzo sostenido, S_a es el rango de tensión axial, S_b es el esfuerzo por flexión resultante y S_t es el esfuerzo por torsión.

2.6.3 Esfuerzos por expansión o secundarios

Los esfuerzos de expansión o tensiones secundarias se generan en el sistema de tuberías debido al desplazamiento provocado por la expansión térmica, así como a las restricciones impuestas al material por guías, anclajes, soportes y otros elementos, cuando experimenta cambios de temperatura. Estas tensiones son cíclicas y se conocen como autolimitantes, ya que se alivian en un lapso determinado debido a la relajación térmica del material.

Es importante resaltar que la cantidad de ciclos que experimentan los sistemas de tuberías a lo largo de su vida útil puede ocasionar grietas por fatiga. Estas grietas pueden surgir por imperfecciones en la superficie o en el interior de las tuberías y, junto con la corrosión, pueden convertirse en puntos de concentración de tensiones, lo que provoca fallas en las tuberías.

También es relevante destacar que estas tensiones están presentes durante los arranques o paradas de la planta, y tienden a disminuir con el tiempo debido a la relajación del material.

Conforme al estándar ASME B31.3, el esfuerzo de expansión S_E se calcula mediante la ecuación 4:

$$S_E = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2 \cdot S_t)^2} \quad [psi] \quad (4)$$

Además, los esfuerzos resultantes S_b a usarse en la ecuación 4 para codos, curvas mitradas y conexiones a ramal de salida, deben de calcularse de acuerdo con la ecuación 5 con los momentos indicados en la Figura 9.

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2}}{Z} \quad [psi] \quad (5)$$

Donde M_i representa el momento flector en el plano, M_o es el momento flector fuera del plano y Z es el modulo de seccion de la tubería. El cálculo de Z se efectúa como se detalla en la ecuación 6. Es importante destacar que los valores de I y Z se encuentran tabulados para la mayoría de los tipos de tubos, disponibles en cualquier tabla de propiedades de tubería. En la ecuación 6, D representa el diámetro de la tubería.

$$Z = \frac{2 \cdot I}{D} \quad [in^3] \quad (6)$$

Para comprender la interpretación de los momentos (M) y los factores de intensificación de esfuerzos dentro del plano (subíndice i) y fuera del plano (subíndice o) necesarios para el cálculo de los esfuerzos debidos a los momentos flectores y torsores, es necesario referirse la Figura 9.

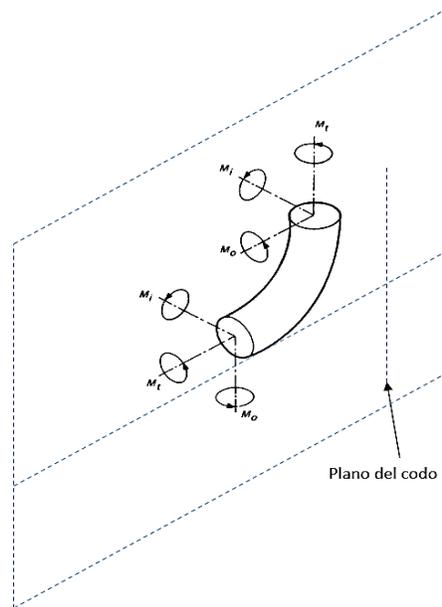


Figura 9: Momentos en codos.

Según el ASME B31.3 el esfuerzo de expansión S_E no puede superar a S_A , tal como se presenta en la ecuación 7.

$$S_E = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2 \cdot S_t)^2} \leq S_A \quad (7)$$

Donde S_a se refiere al esfuerzo axial efectivo, calculado de acuerdo con la ecuación 8.

$$S_a = I_a F_a / A_p \quad (8)$$

La ecuación 8 se emplea para determinar el esfuerzo axial efectivo S_a en un componente, donde I_a representa un factor de intensificación de esfuerzos para cargas axiales, F_a es la carga axial y A_p es el área del plano de la sección transversal del componente.

El cálculo del esfuerzo admisible por expansión S_A se calcula según ASME B31.3 y se expresa en la ecuación 9.

$$S_A = f \cdot (1,25 \cdot S_c + 0,25 \cdot S_h) \quad (9)$$

En caso de que S_h sea mayor que S_L , se aplica la ecuación 10.

$$S_A = f [1,25 \cdot (S_c + S_h) - S_L] \quad (10)$$

2.6.4 Esfuerzos ocasionales

Los esfuerzos ocasionales son cargas que se generan de forma eventual y pueden ser generadas por sismos, vientos, vibraciones por descargas de válvula de alivio, golpes de ariete y vibraciones por cualquier otro motivo. El código ASME B31.3 indica que estos esfuerzos ocasionales $S_{adm(ocas)}$ deben ser sumados a los esfuerzos producidos por las cargas sostenidas, y comparan estos esfuerzos totales con el esfuerzo admisible en caliente, con un incremento del 33% (este incremento varía según el código utilizado), tal como se ve en la ecuación 11.

$$S_{adm(ocas)} + S_L \leq 1,33 \cdot S_h \quad (11)$$

2.7 Elementos del sistema de soporte

En el diseño y construcción de sistemas de tuberías, es fundamental considerar los diferentes elementos de soporte y restricción que garantizan su estabilidad, seguridad y funcionamiento adecuado. Entre estos elementos se encuentran los anclajes, los soportes de apoyo simple, las guías, los spring hangers y los snubbers.

1. **Soporte de apoyo simple:** este soporte genera restricción en una sola dirección, por lo general en el eje vertical para aguantar pesos de cañerías, soportes de válvulas, bridas u otros elementos.
2. **Guías:** la guía impide que la tubería se mueva en la dirección lateral, por lo tanto, son usadas solo para permitir un movimiento longitudinal de las tuberías.
3. **Spring hanger:** es un tipo de soporte utilizado en sistemas de tuberías para proporcionar una suspensión ajustable y elástica. Consiste en un resorte helicoidal que se comprime o se estira para equilibrar las cargas estáticas y dinámicas de la tubería. El resorte del spring hanger puede ajustarse para proporcionar una fuerza de sustentación constante y opuesta a la carga aplicada, lo que permite la absorción de movimientos térmicos, la mitigación de cargas dinámicas y la reducción de los esfuerzos en la tubería y los puntos de anclaje.
4. **Snubber:** es un dispositivo que permite la deflexión de la tubería en condiciones normales de funcionamiento, pero cuando se somete a una carga de impulso, como un terremoto, un golpe de ariete, etc., el amortiguador se activa y actúa como una restricción rígida para restringir el movimiento de la tubería como resultado de la acción no deseada.

CAPITULO 3: Modelado de línea 30” P5009-FCAA

En este capítulo, se presentan en detalle los aspectos del sistema que se consideraron para el análisis, considerando las modificaciones realizadas por la empresa de ingeniería asociada al proyecto de la instalación de válvula. Además, se describen los pasos utilizados para generar el modelo de la tubería, los parámetros empleados y las consideraciones para la simulación en CAESAR II.

Para desarrollar este capítulo, se ha recurrido a diversos documentos que han proporcionado información relevante. Se estudian los P&ID respectivos para entender mejor el flujo del proceso en el sistema de tuberías. También se utilizan los isométricos que se pueden consultar en el Anexo D1.

Adicionalmente, se han empleado las especificaciones del proyecto, que abarcan desde los fundamentos y criterios de diseño hasta las especificaciones de materiales y tuberías, junto con los estándares de soportes, entre otros aspectos relevantes. También se ha llevado a cabo un análisis de los planos de los equipos involucrados, los cuales se encuentran documentados en el Anexo D2 del informe.

3.1 Componentes del sistema

El sistema de tuberías está conectado al reactor D-101 y a la torre fraccionadora E-100A. A continuación, se detallan los componentes clave que conforman este sistema, ofreciendo una visión integral de su estructura.

3.1.1 Reactor D-101, regenerador D-100, estructura soportante y torre E-100A

El sistema cuenta con varios componentes importantes, entre ellos el reactor D-101 y el regenerador D-100. El reactor D-101 tiene un diámetro interno de 138 pulgadas y está fabricado con el material SA-387 Gr 11. Por su parte, el regenerador D-100 tiene un diámetro interno de 216 pulgadas y está hecho de material SA-516 Gr 70.

La estructura soportante del sistema está compuesta por acero y hormigón, y se representa en condiciones ambientales.

En cuanto a la torre fraccionadora E-100A, esta tiene un diámetro interno de 130 pulgadas y está fabricada con acero SA-387 Gr 11 CL 2.

En Anexo C2 se presenta el diagrama simplificado de la planta FCCU, que incluye las temperaturas de diseño relevantes para el sistema y proporciona una representación visual de la distribución de los diferentes componentes y las temperaturas asociadas a cada etapa del proceso.

3.1.2 Tubería

La línea de tubería 30" P5009-FCAA tiene un diámetro de 30 pulgadas (NPS 30) y cumple con el estándar de Schedule STD. Está fabricada con el material ASTM A-691 Grado 1,25 Clase 22, el cual ha sido especialmente diseñado para resistir aplicaciones de alta presión y temperatura. Para garantizar un adecuado aislamiento, la tubería cuenta con una capa de silicato de calcio con un espesor de 5,5 pulgadas. Además, presenta un margen mecánico (c) de 0,11 pulgadas y una tolerancia de fabricación del 12,5%.

Las propiedades mecánicas detalladas de este material se encuentran especificadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de ASTM A-691 Grado 1,25 Clase 22.

Relación Poisson	0,292
Densidad del material	0,283 lb/in ³
Modulo elástico (70 °F)	2,97 * 10 ⁷ lb/in ³
Modulo elástico (1.025 °F)	2,33 * 10 ⁷ lb/in ³

La Figura 10, muestra los esfuerzos admisibles, de fluencia y de ruptura del material A-691 a distintas temperaturas.

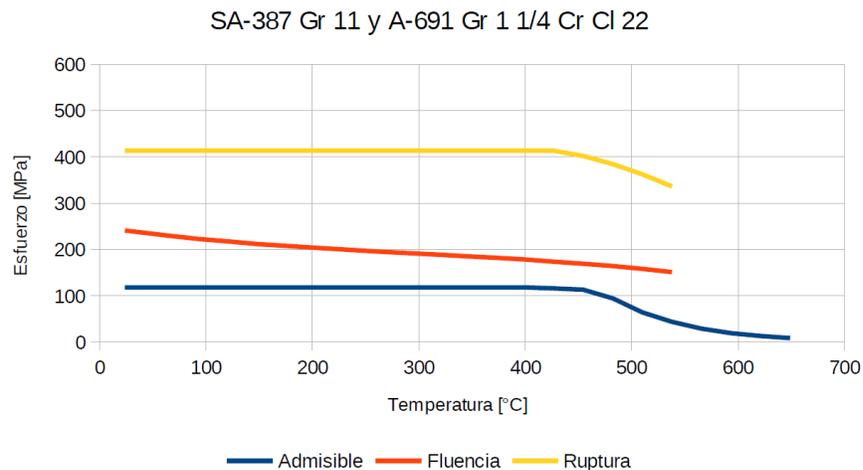


Figura 10: Esfuerzos admisibles, fluencia y ruptura para distintas temperaturas (Cadetech, SERVICIO ANÁLISIS LÍNEA 30-P-5009 NORMA NCH2369, 2020).

En la figura se aprecian los siguientes valores para el material A-691 a la temperatura de 1.025°F (552°C): el esfuerzo admisible es de 5.250 psi (36 MPa), el esfuerzo de fluencia es de 21.315 psi (147 MPa) y el esfuerzo de ruptura es de 43.500 psi (300 MPa).

3.1.3 Codos y Brida

Dentro del sistema de tuberías, se utilizan codos de 90° con radio largo y un diámetro de 30 pulgadas, con un espesor estándar de 0,375 pulgadas. Estos codos presentan una terminación Butt Weld (BW) y están fabricados con el material ASTM A-691 Grado 1,25 Clase 22.

En la cercanía de la torre E-100A, se encuentra una brida especial en el sistema de tuberías que alberga una paleta de 30" de diámetro. Esta brida, proporciona una conexión segura y estable entre la tubería y la torre.

3.2 Configuraciones del sistema de tuberías

Para llevar a cabo el análisis de esfuerzos, se emplean dos configuraciones del sistema de tuberías bajo estudio. El primer modelo refleja la configuración actual, tal como está en la actualidad. El objetivo de esta configuración es establecer un punto de referencia para comprender el desempeño y las propiedades del sistema sin alteraciones aplicadas. En contraste, la segunda configuración es la futura, la cual incluye las modificaciones propuestas para permitir la integración de la válvula de aislamiento en la línea.

Los soportes existentes son identificados como "Soporte E-x", donde "x" corresponde al número asignado a cada soporte. A partir de este punto, por motivos de simplificación, se utilizará la nomenclatura genérica "soporte" para referirse a los diversos elementos que incluyen guías, soportes, snubbers y spring hangers.

Por otro lado, los soportes que serán añadidos en la configuración 2 son designados como "Soporte N-x", donde nuevamente "x" se refiere al número correspondiente de cada soporte a ser incorporado. Es esencial destacar que originalmente los soportes cuentan con distintas denominaciones, pero con el objetivo de simplificar la lectura, se utilizará esta nomenclatura.

3.2.1 Configuración 1: sistema de tubería actual

El modelo existente se representa gráficamente a través de un diagrama tridimensional, complementado con fotografías de los soportes existentes. A continuación, se detallan los soportes presentes en el sistema de tuberías.

En la línea horizontal de la Figura 11, se destacan los soportes E-1 y E-2.



Figura 11: Soportes en la línea horizontal.

Una descripción más detallada de los soportes de la línea horizontal se brinda a continuación:

1. En el contexto de la configuración actual de la estructura, el soporte E-1 contiene un spring hanger con una rigidez de 547 N/mm. Una representación visual de este soporte se muestra en la Figura 12.



Figura 12: Soporte E-1.

2. Por su parte, el soporte E-2 (representado en la Figura 13) funciona como guía en el eje X en ambas direcciones, con un espacio total de 1 pulgada (Gap de 1”). Además, presenta un apoyo simple en el eje Y que limita el desplazamiento descendente de la tubería.



a) Soporte E-2 (vista a).



b) Soporte E-2 (vista b).

Figura 13: Soporte E-2.

En la Figura 14 se puede observar la presencia de los soportes E-3, E-4 y E-5 en la línea vertical cercana al reactor D-101.



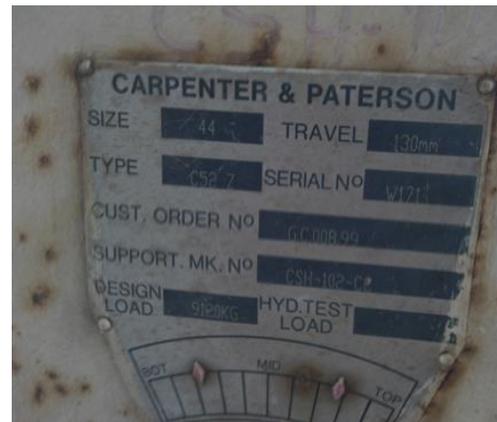
Figura 14: Soportes en la línea vertical.

En más detalle, los soportes de la línea vertical se presentan de la siguiente manera:

3. El soporte E-3 se compone de 2 spring hangers constantes, cada uno con carga de 20.106 lb (9.120 kg) y una capacidad de ajuste del 20%. Estos componentes se ilustran en la Figura 15.



a) Soporte E-3 (vista a).



b) Especificaciones soporte E-3.

Figura 15: Soporte E-3.

4. El soporte E-4 (Figura 16) está compuesto por guías laterales que dirigen la tubería en los ejes X y Z, abarcando los cuatro sentidos posibles. En el eje X, se presenta un espacio (GAP) de 0,750 pulgadas, mientras que en el eje Z, el espacio es de 0,500 pulgadas.



Figura 16: Soporte E-4.

5. El soporte E-5 (Figura 17) está compuesto por guías laterales en los ejes X y Z, contemplando los cuatro sentidos posibles, además de un punto de apoyo sencillo en el eje Y. Para el eje X, el espacio o Gap es de 0,750 pulgadas, mientras que para el eje Z, se confirmó un Gap de 0,500 pulgadas en terreno.



Figura 17: Soporte E-5.

Es relevante destacar que los soportes E-4 y E-5, así como las guías laterales asociadas, están conectados al conjunto de equipos que incluye al reactor D-101. Esta conexión se realiza mediante clips que permiten un movimiento relativo entre los soportes mencionados y la línea de tubería en estudio. Esta característica es aplicable tanto en la configuración actual de la línea como en la nueva configuración propuesta, ya que no se modifica esta parte de la línea de tubería.

Los soportes se muestran de acuerdo con la descripción realizada anteriormente, y son resaltados en color rojo en la Figura 18, que presenta el diagrama tridimensional del sistema existente.

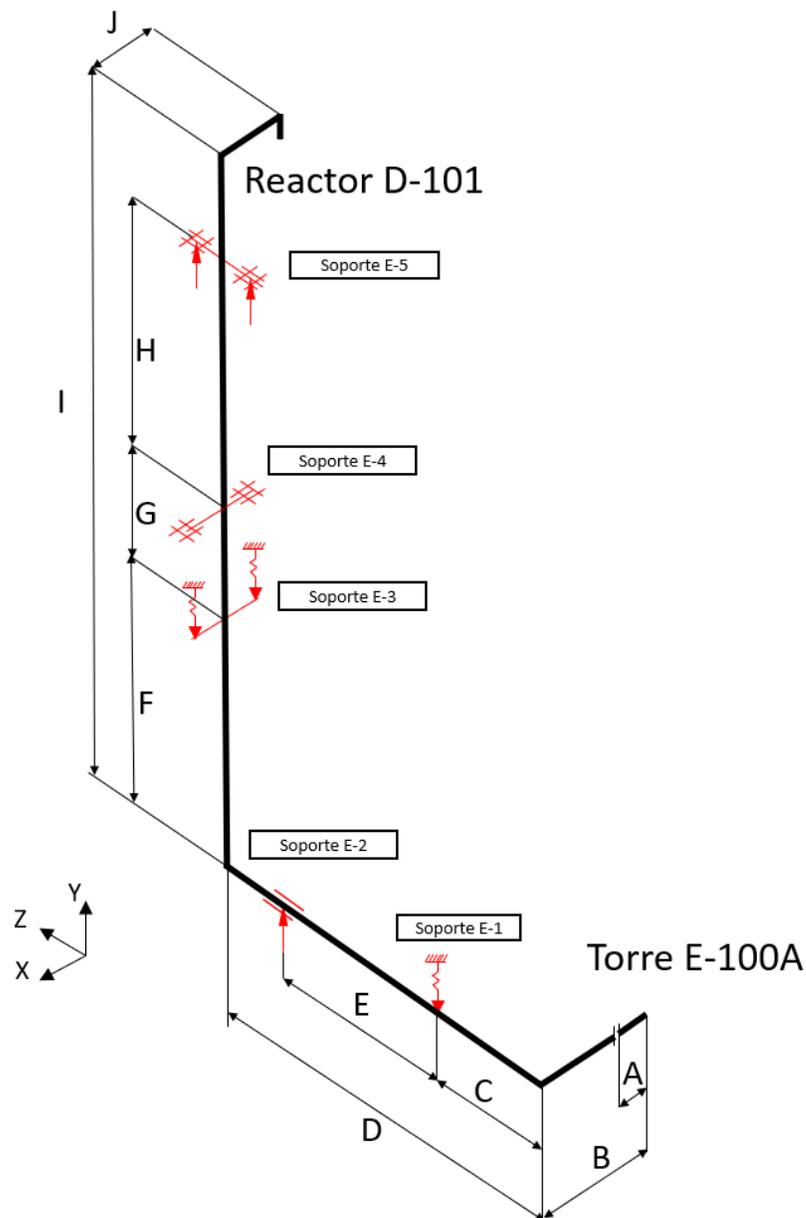


Figura 18: Diagrama tridimensional del sistema existente.

Las dimensiones de la figura mencionada se presentan en la Tabla 3, donde se presentan en unidades de pulgadas y milímetros, esto con la finalidad facilitar una comprensión visual más práctica del diagrama en cuestión.

Tabla 3: Dimensiones del diagrama tridimensional.

Letra	Magnitud (in)	Magnitud (mm)
A	26,81	681
B	287,91	7.313
C	208,19	5.288
D	868,70	22.065
E	506,38	12.862
F	603,43	15.327
G	167,99	4.267
H	845,98	21.488
I	1.749,41	44.435
J	155,32	3.945

3.2.2 Configuración 2: línea de tubería en configuración futura

En la configuración 2, se han implementado una serie de modificaciones en el sistema de tuberías con el objetivo de permitir la integración de una válvula de aislamiento. Se han llevado a cabo ajustes y adaptaciones en varios puntos del sistema para asegurar la viabilidad de esta incorporación. A continuación, se detallan las modificaciones efectuadas en el sistema, las cuales se reflejan en el diagrama del nuevo sistema, proporcionando una comprensión visual más clara de los cambios implementados.

1. Se añade el soporte N-1 en la configuración (Figura 19), el cual cuenta con un spring hanger constante que proporciona una fuerza de 6.613 lb (3.000 kg). Esta incorporación se realiza para ofrecer un soporte adicional significativo, necesario debido a la inclusión de la junta de expansión y el aumento en el espesor de la línea. Además, se incluyó un nuevo sistema de 3 snubbers para mantener rígido el sistema en un caso sísmico. Es importante señalar que en el diseño original, este soporte es designado como "SE-001".

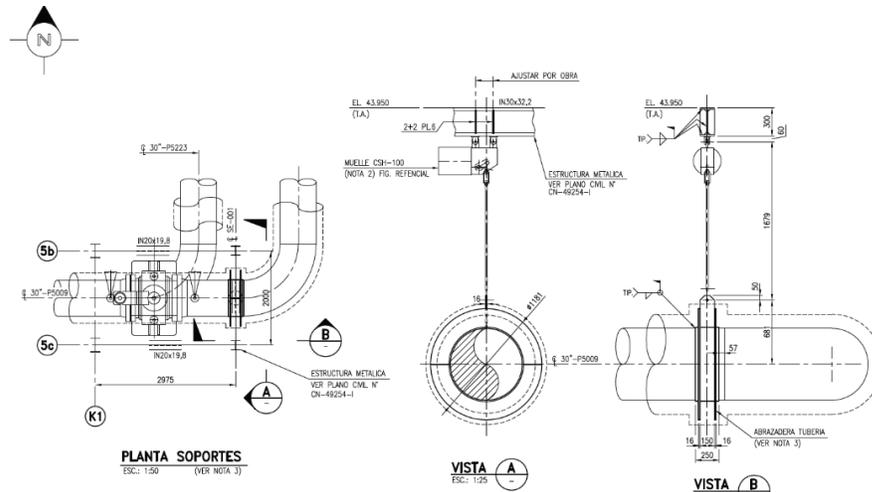
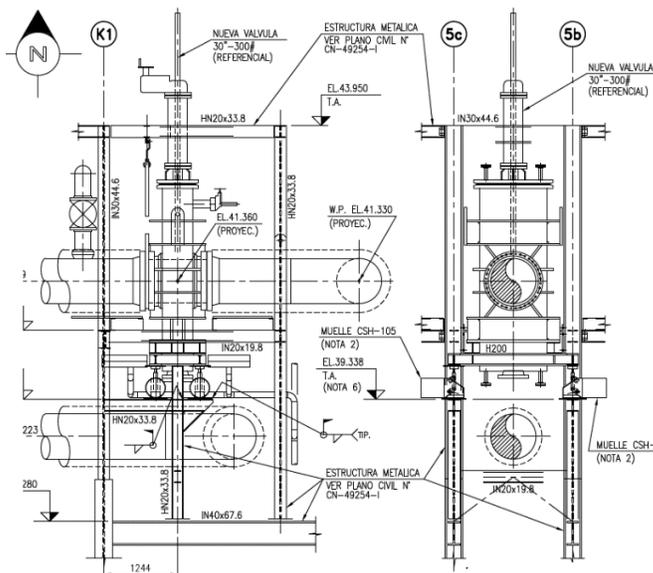


Figura 19: Soporte N-1.

- Se añade la válvula de aislamiento, clase 300, con un peso de 19.998 lb (9.071 kg), más 1.102 lb (500 kg) representando al soporte N-2. También se incluyen 4 spring hangers constantes de 5.401 lb (2.450 kg) cada uno, con una variabilidad de carga del 15%, los cuales soportan el peso de la válvula y del soporte. La Figura 20 muestra las dimensiones del soporte junto con la válvula. Es relevante destacar que el nombre original del soporte N-2 es "SE-002".



a) Plano soporte N-2.

b) Válvula de aislamiento.

Figura 20: Soporte N-2 y Válvula de aislamiento.

3. El soporte N-3 consta de un conjunto de snubbers en las tres direcciones entre la válvula y la junta de expansión, con el objetivo de amortiguar movimientos no deseados durante eventos sísmicos.
4. Se añade una junta de expansión, cuyas especificaciones detalladas se encuentran en la Tabla 4. Esta junta permitirá compensar las variaciones de longitud debido a la expansión térmica de la tubería.

Tabla 4: Especificaciones de junta de expansión.

Rigidez axial	6.386 lb/in
Rigidez lateral	6.386 lb/in
Rigidez rotacional	4.820 lb in/deg
Masa estimada	2.720 lb

5. Se añade el soporte N-4 (Figura 21), que dispone de un spring hanger constante simulado como fuerzas de 11.023 lb (5.000 kg). Adicionalmente, se incorporan tres snubbers en las direcciones X, Y y Z en el mismo soporte (N-4). Cabe mencionar que el soporte N-4 originalmente es denominado "SE-003".

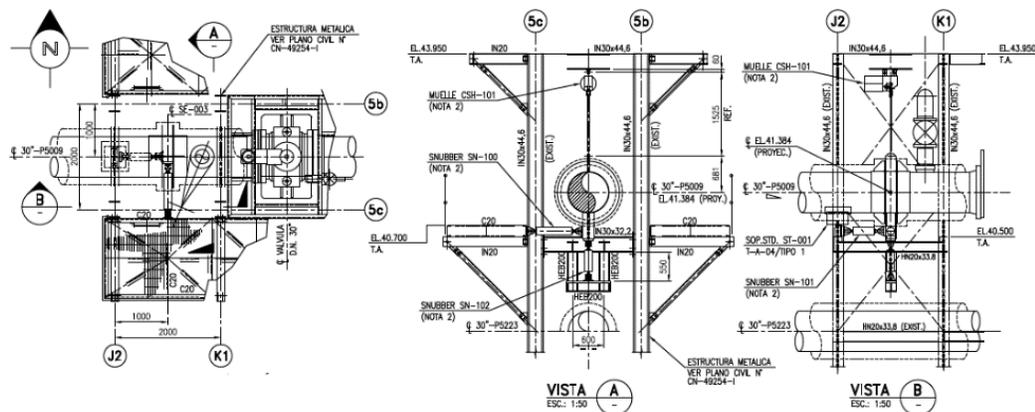


Figura 21: Soporte N-4.

6. Se incorpora el soporte N-5, un soporte simple tipo patín que aplica una fuerza positiva en la dirección vertical (+Y). En la configuración original, este soporte es conocido como "ST-001".
7. Se añade el soporte N-6 (Figura 22), que consiste en una guía lateral (restricción en X) y un spring hanger constante con una carga simulada de 2.204 lb (1.000 kg). El nombre original del soporte es "SE-004".

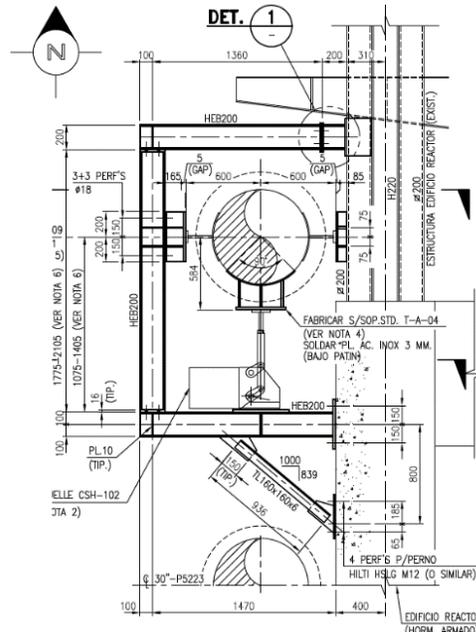


Figura 22: Soporte N-6.

Es necesario dismantlar el soporte E-1, ilustrado en la Figura 12 el cual contiene un spring hanger con una rigidez de 30.630 lb/in (547 N/mm). Esta acción es esencial debido a los cambios en la masa presente en esa zona. Además, se ha implementado una modificación en el grosor de la tubería en esta sección específica, aumentando de 0,375 pulgadas a 0,500 pulgadas. Esta adaptación se realiza para mejorar la capacidad de resistencia estructural de la línea.

La Figura 23 presenta un diagrama tridimensional que visualiza la configuración futura de la línea, permitiendo una comprensión clara de los ajustes y modificaciones aplicados en el sistema.

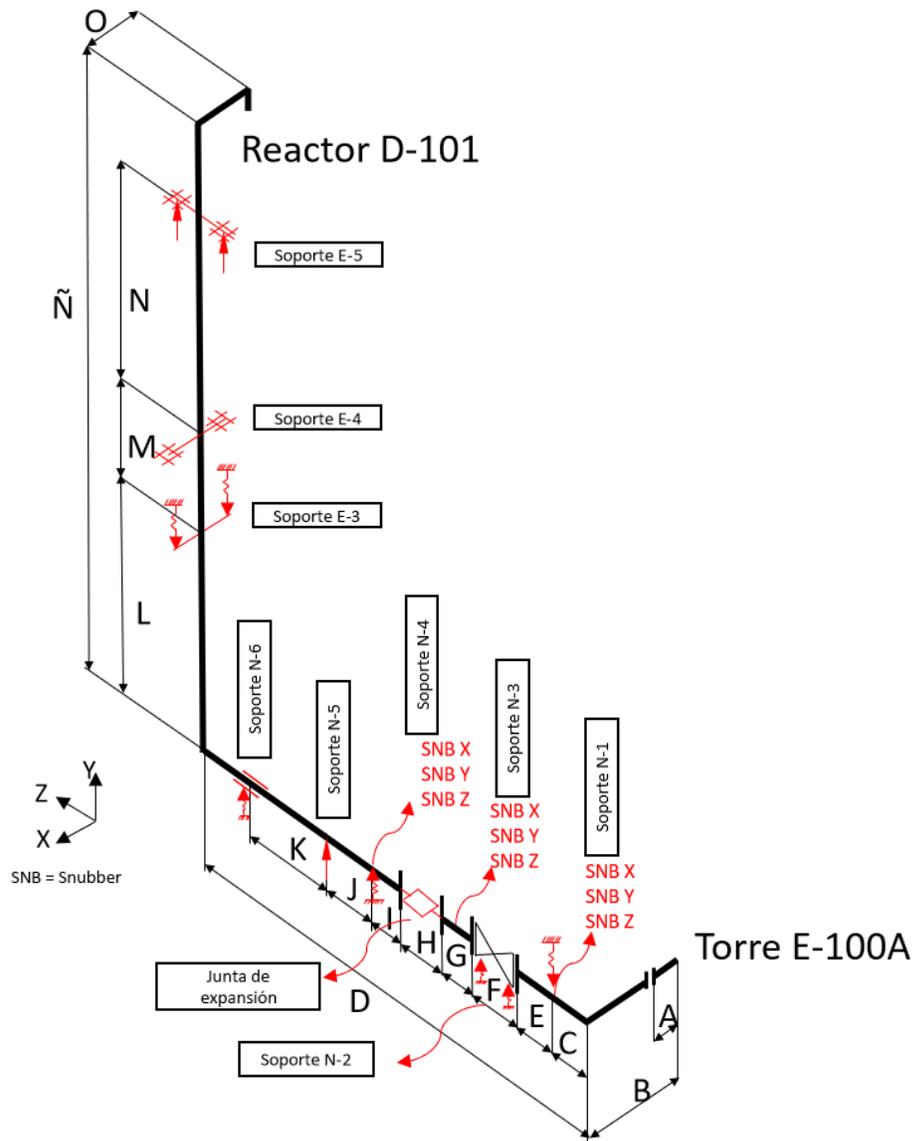


Figura 23: Diagrama tridimensional de línea en su configuración futura.

Además, se presenta en la Tabla 5 las dimensiones clave del diagrama tridimensional, que ayudan a comprender las magnitudes y proporciones de los componentes del sistema de tuberías. Cabe destacar que las magnitudes se presentan tanto en pulgadas como en milímetros, esto con el objetivo de proporcionar una comprensión visual más completa y precisa del diagrama.

Tabla 5: Dimensiones del diagrama tridimensional futuro.

Letra	Magnitud (in)	Magnitud (mm)
A	26,81	681
B	287,91	7.313
C	52,17	1.325
D	868,70	22.065
E	48,97	1.244
F	38,22	971
G	22,94	582,676
H	22,94	582,676
I	22,94	582,676
J	39,37	999,998
K	470,47	11.950
L	506,38	12.862
M	603,43	15.327
N	167,99	4.267
Ñ	1.749,41	44.435
O	155,32	3.945

3.3 Ingreso de datos a CAESAR II

Los elementos se definen mediante nodos iniciales y finales que configuran el sistema. Los datos a ingresar por parte del usuario variarán según los elementos que se deseen representar. Los valores operativos se incluyen en el primer componente y se mantienen como predeterminados, a menos que se requieran modificaciones específicas para algún componente en particular.

En este informe, no se incluyen los nodos correspondientes a los equipos, ya que el enfoque está dirigido hacia el análisis de la tubería y su conexión con los equipos. El objetivo es evaluar la tubería y su comportamiento, sin considerar la resistencia estructural específica de los equipos involucrados.

En la Figura 24 se muestra el ejemplo de la temperatura ambiente que se ingresa en el modelo. Esta información es esencial para tener en cuenta las condiciones ambientales en el análisis de esfuerzos de la tubería y evaluar su comportamiento bajo diferentes escenarios.

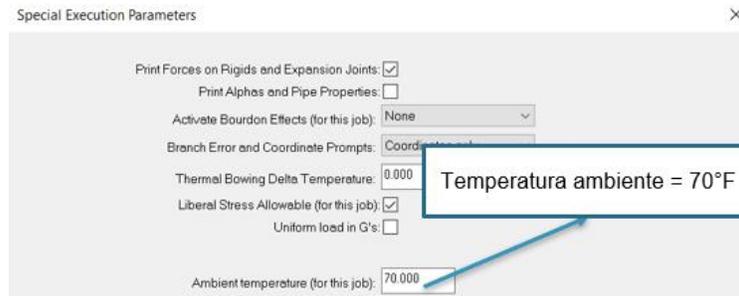


Figura 24: Temperatura ambiente definida en CAESAR II.

En la Figura 25 se muestra los parámetros operacionales definidos en CAESAR II. El código de diseño que se utiliza es el ASME B31.3, para tuberías de procesos. Esta norma es aplicable para varios sistemas de tuberías, en este caso, para industrias de refinería.

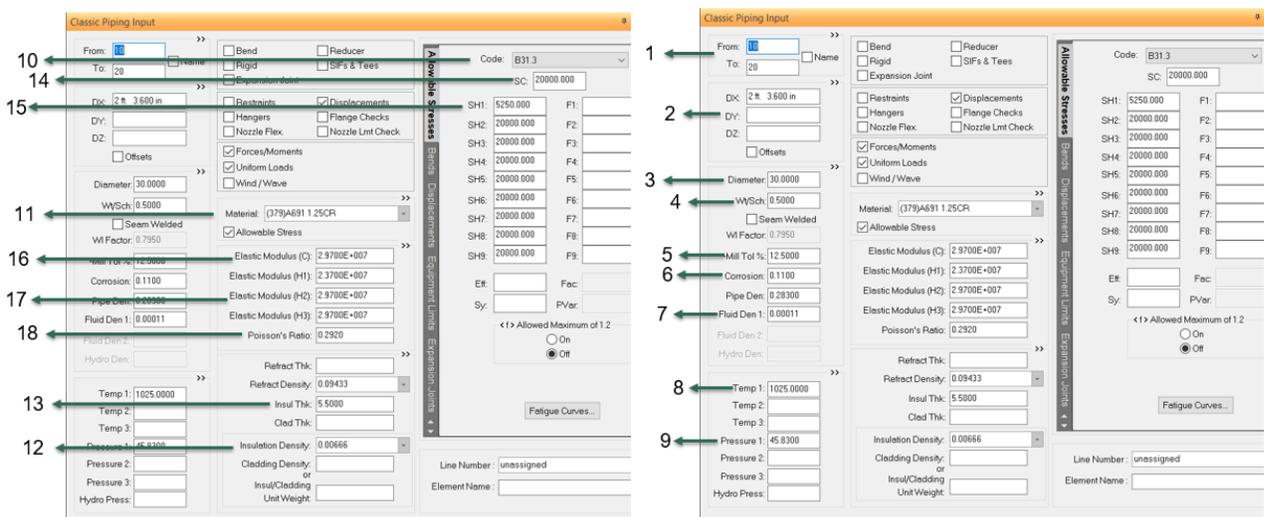


Figura 25: Parámetros operaciones definidos en CAESAR II.

A continuación, se muestra la Tabla 6 , donde se especifican los datos de entrada de este trabajo en CAESAR II.

Tabla 6: Parámetros definidos para el modelo en CAESAR II.

Numero	Descripción	Dato	Unidad
1	Nodos	-	-
2	Longitud	-	in
3	Diámetro tubería	30 (NPS 30)	in
4	Espesor de pared	0,375 (desde la válvula a la torre E-100A tiene un espesor de 0,5)	in
5	Tolerancia por fabricación	12,5%	-
6	Corrosión	0,11	in
7	Densidad del fluido	0,00011	$\frac{lb}{in^3}$
8	Temperatura diseño	1.025	°F
9	Presión diseño	45,83	psi
10	Código ASME	B31.3	-
11	Material	A-691 1,25 CR	-
12	Densidad de aislamiento (silicato de calcio)	0,00666	$\frac{lb}{in^3}$
13	Espesor aislación	5,5	in
14	Esfuerzo admisible en frio	20.000	psi
15	Esfuerzo admisible en caliente	5.250	psi
16	Modulo elástico en frio	$2,97 \cdot 10^7$	psi
17	Modulo elástico en caliente	$2,37 \cdot 10^7$	psi
18	Coeficiente poisson's	0,292	-

Como se dijo anteriormente, en el diagrama simplificado de la planta FCCU (Figura 49) se encuentran las temperaturas de diseño relevantes tanto de los equipos como de la tubería.

Luego de ingresar los parámetros del primer elemento de la línea de tubería, se continúa con la modelación de los siguientes, con tal de replicar la configuración del sistema de tuberías a analizar.

Para modelar codos y tees en el sistema, es suficiente asignar el cambio de dirección correspondiente y especificar el tipo de accesorio al que pertenecen. En el caso de los codos, se dividen automáticamente en tres nodos, como se ve en la Figura 26. Para incorporar reducciones, basta con

especificar los dos diámetros y los espesores correspondientes. Las válvulas y bridas se agregan como elementos rígidos, para lo cual es necesario indicar la distancia entre caras y su peso.

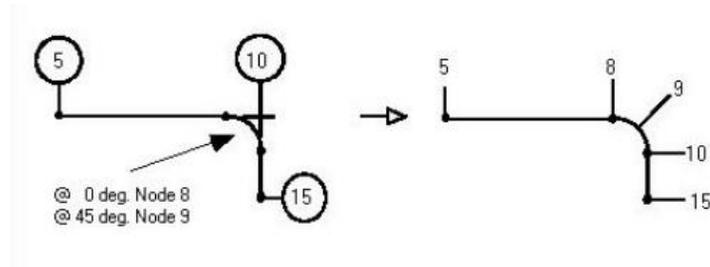


Figura 26: Modelamiento de codo en CAESAR II.

3.3.1 Caso sísmico

Para el análisis sísmico estático de la tubería, se empleó la metodología 4 descrita en el documento "88010412-FL-001" proporcionado por la empresa de ingeniería. Según esta metodología, se utilizará la carga sísmica F_p determinada de acuerdo con la norma internacional ASCE 7-05, que establece un coeficiente sísmico horizontal de 0,35g, que además, es un coeficiente que se usa normalmente para este tipo de análisis.

Las cargas aplicadas en el análisis se detallan en la Tabla 7, la cual proporciona información precisa sobre las cargas consideradas para el análisis sísmico de la tubería.

Tabla 7: Cargas sísmicas aplicadas.

Dirección	Gx	Gy	Gz
X (horizontal N-S)	0,35	0	0
Z (horizontal E-O)	0	0	0,35

Este tipo de análisis se desarrolla con el método del sismo lineal estático equivalente en el programa CAESAR II, según la normativa correspondiente.

3.4 Modelo de línea condición actual en CAESAR II

A continuación, se modela en CAESAR II la línea existente, considerando todos los componentes del sistema de tuberías, además, se modelan los equipos como tubería, para así lograr tener un modelo más realista.

En el modelado, se consideraron las características geométricas y los materiales utilizados en la construcción de la línea y los equipos. Se asignaron propiedades específicas a cada componente, como diámetros, longitudes, espesores, materiales y propiedades mecánicas correspondientes.

En particular, los equipos verticales se representaron en el modelo como tuberías individuales, conservando sus respectivos diámetros. Esta decisión permitió simular de manera más precisa el comportamiento de los equipos dentro del sistema y evaluar de manera adecuada su interacción con la línea en estudio. Al considerar los equipos como tuberías, se pudo analizar su influencia en los esfuerzos y desplazamientos de la línea.

Durante el proceso de modelado, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La tubería se representa como una unión soldada a los respectivos equipos, asegurando una conexión adecuada y realista entre ellos.
2. La brida especial cercano a la torre E-100A se simuló como un elemento rígido, considerando una masa adicional para su representación precisa en el modelo.
3. Los codos utilizados en la línea son de tipo radio largo, lo que se tuvo en cuenta al definir sus dimensiones y características en el modelo.
4. En el punto 3, los spring hangers se simularon con una carga constante de 16.085 lb (7.296 kg) cada uno. Esta carga se seleccionó considerando las normas de seguridad, ya que los spring hangers rara vez operan en su carga máxima.
5. Se consideraron los soportes E-4 y E-5 con movimiento relativo, debido a que están ancladas al Convertidor.

Se realizaron nodos en el sistema de tuberías siguiendo un orden secuencial. El proceso comenzó en el nodo 10, que corresponde a la conexión entre la tubería y la torre E-100A, y se continuó avanzando en el recorrido del sistema. En cada punto clave de conexión entre tuberías y equipos, se asignó un nodo para su análisis y evaluación.

El último nodo creado en este análisis fue el nodo 170, que representa la conexión entre la tubería y el reactor D-101. Con la inclusión de este nodo final, se completó el recorrido del sistema de tuberías evaluado en este estudio.

Es importante destacar que estas consideraciones y asignaciones de nodos se aplicaron tanto al modelo existente del sistema de tuberías como al modelo con la configuración futura, esta última incluye la válvula y las nuevas consideraciones analizadas posteriormente en este informe.

En la Figura 27 se presenta el modelo completo del sistema, que incluye todos los componentes, elementos y nodos más relevantes.

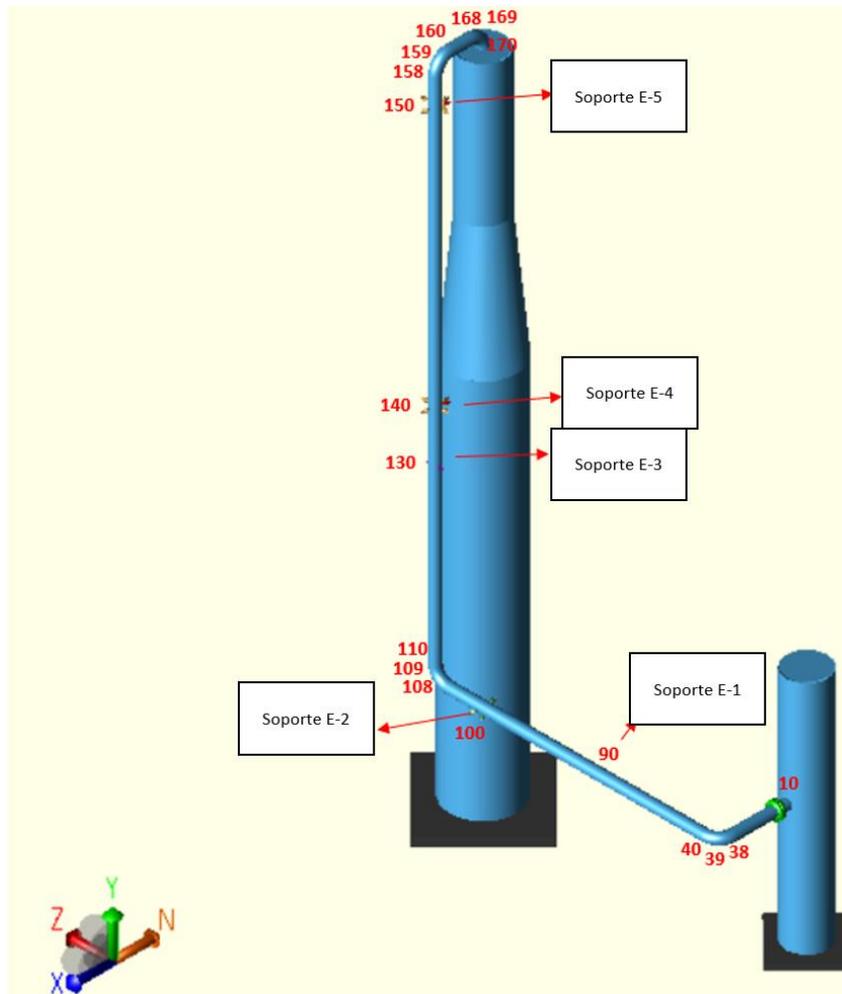


Figura 27: Modelo de línea de tubería existente.

3.5 Modelo de línea condición futura en CAESAR II

En el siguiente apartado se presenta el modelo de la línea en su condición futura, el cual ha sido desarrollado teniendo en cuenta las modificaciones previamente mencionadas. El modelo, que se muestra en la Figura 28, tiene como objetivo representar de manera precisa la configuración propuesta para la línea.

Para ingresar los datos correspondientes a las modificaciones, se han tomado en cuenta varias consideraciones importantes:

1. Conexiones de tubería a equipos se consideran soldadas.
2. En lugar de utilizar los 4 spring hangers originales de 5.511 lb (2.500 kg) cada uno en la válvula, se ha optado por simularlo como 2 spring hangers, con un peso de 10.912 lb (4.950 kg) cada uno. Esta simplificación del modelo permite una mejor representación.
3. Los snubbers adicionales se han considerado exclusivamente para los casos sísmicos.
4. Se ha tenido en cuenta los desplazamientos relativos en los soportes y guías ubicados en la línea vertical. Estos desplazamientos son cruciales para comprender el comportamiento estructural de la línea.
5. Se ha reducido la carga en los spring hangers de la línea horizontal en un 15%, y del 20% en los dos spring hangers de la línea vertical.

Un enfoque especial también se ha dirigido hacia las bridas de la válvula, ya que son elementos críticos que demandan una atención meticulosa en cuanto a los esfuerzos generados. Las cargas máximas previstas se someten al análisis, evaluando el comportamiento de las bridas ante estas condiciones extremas. Este análisis detallado tiene como objetivo identificar y comprender los esfuerzos críticos que pueden actuar en estas zonas, lo cual desempeña un papel fundamental para asegurar la resistencia y la integridad futura de la válvula.

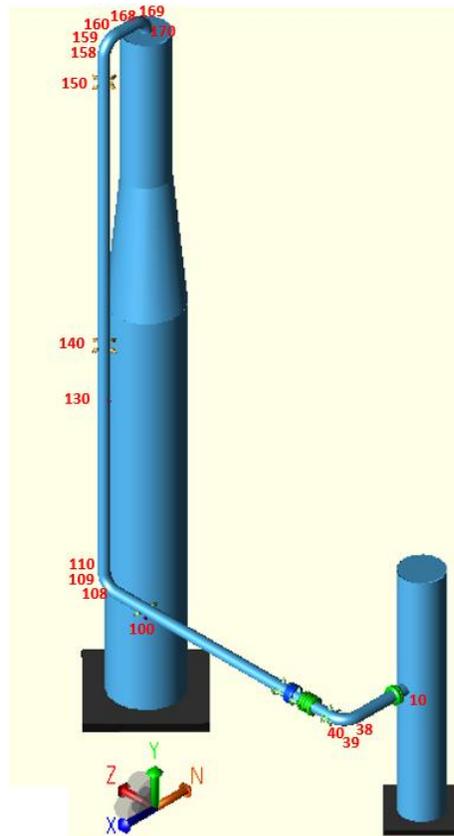


Figura 28: Modelo de configuración futura de la línea.

Las modificaciones se han enfocado en la línea horizontal del sistema de tuberías. Con el objetivo de facilitar la comprensión de los cambios implementados, se presenta en detalle la Figura 29, la cual brinda una visualización más detallada de las modificaciones realizadas.

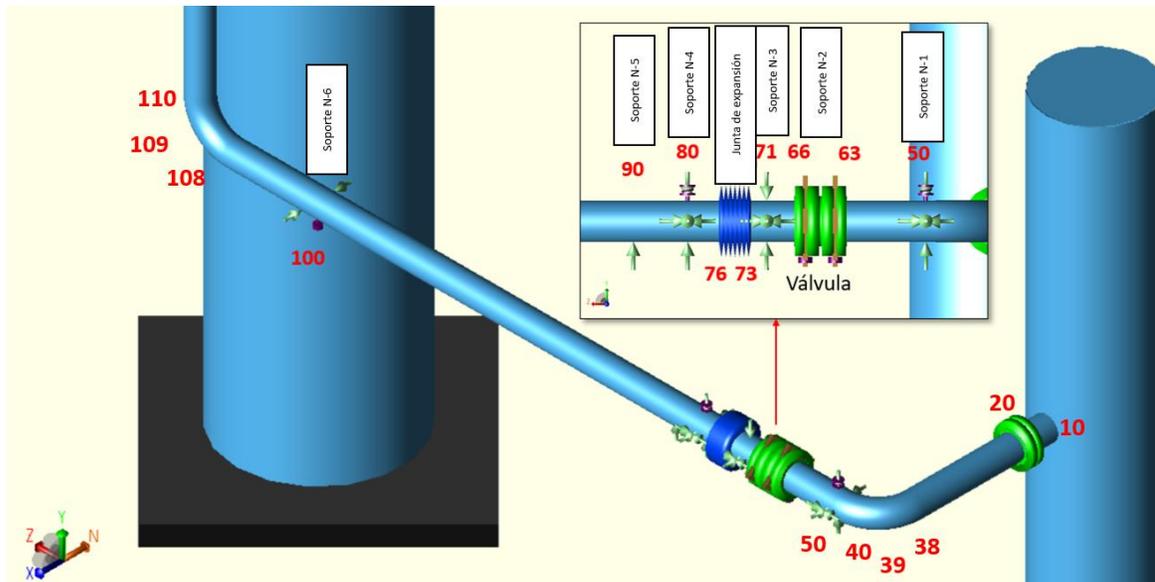


Figura 29: Detalle de modificaciones en CAESAR II.

Además, en la Figura 30 se presentan los soportes ubicados en la línea vertical (presentes en la configuración existente como en la futura). La numeración utilizada en la figura se corresponde con el diagrama tridimensional mostrado previamente en la Figura 23, lo que facilita la visualización y comprensión del modelo en su conjunto. Esta representación gráfica proporciona una visión más clara de la distribución y ubicación de los soportes en la línea vertical.

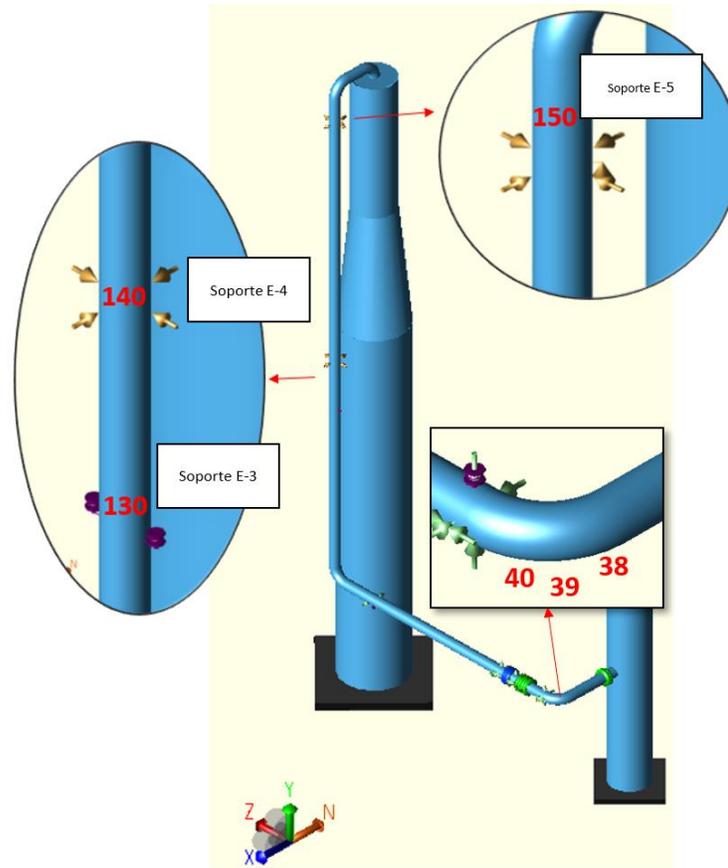


Figura 30: Soportes línea vertical en CAESAR II.

Completado el modelado detallado, la configuración adecuada, y los casos de carga a evaluar, se puede ejecutar el programa y presentar los resultados obtenidos.

3.6 Casos de carga

Se evalúan 5 casos de carga fundamentales para el análisis de la línea de tubería, tomando como base los estudios realizados por la empresa de ingeniería. En este contexto, los esfuerzos admisibles se rigen por el código ASME B31.3.

Es importante mantener la tubería dentro del rango elástico, ya que esta condición asegura que los esfuerzos aplicados no resulten en deformaciones plásticas ni daños permanentes al material. Al permanecer dentro de este margen, se conserva la integridad estructural de la tubería, lo que a su vez garantiza una operación segura y confiable en el tiempo.

Caso 1: Carga Peso total - Los esfuerzos admisibles en carga sostenida, según el código ASME B31.3, son equivalentes a los esfuerzos de fluencia en caliente (S_h) para cada tipo de material. En el caso del ASTM A-691 Grado 1,25 Clase 22, el S_h se establece como se muestra en la ecuación 12.

$$S_h = 5.250 \text{ psi} \quad (12)$$

Caso 2: Expansión Térmica - Los esfuerzos debidos a la expansión térmica se originan por los desplazamientos causados por cambios de temperatura en el material. Los esfuerzos admisibles en expansión, según el código ASME B31.3, se calculan según la ecuación 14. En el caso más desfavorable, se calcula el factor "f" para un periodo de 20 años, como se muestra en la ecuación 13.

$$f = 24 \cdot 365 \cdot 20 = 175.200 \text{ ciclos} \rightarrow f = 0,5 \quad (13)$$

$$S_A = 0,5 \cdot (1,25 \cdot 20.000 + 0,25 \cdot 5.250) = 13.156 \text{ psi} \quad (14)$$

Caso 3: Carga Operativa - En este escenario, se considera el peso total, la presión y la expansión térmica. Para este caso, no existe un esfuerzo admisible según el estándar ASME B31.3. No obstante, es factible comparar los resultados con el esfuerzo de fluencia del material a la temperatura máxima de diseño del sistema en estudio, siempre y cuando se aplique un factor de seguridad entre los resultados y el esfuerzo de fluencia, que se muestra en la ecuación 15.

$$S_{fluencia} = 21.315 \text{ psi} \quad (15)$$

Caso 4 y Caso 5: Cargas Ocasionales y Peso Total - Estos casos involucran cargas eventuales, como los sismos, combinadas con el peso total. Generalmente, los códigos requieren que para evaluar los esfuerzos ocasionales, estos se sumen a los esfuerzos generados por las cargas sostenidas, y que los esfuerzos totales resultantes se comparen con el esfuerzo admisible en caliente, aumentado por un factor que depende del código aplicado. En el caso de ASME B31.3, este factor se muestra en la ecuación 16.

$$1,33 \cdot S_h = 6.983 \text{ psi} \quad (16)$$

Estos escenarios de carga se resumen de manera concisa en la Tabla 8 mostrada en Anexo E1.

CAPITULO 4: Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados detallados obtenidos para cada uno de los casos de carga previamente mencionados. Se analizarán los esfuerzos generados en la línea de tubería y las deformaciones máximas que se dan en cada caso.

El caso 3, que representa la condición de operación más desfavorable, recibirá especial atención, dado su impacto crítico en el diseño y seguridad del sistema.

En la primera parte del estudio, se realiza una comparación entre el modelo elaborado para este trabajo en CAESAR II, que incorpora todas las modificaciones propuestas, y los resultados proporcionados por la empresa de ingeniería obtenidos en el software SAMCEF. Ambos modelos son sometidos a los mismos casos de carga y condiciones de borde, lo que permite analizar y comprender las diferencias encontradas entre ambos análisis.

En la segunda fase del estudio, se elabora un modelo que representa la configuración actual del sistema de tuberías, y se compara con el modelo de la configuración futura realizado previamente en CAESAR II. En ambos modelos, se incorporó la temperatura real de diseño del regenerador. El objetivo principal es evaluar si, con la nueva configuración propuesta, los esfuerzos se mantienen iguales, se reducen o aumentan en comparación con la configuración actual.

Durante este análisis, también se presta atención a las deformaciones máximas que se presentan en cada caso de carga, ya que estas pueden tener un impacto significativo en el encuentro o interacción entre tuberías cercanas.

Para obtener resultados más detallados, se puede consultar el Anexo E2 (análisis de configuración actual) y Anexo E3 (análisis de configuración futura). Además, para el análisis de las boquillas, se encuentra disponible el Anexo E4.

4.1 Resultados de la empresa de ingeniería

En esta sección del capítulo, se presentan los resultados obtenidos por la empresa de ingeniería en el software SAMCEF para los casos de carga evaluados y se realiza una comparación con los resultados obtenidos en este proyecto (Cadetech, Anexo 01: Resultados propuesta final, 2020). Se analizan los esfuerzos, desplazamientos y demás parámetros relevantes, buscando concordancias y divergencias entre ambos estudios.

4.1.1 Caso de carga 1

En el contexto del primer caso de carga, en el cual se ha tenido en cuenta únicamente el peso de la tubería y sus accesorios, el aislamiento y el fluido, se destaca una concentración del esfuerzo máximo en el codo cercano a la torre E-100A. En este punto específico, los resultados obtenidos en la Figura 31 exhiben una variación mínima entre los estudios realizados, presentando una diferencia de 853 psi entre los valores analizados por cada uno.

En los dos estudios realizados, se ha encontrado que el peso propio de los componentes analizados representa menos del 75% del total de las cargas aplicadas sobre el sistema. Esto quiere decir que, según la norma NCh 2369 no es necesario considerar el movimiento vertical para el caso sísmico.

En cuanto a los desplazamientos, se ha identificado una coincidencia total entre ambos estudios. En ambas investigaciones, se encuentra el valor máximo de desplazamiento en el nodo 76, el cual coincide con la futura ubicación de la válvula. En este punto específico, el desplazamiento máximo registrado es de 1,85 pulgadas en la dirección -Y (hacia abajo).

Debido a lo anterior, este primer caso de carga establece una base sólida para la comparación de los resultados. Las similitudes en los puntos de concentración de esfuerzos y desplazamientos máximos proporcionan un punto de partida relevante para evaluar la consistencia entre los modelos desarrollados en los dos estudios.

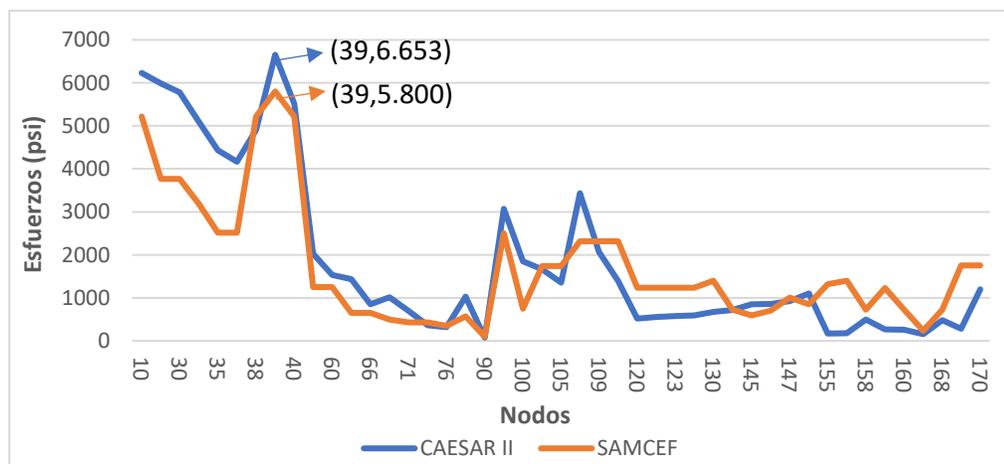


Figura 31: Comparación esfuerzos caso de carga 1.

4.1.2 Caso de carga 2

En el segundo caso de carga, en el que se considera únicamente la expansión térmica, se observa una similitud destacable entre los resultados obtenidos en ambos estudios. Se ha identificado que los esfuerzos máximos se concentran en el codo inferior de la línea vertical. Sin embargo, se aprecia en

la Figura 32 una diferencia de alrededor de 2.000 psi entre los valores obtenidos mediante SAMCEF y CAESAR II.

Esta discrepancia en los resultados se debe a las características de cada programa. En SAMCEF, se considera la interacción realista de los equipos tal cual son en la vida real, lo que incluye considerar su geometría y propiedades particulares. En cambio, en CAESAR II, se permite añadir los equipos simplemente como tuberías, lo que puede implicar ciertas simplificaciones en la modelización. Sin embargo, es importante destacar que a pesar de estas diferencias, los resultados obtenidos en CAESAR II se aproximan bastante a los del otro estudio.

En relación con los desplazamientos, el estudio realizado con CAESAR II identificó un desplazamiento máximo de 10,9 pulgadas entre los dos codos cercanos al reactor D-101. Por otro lado, los análisis realizados por la empresa de ingeniería arrojaron valores cercanos, con un desplazamiento máximo en el mismo punto de 8,6 pulgadas hacia arriba (+Y).

En síntesis, este segundo caso de carga muestra que ambos estudios se alinean en general. Aunque hay una diferencia en los valores de esfuerzos debido a cómo funcionan los programas, la similitud general y cercanía en los resultados entre CAESAR II y SAMCEF ayuda a confiar en el análisis hecho en este proyecto.

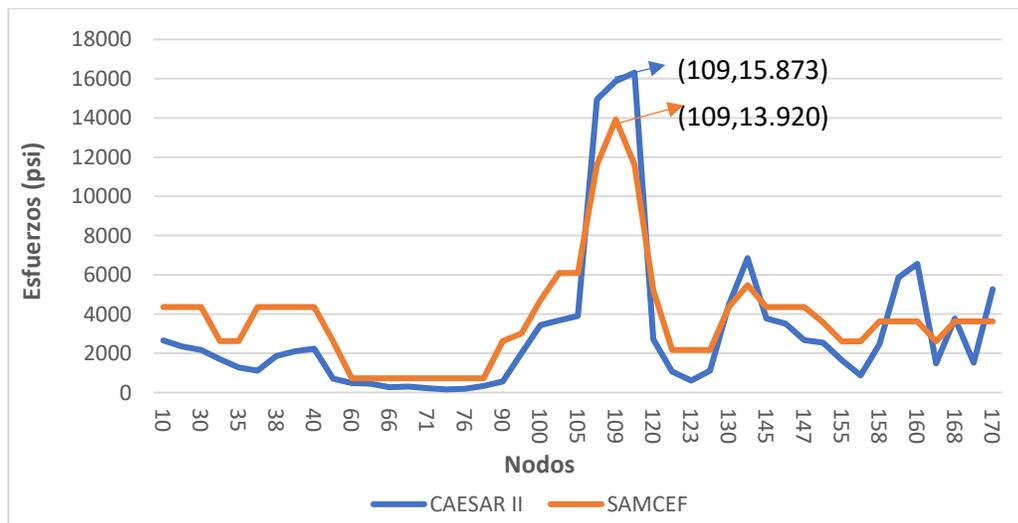


Figura 32: Comparación esfuerzos caso de carga 2.

4.1.3 Caso de carga 3

En el tercer caso de carga, donde se considera el peso total, la presión y la expansión térmica, los resultados son muy parecidos entre los dos estudios. Los esfuerzos máximos que se identifican concuerdan en ambas herramientas de análisis, y se ve que el punto con más esfuerzo es la curva inferior de la tubería vertical.

En este escenario, se observa una diferencia de 2.898 psi entre los valores calculados mediante SAMCEF y los obtenidos con CAESAR II. Esta discrepancia nuevamente se debe a cómo cada programa aborda la representación del sistema de tubería y los equipos involucrados. A pesar de esta variación en los valores, es importante destacar que las tendencias en la variación de los esfuerzos a lo largo de la tubería son bastante parecidas entre ambos programas. Esto se puede ver en la Figura 33.

En cuanto a cómo la tubería se desplaza, la empresa de ingeniería se encontró que la parte que más se mueve está en la curva inferior de la línea vertical, con un desplazamiento máximo de 9,69 pulgadas en la dirección +Z. Por otro lado, en CAESAR II se tiene un desplazamiento de 5,83 pulgadas en la misma dirección.

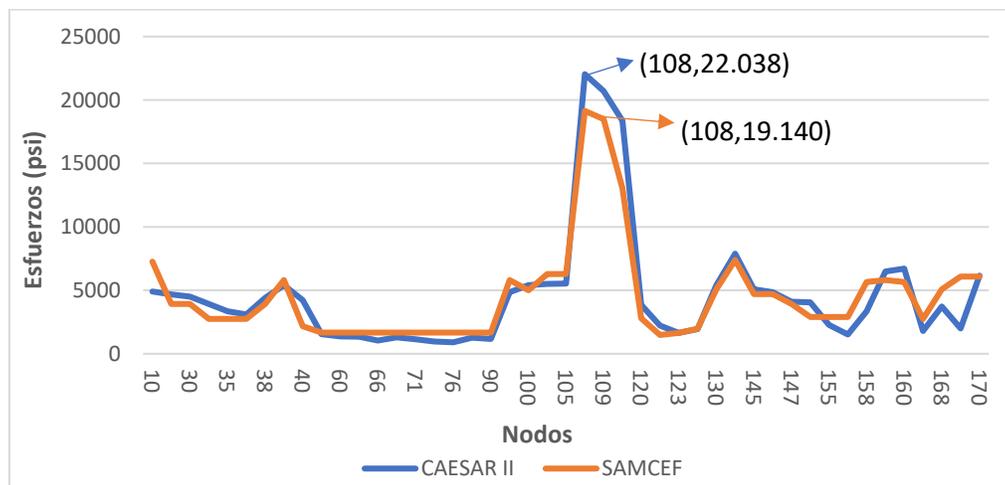


Figura 33: Comparación esfuerzos caso de carga 3.

4.1.4 Caso de carga 4

En la comparación de resultados del caso 4, se evaluó el análisis sísmico de un sistema estructural utilizando dos herramientas diferentes: CAESAR II para este estudio con un enfoque de análisis estático para el sismo y SAMCEF de la empresa de ingeniería, que se basa en un análisis modal de espectro de respuesta.

Se encontraron dos diferencias claves: En este estudio, se omitió la estructura existente entre los nodos 50 al 90, mientras que en la empresa de ingeniería al ocupar SAMCEF si incluye esta estructura en su análisis, lo que afectó los esfuerzos en esos nodos. Además, el enfoque de análisis sísmico utilizado en SAMCEF es más completo al considerar la respuesta dinámica del sistema a diferentes frecuencias, esto se puede ver en la Figura 34.

Estas discrepancias muestran la importancia de un enfoque sísmico más completo para obtener resultados precisos y representativos en el análisis de respuesta sísmica de sistemas estructurales. Al

interpretar los resultados y tomar decisiones de diseño y seguridad, es fundamental considerar estas diferencias en el análisis sísmico.

En lo que respecta a los desplazamientos, ambos estudios coinciden en que el codo cercano al reactor D-101 es donde se encuentra el desplazamiento máximo. No obstante, se observan diferencias significativas. SAMCEF reporta un desplazamiento máximo de 5,5 pulgadas, mientras que el estudio en CAESAR II muestra un valor de 1,34 pulgadas.

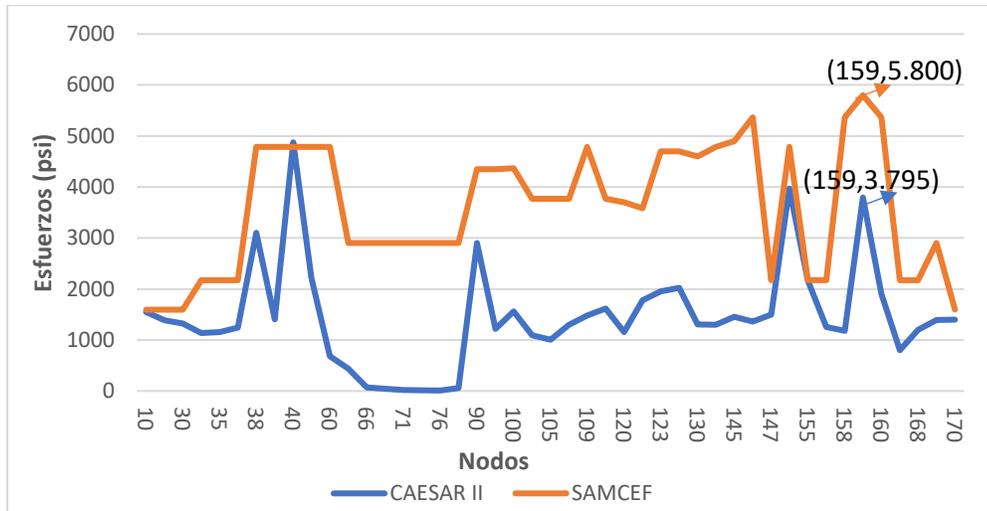


Figura 34: Comparación esfuerzos caso de carga 4.

4.1.5 Caso de carga 5

En el quinto caso, donde se realiza un análisis sísmico en el eje Z, se vuelve a exponer una discrepancia en los resultados, siendo los esfuerzos obtenidos en el estudio de SAMCEF considerablemente mayores. Esta discrepancia puede ser atribuida a las mismas razones que se presentaron en el cuarto caso.

Así como en el caso anterior, el análisis realizado no incorporó la estructura existente presente en el modelo examinado por SAMCEF. Esta omisión repercute significativamente en la distribución de los esfuerzos sísmicos, dado que esta estructura también estará sujeta a movimiento sísmico. Esto explica la disparidad observada en los resultados de los nodos involucrados en el análisis.

Adicionalmente, es crucial considerar que el enfoque sísmico adoptado en SAMCEF difiere significativamente del utilizado en este estudio. Mientras que en este análisis sísmico se realiza de manera estática, en SAMCEF se emplea un análisis modal de espectro de respuesta. Esta metodología implica la consideración de la respuesta dinámica del sistema ante diversas frecuencias sísmicas.

Estas divergencias entre los dos estudios enfatizan la importancia de una modelización detallada y de utilizar enfoques sísmicos adecuados para obtener resultados precisos y confiables en el análisis de respuesta sísmica.

Sin embargo, es importante destacar que a pesar de las diferencias en los esfuerzos observados entre este estudio y el análisis de la empresa de ingeniería en el caso sísmico, ambos conjuntos de resultados muestran que los esfuerzos calculados se encuentran por debajo de los valores admisibles, esto se puede ver en la Figura 35.

En relación a los desplazamientos máximos, en ambos estudios se observan valores máximos en el codo que conecta con el reactor. Sin embargo, existe una notable diferencia en la magnitud del desplazamiento entre los dos programas de análisis. El software SAMCEF reporta un desplazamiento máximo de 5,8 pulgadas, mientras que para el estudio realizado con CAESAR II, el valor máximo es de 1,4 pulgadas.

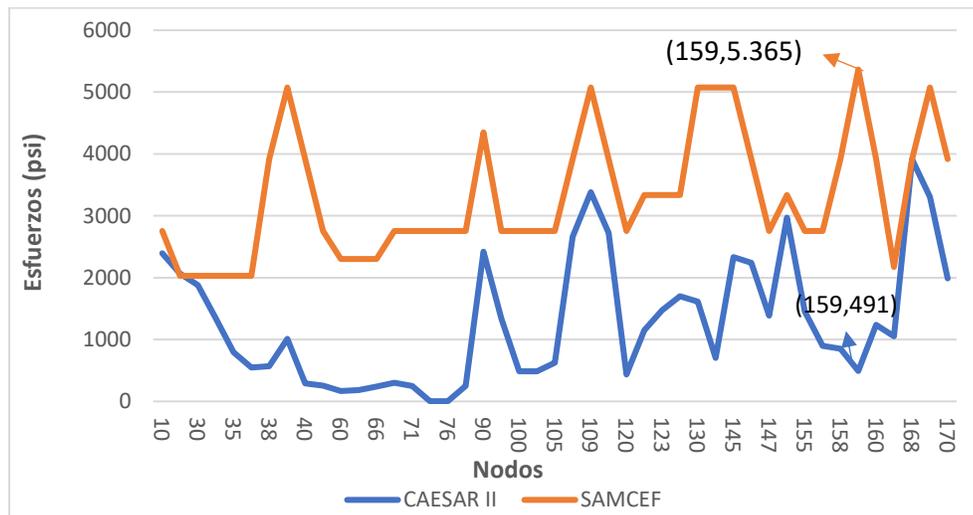


Figura 35: Comparación esfuerzos caso de carga 5.

En resumen, para los casos 1, 2 y 3, los resultados han sido similares, en cambio, los casos 4 y 5 han sido diferentes. Esto se debe tener en cuenta para el análisis.

Durante la comparación, se observó una importante discrepancia en la simulación realizada por la empresa de ingeniería, específicamente relacionada con la temperatura de diseño del regenerador. Mientras que su análisis utilizó una temperatura de diseño de 331 °F (166 °C), que no correspondía con la temperatura operativa real del sistema, se confirmó a través del programa PI System que la temperatura de operación efectiva del regenerador es de 1.292 °F (700°C).

Por lo tanto, en el subcapítulo 4.2, se realizan simulaciones considerando la temperatura real de diseño del regenerador.

4.2 Comparación de configuración futura y configuración actual

4.2.1 Caso de carga 1

Al efectuar una comparativa entre las dos configuraciones, es evidente que, aunque los esfuerzos en el nodo 170 cercano a la boquilla de la tubería del reactor exceden en un 3% el límite admisible, los esfuerzos en general permanecen similares. Sin embargo, es crucial destacar que al reducir la carga en los soportes de resorte (spring hanger) de la línea vertical al 25%, los esfuerzos en el nodo 170 disminuyen significativamente, ubicándose dentro de los límites permitidos por el código ASME B31.3. Esta adaptación es esencial debido a que la carga alta provoca la elevación del tramo vertical, generando una tensión adicional en la boquilla y los codos cercanos al reactor D-101. Una comparación visual de los esfuerzos puede ser apreciada en la Figura 36.

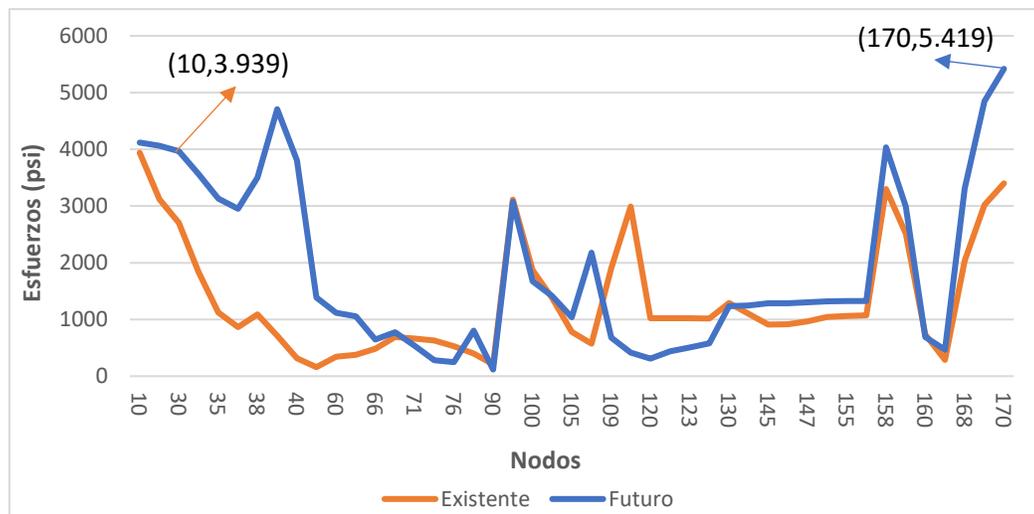


Figura 36: Comparativa caso 1 configuración existente v/s futura.

4.2.2 Caso de carga 2

La curva comparativa de esfuerzos entre la configuración actual y futura, mostrada en la Figura 37. Se observa que en la configuración futura, el esfuerzo máximo se presenta en el nodo 108, alcanzando 8.356 psi. En contraste, en la configuración actual, el esfuerzo máximo es de 9.309 psi. Esta diferencia indica que se ha logrado disminuir el esfuerzo máximo en la configuración futura. Por lo tanto, la relación entre el esfuerzo máximo en la configuración futura y el esfuerzo máximo en la configuración actual equivale a aproximadamente el 89,8 %.

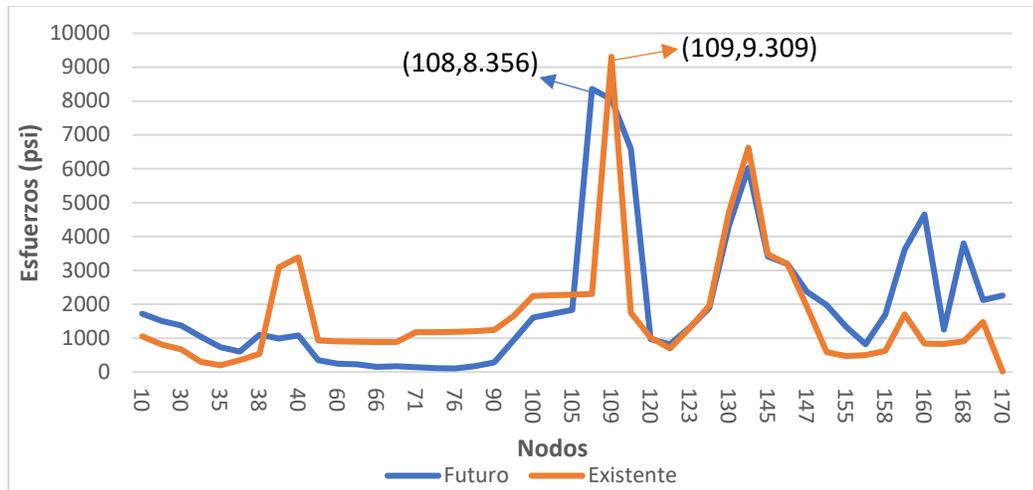


Figura 37: Comparativa caso 2 configuración existente v/s futura.

4.2.3 Caso de carga 3

En un análisis comparativo entre la configuración actual y la futura, representado en la Figura 38 se observa que el esfuerzo máximo en el caso actual es de 11.351 psi, mientras que en la configuración futura es de 11.222 psi, ambos en el mismo nodo.

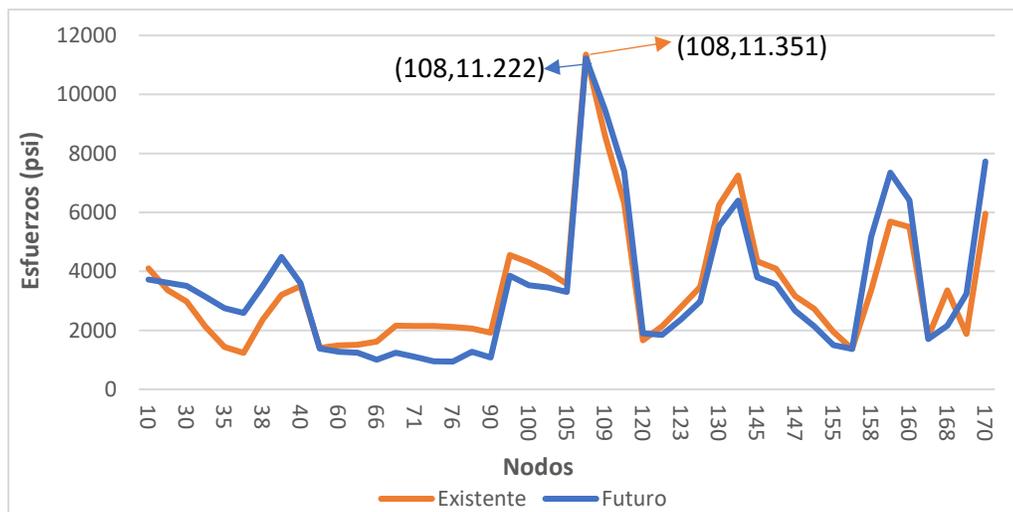


Figura 38: Comparativa caso 3 configuración existente v/s futura.

La observación resultante de esta comparación, representado en la Figura 38, sugiere que la introducción de la válvula al sistema de tuberías no debería generar complicaciones sustanciales. Es importante destacar que hasta el momento no se han registrado problemas relacionados con los

esfuerzos en el sistema actual. Esta comparación proporciona un respaldo adicional a la viabilidad de incorporar la válvula en la línea de tuberías sin comprometer la integridad estructural ni la seguridad del sistema.

4.2.4 Caso de carga 4

A continuación, se exhibe el gráfico comparativo en la Figura 39 entre la configuración actual y la configuración futura con el propósito de mostrar las diferencias en los esfuerzos generados por ambas configuraciones, al igual que en el caso anterior.

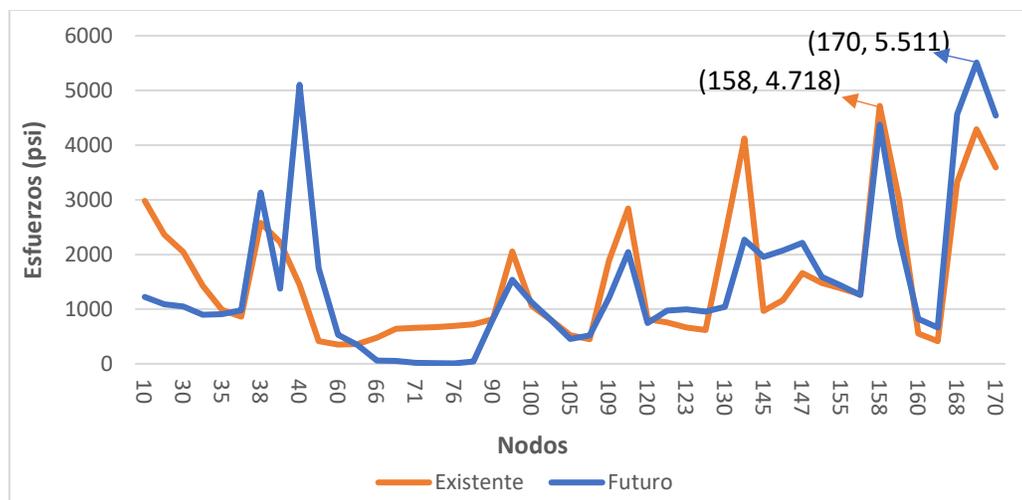


Figura 39: Comparativo caso 4 configuración existente v/s futura.

En el análisis del caso 4, se observan diferencias significativas en los esfuerzos en comparación con la configuración actual. No obstante, es importante destacar que, a pesar de estas variaciones, los esfuerzos obtenidos en este caso no superan los límites de esfuerzos admisibles establecidos para el código ASME B31.3.

4.2.5 Caso de carga 5

En la Figura 40 se presenta un gráfico comparativo entre la configuración actual y la futura para el caso 5, con el propósito de exponer de manera clara las diferencias en los esfuerzos generados por ambas configuraciones. En la configuración futura, el esfuerzo máximo es ligeramente menor que en la configuración actual, donde el máximo se registra en la boquilla del reactor en la configuración futura y en la boquilla de la torre E-100A en la configuración actual. Es importante destacar que, en

ambas configuraciones, los esfuerzos se mantienen por debajo de los límites admisibles, lo que confirma la seguridad y conformidad con el código ASME B31.3.

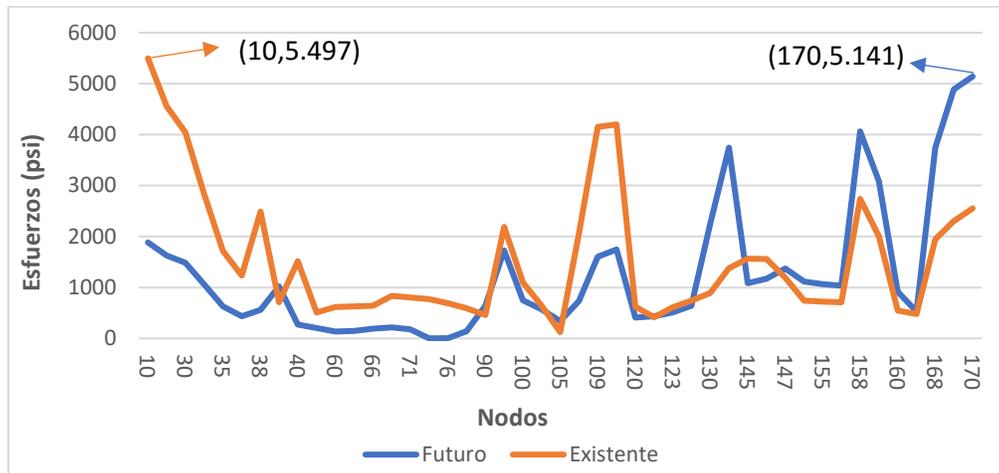


Figura 40: Comparativo caso 5 configuración existente v/s futura.

4.2.6 Resumen de casos de carga configuración actual

A continuación, se presenta en la Figura 41 un resumen de los casos de carga más significativos y sus correspondientes esfuerzos máximos resultantes. Para una comprensión clara y visual de estos esfuerzos, se ha elaborado un gráfico que muestra de manera concisa los valores máximos alcanzados en cada caso de carga, los esfuerzos admisibles para cada caso según ASME B31.3 y el esfuerzo de fluencia del material a la temperatura de 1.025°F según ASME Section II Part D. Es importante destacar que el caso 3 no cuenta con un esfuerzo admisible según el código ASME B31.3. Sin embargo, es posible compararlo con el esfuerzo de fluencia a la temperatura de diseño del material, siempre y cuando se disponga de un factor de seguridad adecuado.

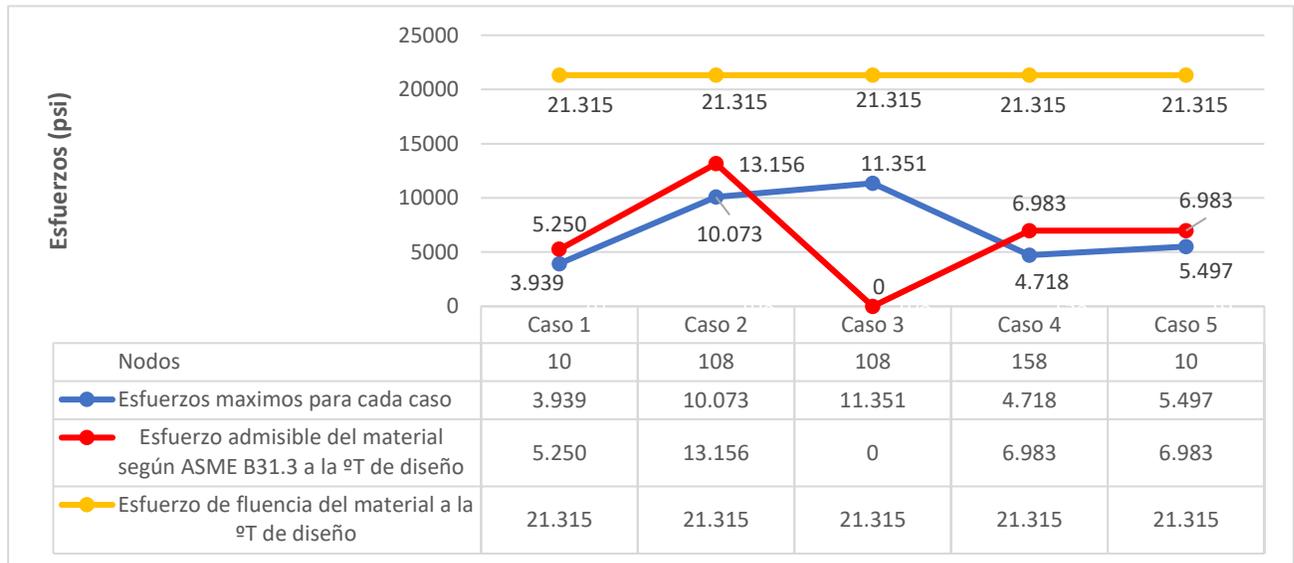


Figura 41: Resumen casos para configuración actual.

En resumen, el caso 3 presenta los esfuerzos más elevados en el análisis. Sin embargo, es esencial destacar que estos esfuerzos se mantienen significativamente por debajo del límite de fluencia del material a la temperatura de diseño en caliente. Un aspecto fundamental a considerar es que la planta ha funcionado de manera confiable durante 56 años sin experimentar fallos o problemas significativos. Esta sólida historia operativa se convierte en un indicador importante que muestra que, a pesar de los esfuerzos altos en el caso 3, la línea de tubería ha demostrado su capacidad para operar exitosa sin sufrir ninguna falla importante.

Esta situación brinda una excelente oportunidad para comparar los esfuerzos actuales con la configuración futura, lo que permitirá evaluar la integridad del sistema.

4.2.7 Resumen de casos de carga configuración futura

Con el objetivo de visualizar de manera clara y concisa los esfuerzos máximos en cada uno de los casos de carga considerados, se ha elaborado el gráfico de la Figura 42. Este gráfico proporciona una representación visual de los valores máximos alcanzados en cada caso de carga, los esfuerzos admisibles para cada caso según ASME B31.3 y el esfuerzo de fluencia del material a la temperatura de 1.025°F según ASME Section II Part D. De esta manera, se puede apreciar de forma clara la relación entre los esfuerzos máximos obtenidos y los límites de seguridad establecidos por las normativas aplicables.

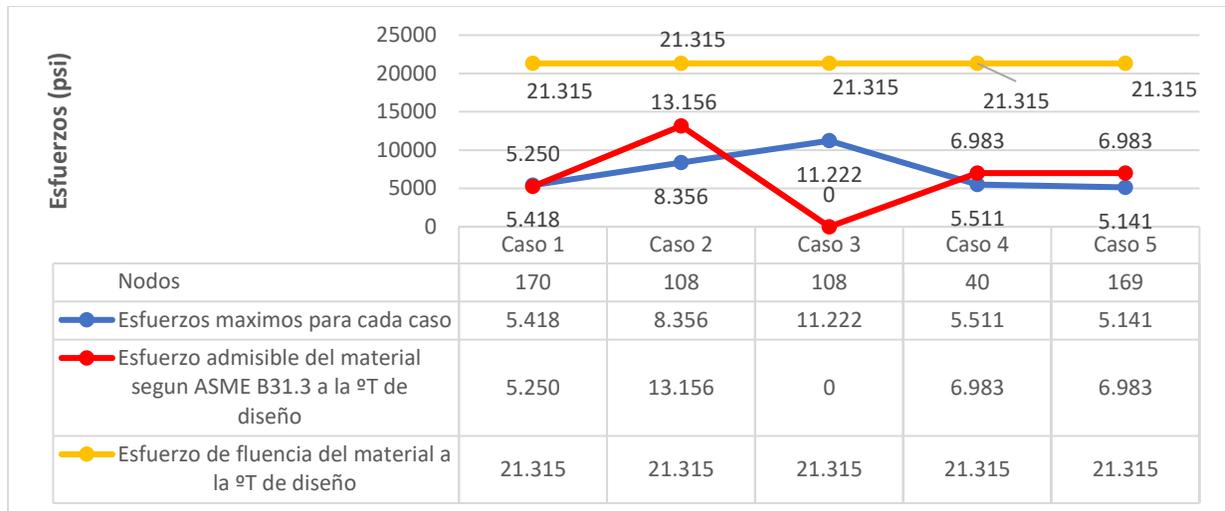


Figura 42: Resumen casos de carga configuración futura.

Considerando los casos 1, 2, 4 y 5, se constata que los esfuerzos se encuentran dentro de los límites admisibles establecidos para cada caso de carga. En el caso 3, si bien no se ajusta a las pautas de la norma B31.3 debido a la consideración de la carga operativa, el resultado es positivo. Es relevante destacar que este esfuerzo representa el 53% del valor de fluencia a la °T de diseño, lo que indica un sólido margen de seguridad en este escenario.

Es fundamental señalar que, durante el análisis realizado a través del software CAESAR II, se tomó en cuenta una uniformidad en el espesor de pared de los codos. Sin embargo, en la práctica, los codos son fabricados con un espesor de pared más sustancial para mitigar los efectos de la corrosión y la erosión en las zonas con mayor turbulencia en el flujo. Si se considera este mayor espesor en los codos, los esfuerzos resultantes experimentan cambios considerables en estos componentes. Esta precisión es esencial, ya que, en general, se ha identificado que los codos son los elementos con los esfuerzos más destacados en los casos 2, 3 y 5 de las cargas evaluadas. En relación a los esfuerzos máximos en las boquillas de los equipos, correspondientes a los casos de carga 1 y 4, se puede verificar que están dentro de los límites admisibles según el boletín WRC-107.

CAPITULO 5: Conclusiones

Este estudio ha llevado a cabo un análisis de la integridad estructural de una línea de tuberías en distintas configuraciones y condiciones de carga. Al comparar los resultados obtenidos mediante el uso del software CAESAR II con los proporcionados por la empresa de ingeniería a través de su software SAMCEF, se ha logrado profundizar la comprensión de los esfuerzos y desplazamientos experimentados por el sistema.

En los casos de carga donde se consideraron factores como el peso de la tubería, el aislamiento, el fluido y la expansión térmica (casos 1, 2 y 3), se ha observado una notable convergencia en los resultados entre ambos análisis. Aunque surgieron discrepancias puntuales, las tendencias generales de los esfuerzos a lo largo de la línea de tuberías han demostrado ser coherentes. Estos hallazgos fortalecen la confiabilidad de las herramientas de análisis empleadas y proporcionan una sólida base para evaluar futuras modificaciones en el sistema.

Vale la pena destacar una distinción fundamental en el enfoque hacia las fuerzas generadas por las cargas sísmicas. Mientras que, el trabajo realizado en CAESAR II adoptó un enfoque estático, la empresa de ingeniería optó por un análisis modal de espectro de respuesta. Esta diferencia podría explicar las discrepancias observadas en los resultados de los casos 4 y 5, donde se identificaron diferencias significativas en las magnitudes de los esfuerzos. Además, es relevante mencionar que el modelo realizado en CAESAR II no incluyó la estructura existente, lo que explicaría la gran disparidad de esfuerzos entre los nodos 50 y 90, donde se ubicaría dicha estructura. También se detectó que la empresa de ingeniería subestimó la temperatura real de diseño del regenerador (300°F versus los 1.400°F reales).

Al analizar los casos 1, 2, 4 y 5, se confirma que los esfuerzos se mantienen dentro de los límites admisibles establecidos para cada carga. En el caso 3, a pesar de no ajustarse estrictamente a las pautas de la norma B31.3 debido a la carga operativa, el resultado es positivo. Es relevante señalar que este esfuerzo representa el 53% del valor de fluencia, lo que denota un sólido margen de seguridad en este escenario.

En relación a la configuración actual, el caso de carga 3 registra los esfuerzos más elevados; no obstante, se mantienen dentro del rango elástico del material a altas temperaturas. Resulta esencial resaltar que la planta ha mantenido un funcionamiento confiable durante 56 años sin experimentar ninguna falla, lo que respalda la solidez de la configuración actual de la línea.

Al comparar con la configuración futura, los esfuerzos máximos permanecen similares e incluso disminuyen en ciertos puntos. Aunque el caso 3 sigue presentando los mayores esfuerzos, estos se mantienen en niveles similares y significativamente por debajo del límite de fluencia, garantizando así una respuesta elástica del material.

Además, queda demostrado que no existen interferencias en términos de desplazamientos entre las tuberías y los equipos cercanos. Esto valida el diseño propuesto, que ha considerado de manera

adecuada los espacios necesarios para evitar cualquier tipo de contacto indeseado entre los componentes del sistema.

En cuanto a la integridad de las boquillas, se ha consultado el boletín WRC-107 para confirmar que los esfuerzos máximos en la configuración futura no superan los presentes en la configuración actual.

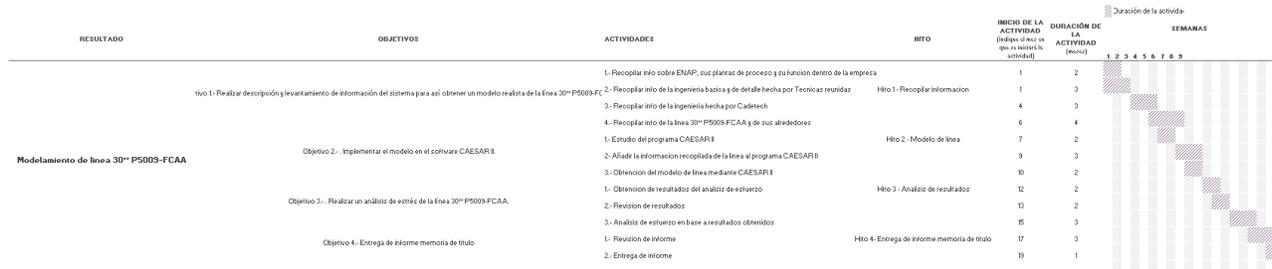
En última instancia, se ha verificado que las bridas de la válvula de aislamiento operan dentro de los límites admisibles, asegurando su desempeño adecuado en el sistema. En conjunto, estos hallazgos respaldan la viabilidad de incorporar la válvula en la nueva configuración y ratifican la continuidad de la seguridad en el sistema de tuberías.

Bibliografía

- Archivo tecnico ENAP. (s.f.). Archivo tecnico. *Diagrama de bloque de ENAP*. Chile.
- Cadetech. (2020). *Anexo 01: Resultados propuesta final*. Concepción.
- Cadetech. (2020). *SERVICIO ANÁLISIS LÍNEA 30-P-5009 NORMA NCH2369*. Concepción.
- Earth, G. (2023). <https://www.google.com/intl/es/earth/>.
- ENAP. (2016). *Combustibles producidos por ENAP*. Obtenido de <http://www.cpcbiobio.cl/wp-content/uploads/2016/10/Combustibles-Producidos-por-Enap.pdf>
- ENAP. (2020). www.enap.cl. Obtenido de <https://www.enap.cl/pag/509/1572/descripcion#:~:text=La%20Empresa%20Nacional%20del%20Petr%C3%B3leo,19%20de%20junio%20de%201950>.
- ENAP. (2020). www.enap.cl. Obtenido de <https://www.enap.cl/pag/92/998/refinacion#:~:text=Tiene%20una%20capacidad%20de%20d%20estilaci%C3%B3n,est%C3%A1ndares%20m%C3%A1s%20exigentes%20del%20mundo>.
- ENAP. (s.f.). *Refinación y Comercialización (R&C) ENAP*. Obtenido de https://www.enap.cl/pag/95/892/refineria_biobio
- Gobierno de Chile, M. d. (2019). *Informe Balance Nacional de Energía 2019*.
- Gómez, B. G. (2014). *análisis y cálculo de un sistema de tuberías de una planta petroquímica*.
- Hibbeler, R. C. (s.f). *Mecánica de materiales*.
- Leprince, P. (2001). *Petroleum refining. Vol 3 Conversion processes*.
- (2003). *NCh2369-2003*.
- Peng, L.-C. (2009). *Pipe stress engineering*. Houston, Texas, USA.
- Sadeghbeigi, R. (2012). *Fluid Catalytic Cracking Handbook*.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2014). *ASME B31.3 Code for Pressure Piping and Process Piping*.
- Torres Burgos, M. H. (2018). *Análisis de la operación y determinación de rendimientos de la Unidad de Cracking Catalítico De ENAP Refinería Bío Bío utilizando Aspen HYSYS®*.

Anexo A

Anexo A1: Carta Gantt



Anexo B

Anexo B1: Diagrama de Bloques de plantas en ENAP Bío Bío

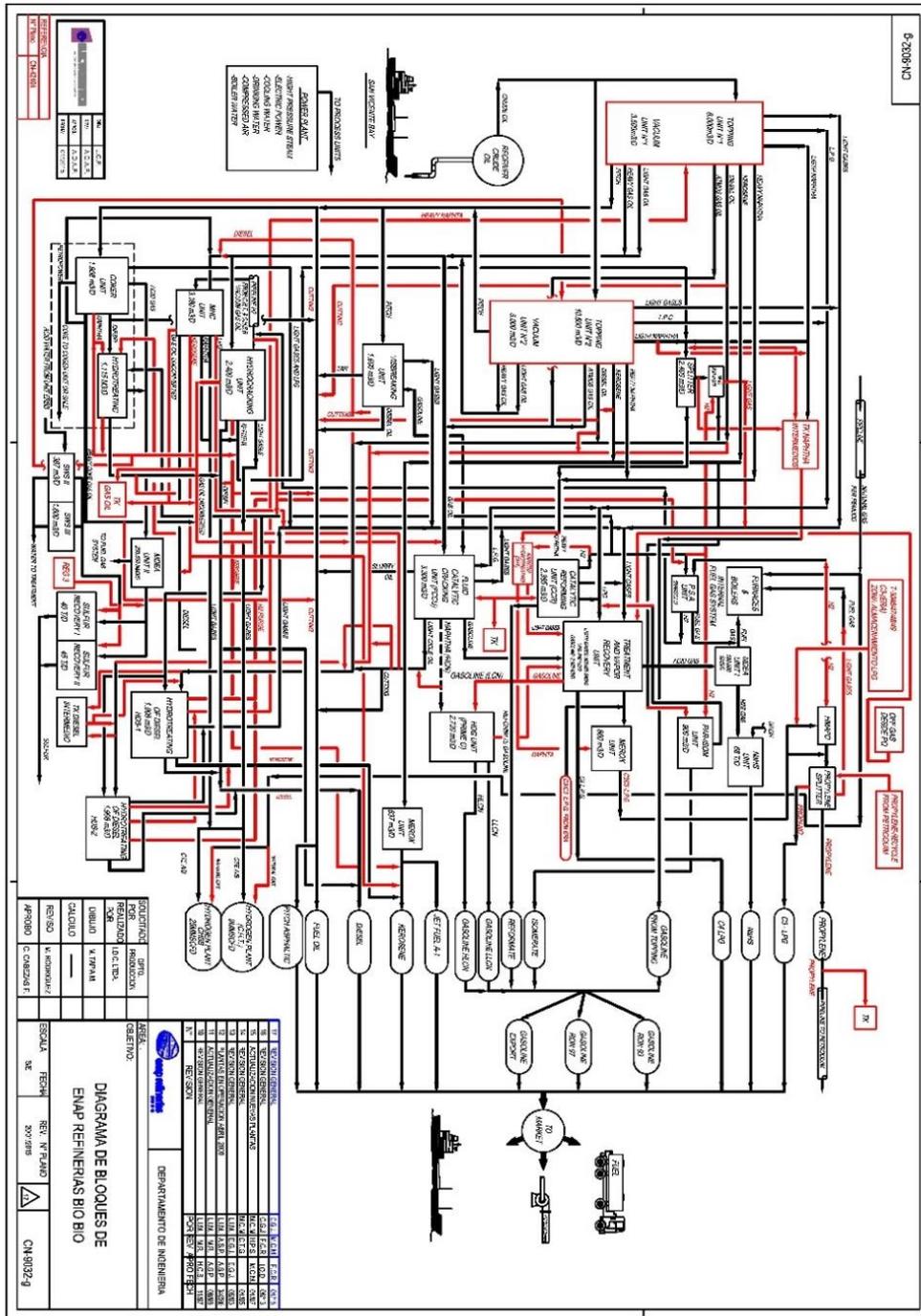


Figura 43: Diagrama de Bloques de plantas en ENAP Bío Bío (Archivo tecnico ENAP).

Anexo B2: Información de PI System

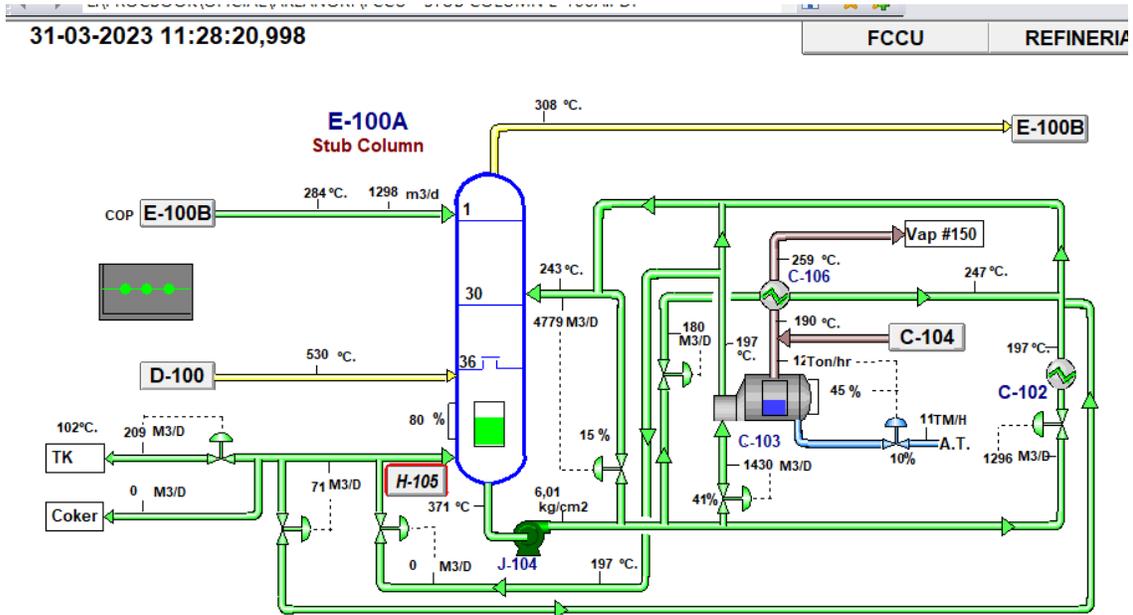


Figura 44: Resultados PI System E-100A.

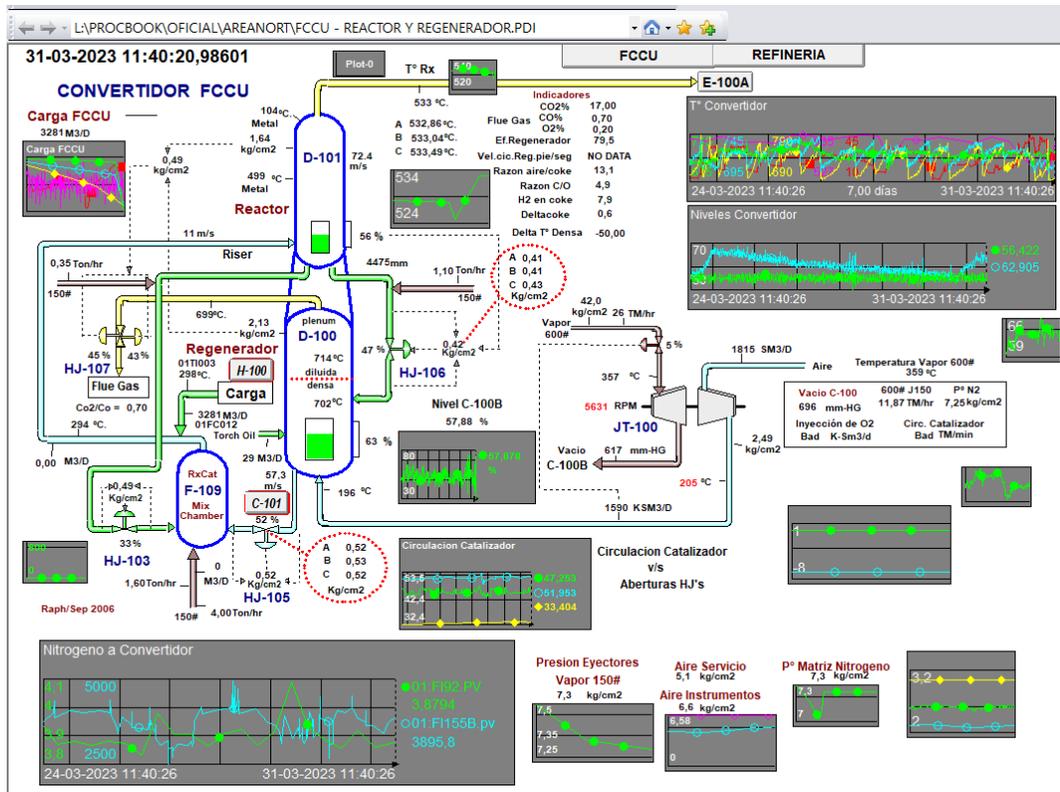


Figura 45: Resultado PI System Convertidor.

Anexo C

Anexo C1: Descripción de procesos

Empresa Nacional Del Petróleo

La Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) fue creada el 19 de junio de 1950 mediante la Ley Orgánica N° 9.618 como empresa estatal chilena, su principal objetivo es la explotación, producción, refinación y comercialización de petróleo, gas y sus derivados, así como la generación de energía eléctrica.

Refinería Bío Bío

La Refinería ENAP Bío Bío se encuentra ubicada en la comuna de Hualpén, en la región del Bío Bío. Fue construida por The Lummus Company y comenzó sus operaciones el 29 de julio de 1966. La construcción de esta refinería fue necesaria para satisfacer la demanda nacional de combustibles. En la Figura 46 se puede ver el recinto de ENAP Refinería Bío Bío.

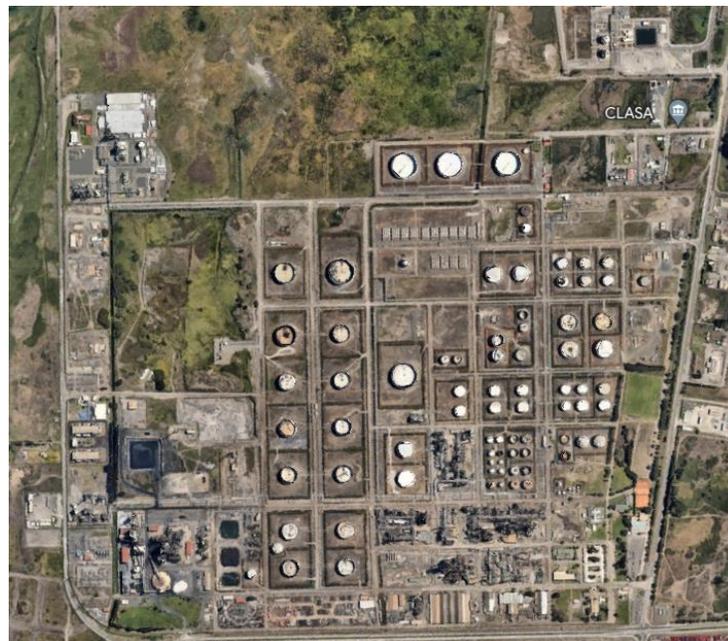


Figura 46: Refinería ENAP refinería Bío Bío (Earth, 2023).

La refinería tiene una capacidad de destilación de 116.000 barriles por día y su producción principal incluye etileno, propileno, propano butano, gasolinas, keroseno de aviación, petróleos diésel, petróleos combustibles, pitch asfáltico, coke, sulfhidrato de sodio y azufre. Procesa un promedio anual de 6,4 millones de metros cúbicos de materias primas y produce un total de 4,5 millones de metros cúbicos de productos valiosos al año.

Plantas de proceso en ENAP Refinería Bío Bío

ENAP Refinería Bío Bío se abastece de petróleo crudo a través del Terminal Marítimo de San Vicente, mediante el transporte marítimo. Después de su arribo, el crudo se deposita en estanques ubicados en el interior del recinto de la refinería, donde se procesa en las distintas unidades y equipos de la planta.

Para asegurar un suministro ininterrumpido de crudo y una distribución eficiente de los productos refinados, la refinería cuenta con una red de ductos que la conectan con el terminal petrolero de San Vicente, así como con las compañías distribuidoras de combustibles.

Para obtener los productos finales requeridos por el mercado interactúan distintas plantas, las cuales se clasificarán y definirán para conocer su funcionamiento.

- **Separación de productos primarios derivados del crudo (Topping y Vacío)**

Corresponde al primer tratamiento del crudo, el cual es sometido a destilación atmosférica y a vacío. Esta área comprende las unidades de Topping I, Topping II, Vacío I, Vacío II, Viscosreductora y Tratamiento de Solventes.

Luego del almacenamiento del crudo en estanques, donde sedimenta y drena el agua que contiene, este es transportado hacia las torres de fraccionamiento. En estos equipos se separa el petróleo crudo a presión atmosférica a partir de la volatilización diferida de los múltiples hidrocarburos que lo conforman. De este primer proceso se obtienen: gas licuado de petróleo (butano y propano), gasolina ligera y pesada (nafta), keroseno, gasóleo (diesel), fuel oíl y residuos viscosos. En una segunda etapa de destilación, los residuos son nuevamente calentados pero esta vez a presión de vacío, con esto se logra extraer más de los productos mencionados, además de asfaltos y coker (combustible de alto poder calorífico).

- **Síntesis de hidrocarburos nobles y depuración de los productos**

Estos procesos se emplean para generar productos de mejor calidad y reducir la presencia de compuestos contaminantes en los productos derivados del petróleo crudo. Consisten en nuevas

combinaciones de átomos de carbono y de hidrógeno, deshidrogenación, isomerización y reformación debido a la acción de diferentes estados de temperatura, presión y catalizadores. Las plantas que cumplen estas tareas son: Reformación Catalítica, Visbreaker, Hidrocracking, Coquización Retardada y el Cracking Catalítico.

Además de estas dos grandes operaciones existen procesos secundarios que aseguran el funcionamiento de la refinería, como las plantas de suministros (electricidad, gas, vapor y agua), los equipos que conforman la red de seguridad contra incendio, las plantas de movimiento de producto y los laboratorios de control de calidad.

Funcionamiento del Cracking Catalítico (FCCU)

El craqueo o “cracking” catalítico es un proceso de refinación del petróleo que consiste en la descomposición térmica de hidrocarburos pesados (rotura de enlaces carbono-carbono) en presencia de un catalizador.

El rol del FCCU es tomar materias primas pesadas, desulfuradas y craquearlas en materiales más livianos, principalmente gasolina de alto número de octano. El FCCU también produce olefinas y GLP.

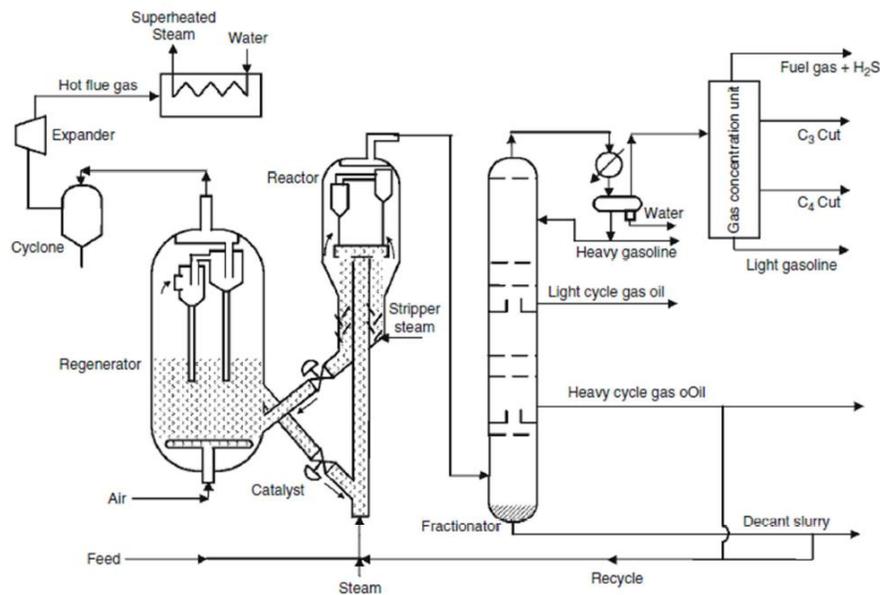


Figura 47: Diagrama de Cracking Catalítico.

En la Figura 47 se puede observar que el proceso está integrado por tres componentes principales: un reactor, un regenerador de catalizador y un separador o fraccionador de productos. Debido a que la circulación del catalizador es constante, es comúnmente conocido como "Convertidor" al conjunto

formado por el reactor y el regenerador. Por otro lado, la etapa de separación consta de una fraccionadora y una unidad encargada de la recuperación de gases.

Las unidades de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCCU, por sus siglas en inglés) son comúnmente diseñadas para procesar gas oil proveniente de la columna atmosférica, la torre de vacío o la unidad de Coker, tras haber pasado por un proceso de hidrotratamiento. Para ello, las diferentes cargas se combinan y son enviadas a un acumulador con el fin de proveer un flujo constante a las bombas de carga. Posteriormente, la carga es precalentada mediante el uso de intercambiadores de calor que aprovechan las corrientes de alto contenido calórico provenientes del fraccionador principal.

La carga o materia prima es introducida (atomizada) en la base del riser y entra en contacto con el catalizador regenerado. La mezcla de catalizador y vapores de hidrocarburos reacciona mientras es transportada a lo largo del reactor riser.

La reacción de craqueo produce gases livianos como gasolina de alto octanaje, productos más pesados llamados aceites cíclicos ligeros (LCO o “light cycle oil”), aceites cíclicos pesados (HCO o “heavy cycle oil”), y aceite de recicló. También deja una capa de coque sobre las partículas del catalizador, desactivándolas y haciendo necesaria su regeneración.

Para visualizar de manera más clara y detallada las diferentes partes que conforman al convertidor, se recomienda ver la Figura 48.

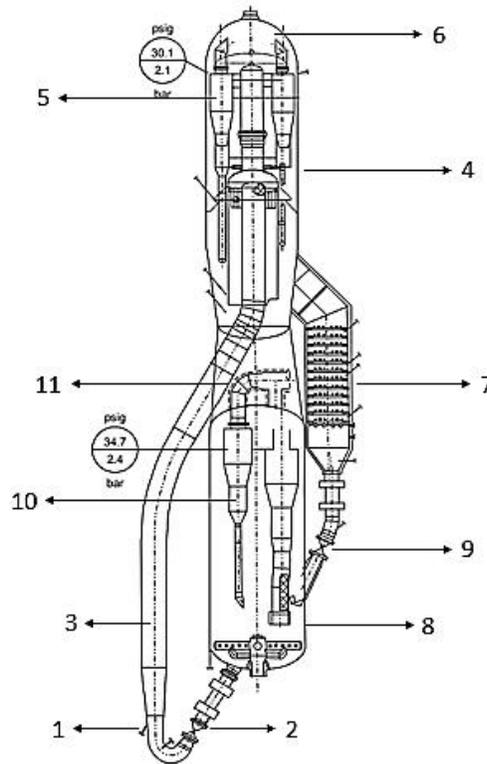


Figura 48: Unidad FCC configuración Stacked de UOP (Sadeghbeigi, 2012).

Donde:

- | | | | |
|----|-----------------------------------|-----|---------------------------------|
| 1: | Boquilla de alimentación | 7: | Stripper de catalizador agotado |
| 2: | Válvula de catalizador regenerado | 8: | Regenerador |
| 3: | Riser del reactor | 9: | Válvula de catalizador agotado |
| 4: | Reactor | 10: | Ciclones del regenerador |
| 5: | Ciclones del reactor | 11: | Plenum del regenerador |
| 6: | Plenum del reactor | | |

El producto de este proceso se va directo desde el reactor hacia la torre de separación. Su función principal es separar los diferentes productos generados durante el proceso de craqueo catalítico. En esta torre, se lleva a cabo la separación de los gases livianos, la gasolina de alto octanaje, los aceites cíclicos ligeros y pesados, y el aceite de recicló.

La torre separadora utiliza principios de destilación para separar los componentes según sus diferentes puntos de ebullición. Los vapores y gases generados en el reactor pasan a través de la torre, donde se produce una serie de etapas de condensación y evaporación. A medida que los vapores ascienden por la torre, los componentes más pesados se condensan y se recogen en los niveles inferiores, mientras que los componentes más livianos continúan ascendiendo hacia la parte superior de la torre.

En la parte superior de la torre, se obtiene la gasolina de alto octanaje, que es un producto valioso en la industria de los combustibles. Los aceites cíclicos ligeros y pesados se recogen en los niveles intermedios de la torre, y posteriormente se pueden utilizar para diferentes aplicaciones, como combustibles o como materia prima en otros procesos de refinación. El aceite de recicló se recoge en la parte inferior de la torre y se devuelve al reactor para su reutilización en el proceso de craqueo catalítico.

El cracking catalítico es una operación de baja presión, y la mayoría de los reactores FCC operan en el rango de 20 psi a 35 psi. El regenerador se mantiene a una presión ligeramente superior. La columna fraccionadora opera a una presión diferencial menor que la salida del reactor. Las temperaturas típicas del reactor varían desde 896°F a 1.022 °F (480 a 550 °C), mientras que las del regenerador están por encima de los 1.274 °F (690 °C) para las unidades convencionales y arriba de 1.508 °F (820 °C) para las unidades que procesan residuos pesados.

Planta FCCU en ERBB

La planta FCCU de la refinería Bío Bío fue una de las primeras unidades en entrar en funcionamiento, desde su puesta en marcha en 1966. Esta unidad tiene una capacidad de diseño de 3.300 m^3 /día.

El proceso de la planta FCCU se puede resumir de la siguiente manera: la materia prima utilizada proviene de diversas fuentes, como las torres de vacío I y II, el Coker, el Hidrocracking y el estanque. Estos componentes se combinan en el acumulador de carga F-102 para proporcionar un flujo constante a las bombas de carga. Luego, la carga se precalienta mediante el reflujo de la fraccionadora E-100A. El flujo de carga y vapor ingresa al riser y entra en contacto con el catalizador.

Posteriormente, el flujo de vapor craqueado y el catalizador ascienden por el riser y se descargan centrífugamente en un plano horizontal, separando gran parte del catalizador gastado en la cámara de separación ubicada en el reactor D-101. Los vapores resultantes de la cámara se dirigen hacia la Stub Column E-100A, mientras que el catalizador separado descende hacia el regenerador, donde se calienta para su reutilización en el ciclo.

La torre E-100A es una columna de destilación especialmente diseñada para separar los hidrocarburos en diferentes fracciones, según sus puntos de ebullición y propiedades físicas. Dentro de la torre, se lleva a cabo un proceso de destilación en el cual los hidrocarburos ingresan por la parte inferior y se someten a un calentamiento gradual. A medida que los componentes se calientan, se evaporan y ascienden a través de la columna.

Anexo C2: Diagrama con temperatura y presión de diseño en base a PI System

Para una mejor comprensión de las temperaturas y presiones de diseño de la planta, se recomienda ver la Figura 49, donde se presentan estos valores verificados utilizando el software PI System, proporcionando una visualización más completa de la configuración de la planta.

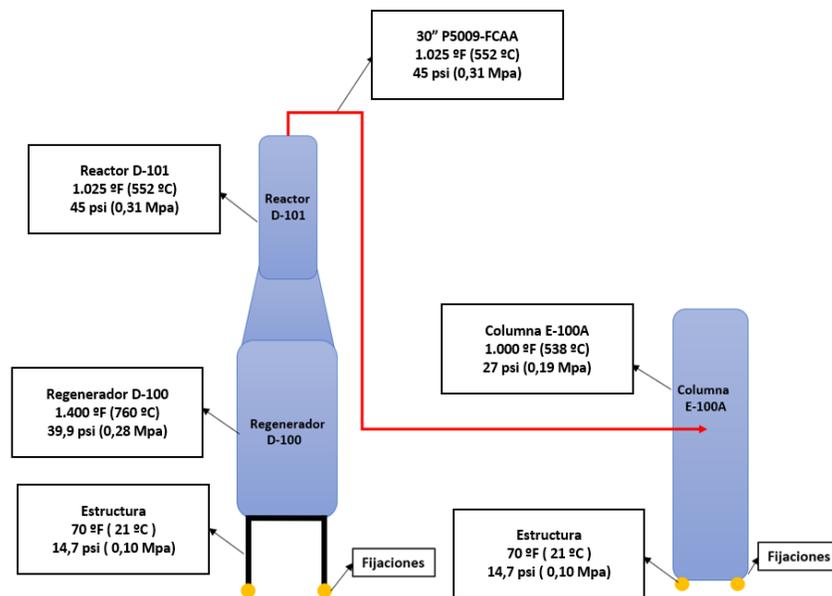


Figura 49: Diagrama simplificado planta FCCU con temperaturas de diseño.

Anexo D

Anexo D1: Isométricos de la línea

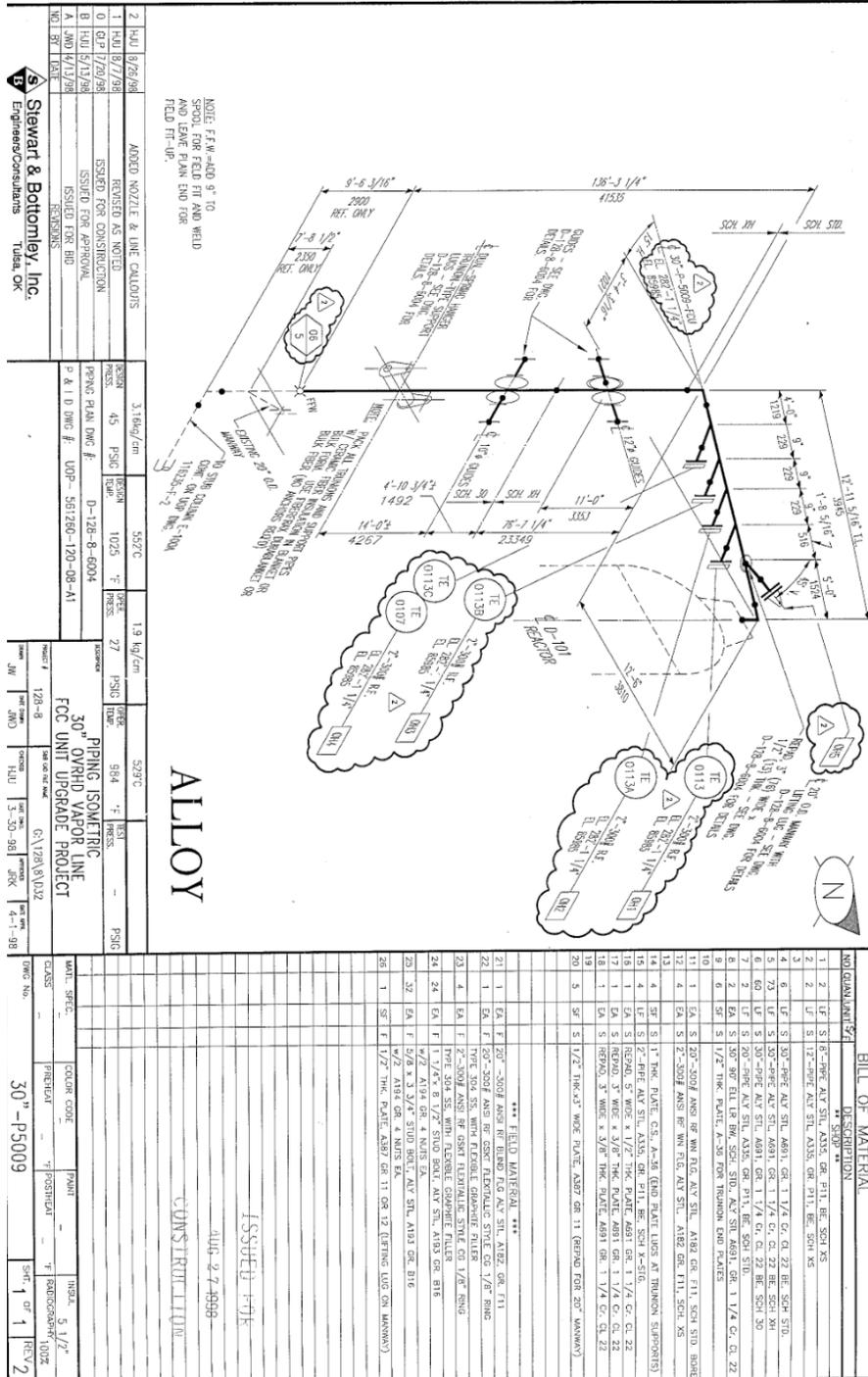


Figura 50: Isométrico 1.

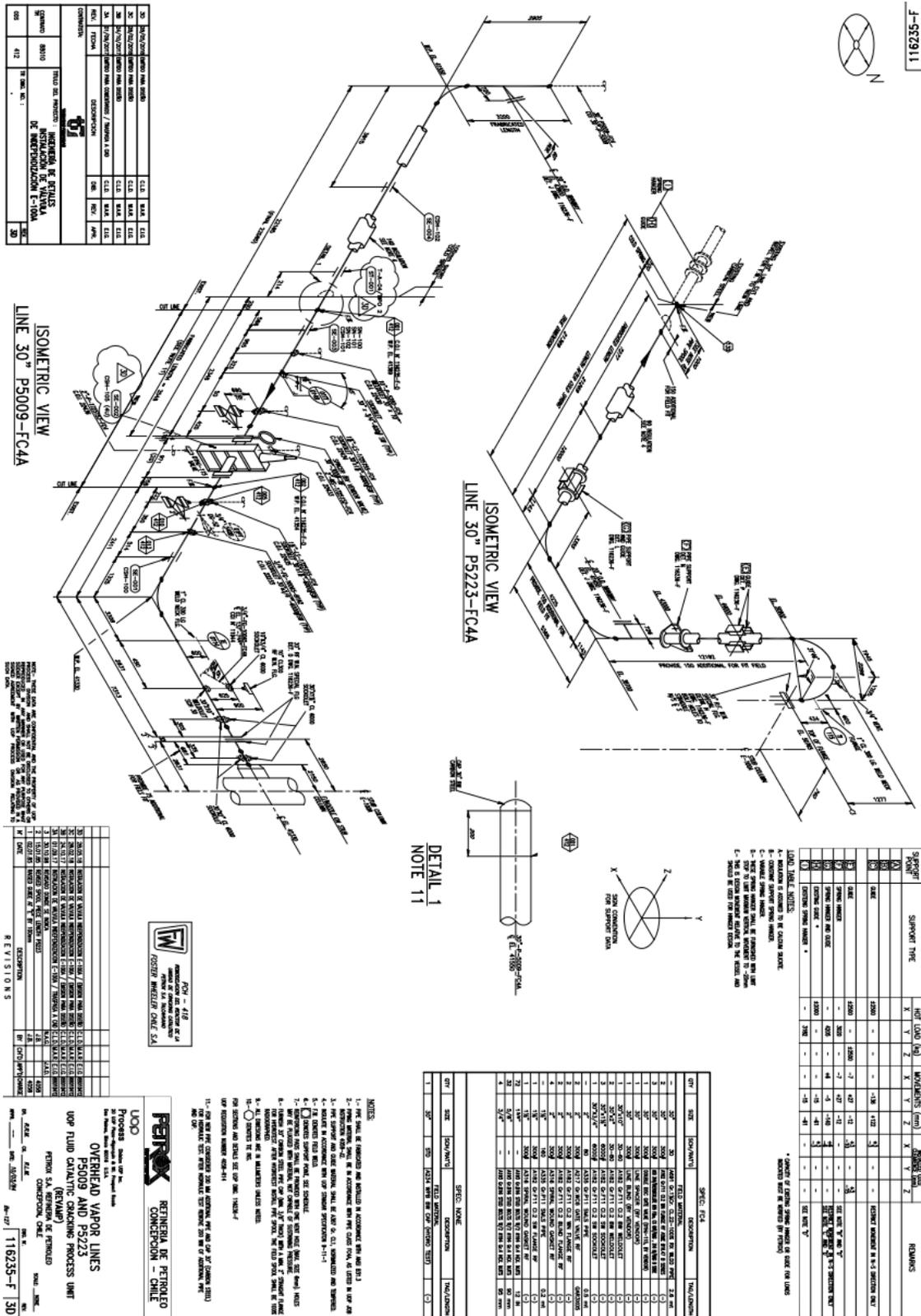


Figura 51: Isométrico 2.

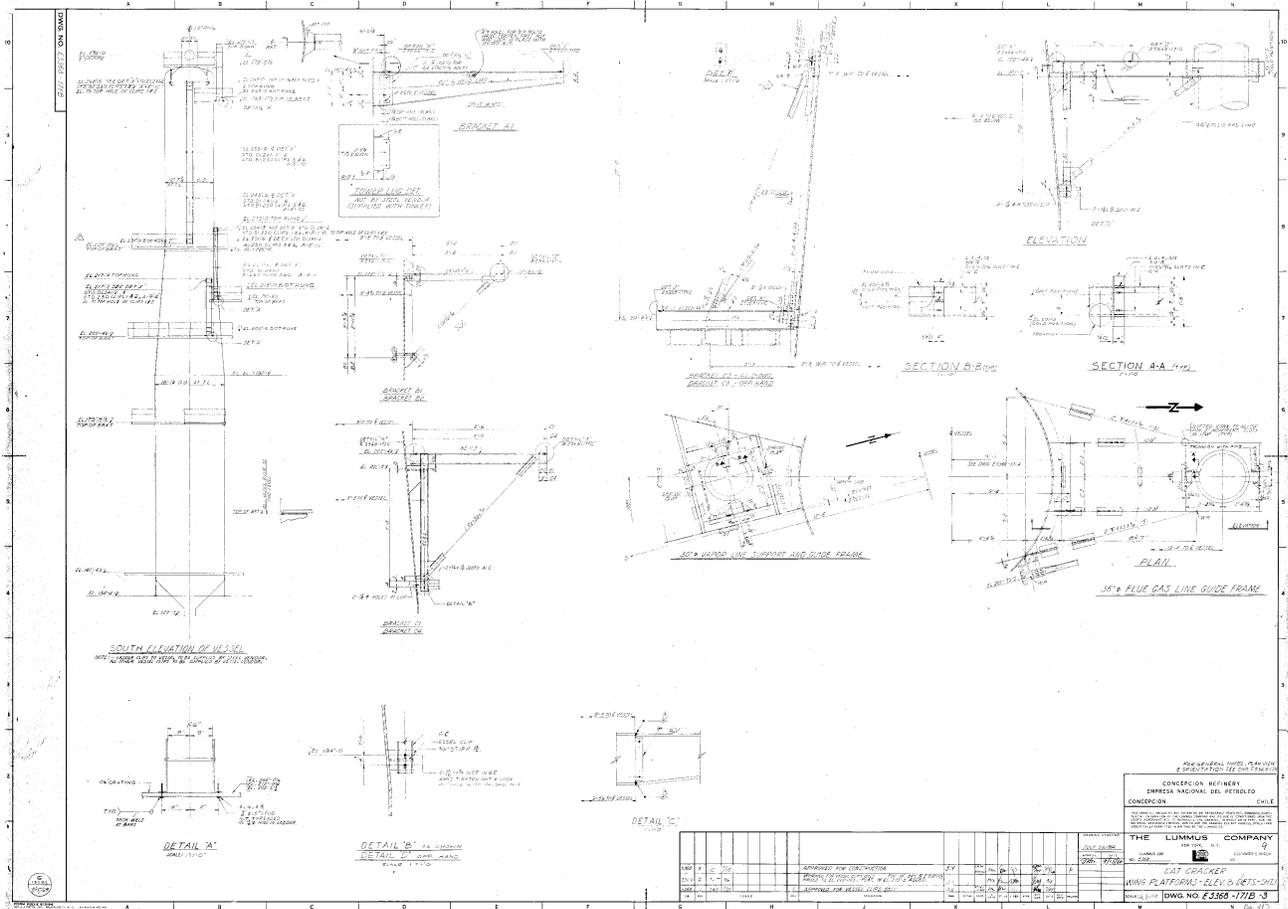


Figura 53: Plano del Convertidor.

Anexo D3: Soportes.

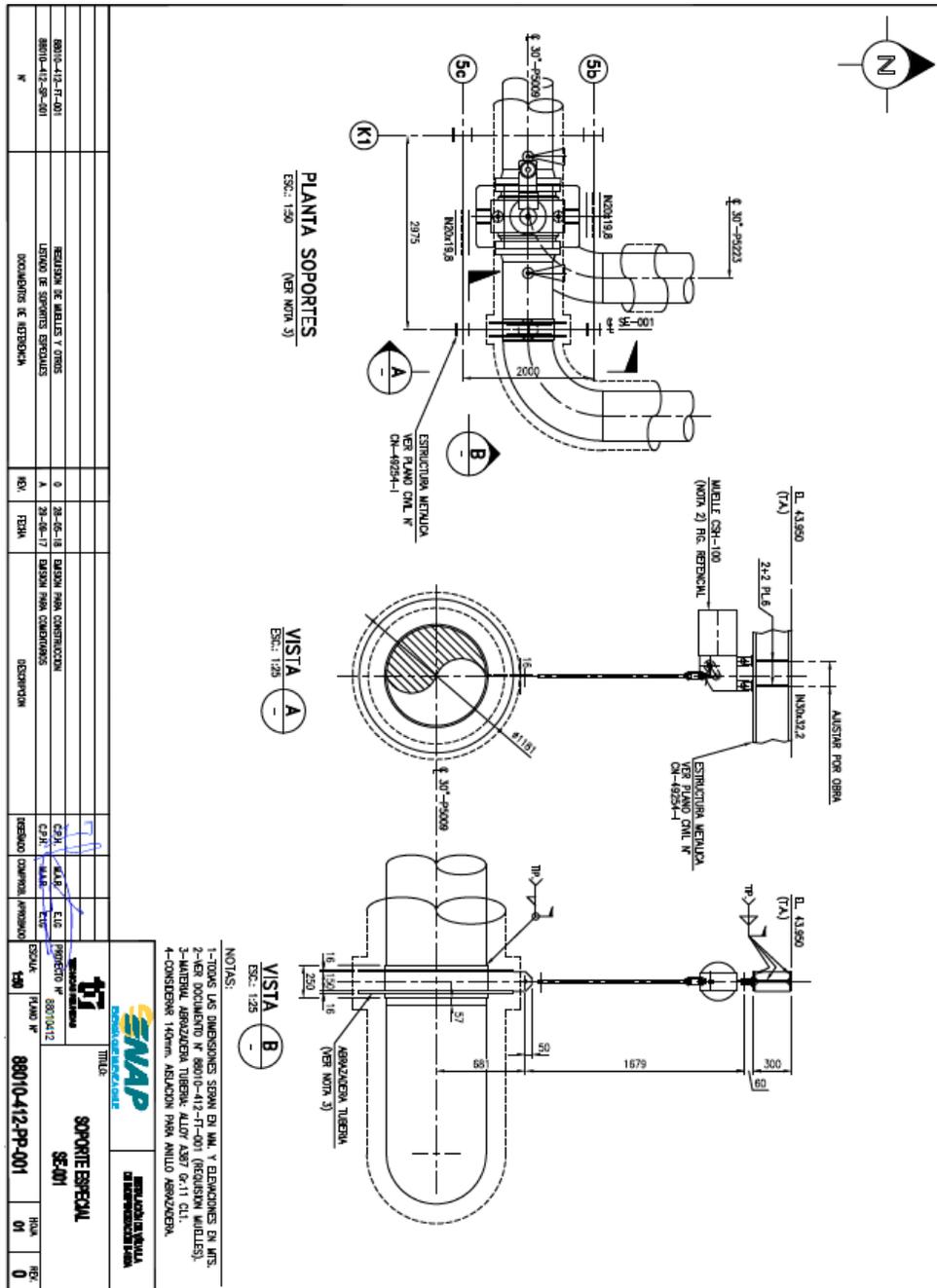


Figura 54: Plano soporte SE-001.

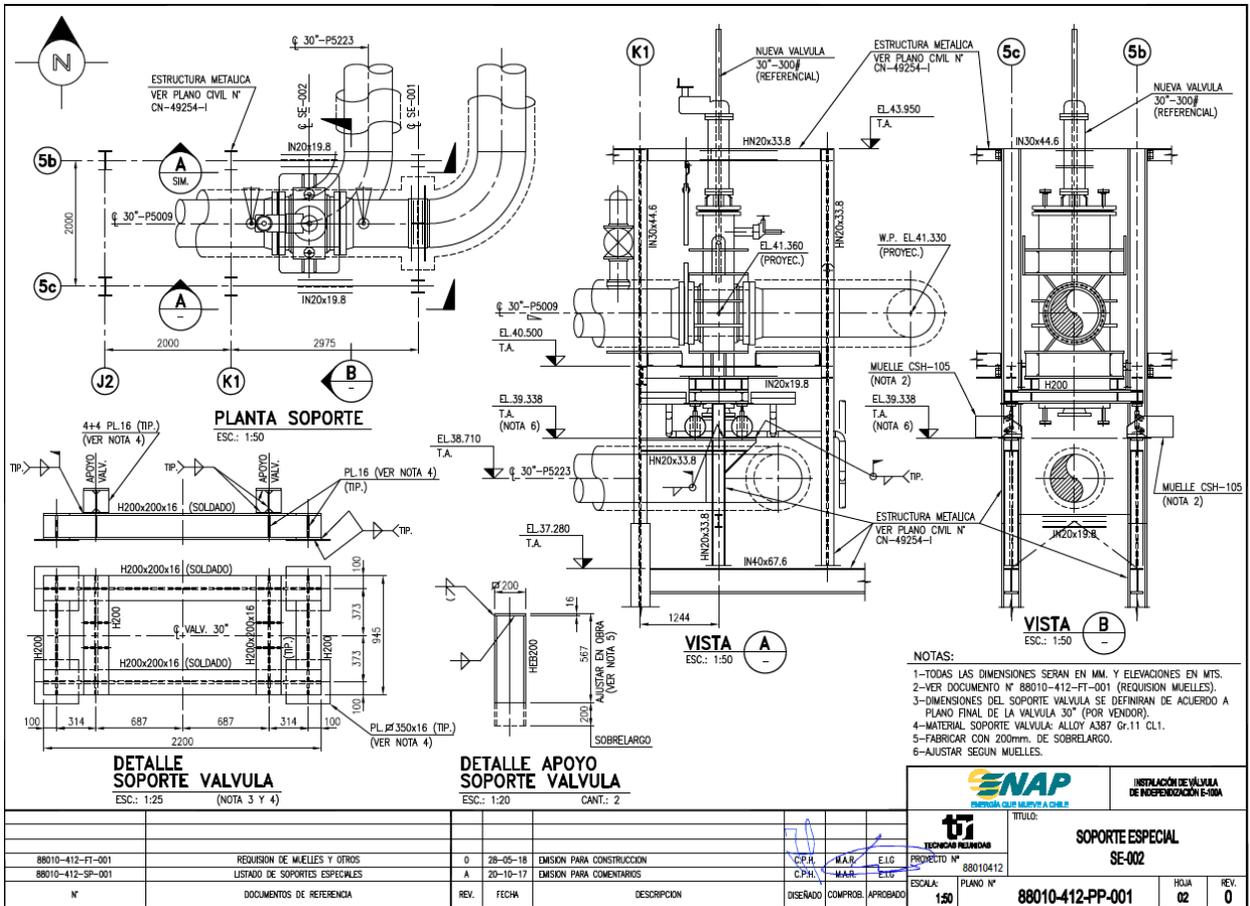


Figura 55: Plano soporte SE-002.

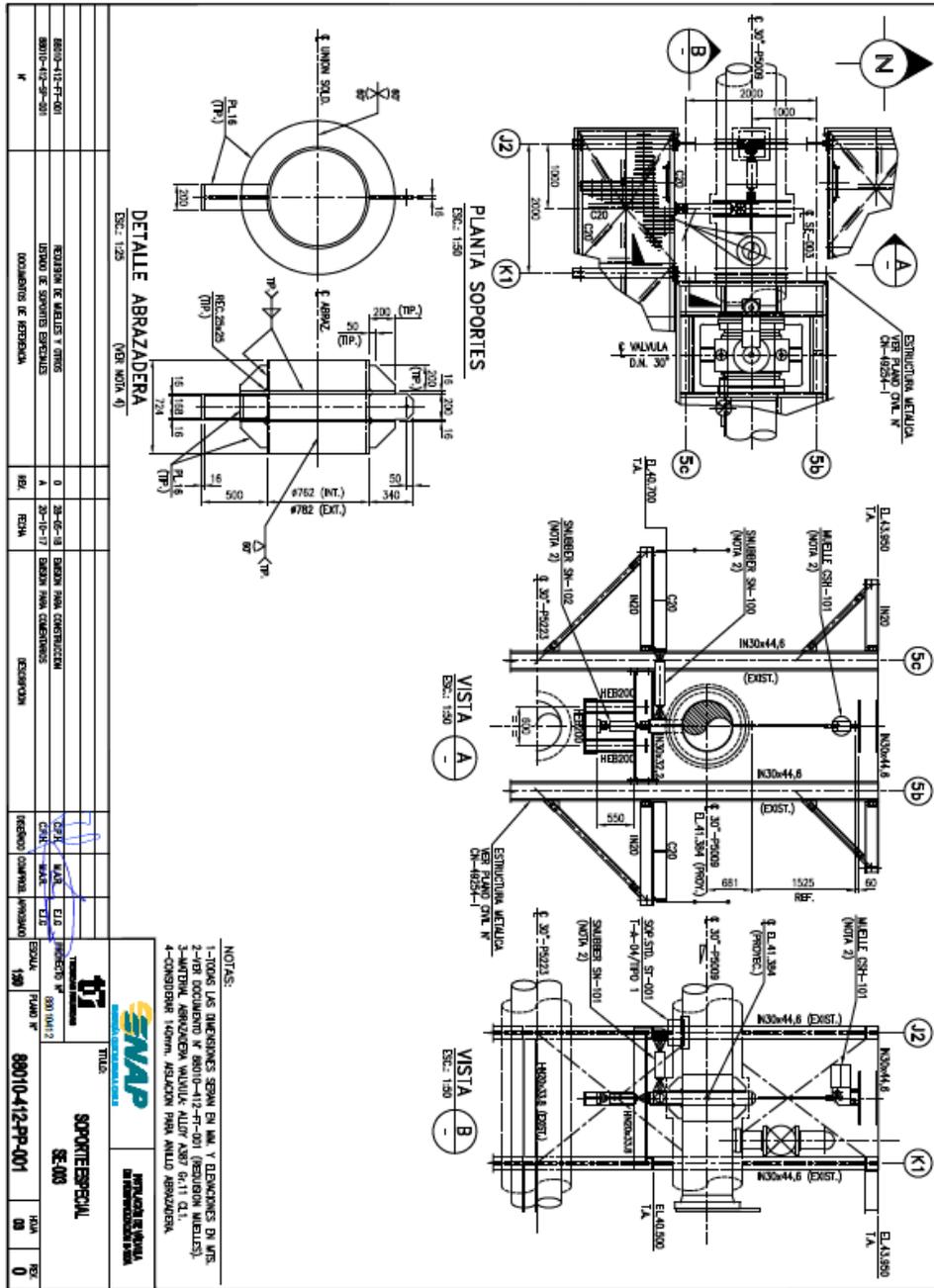


Figura 56: Plano soporte SE-003.

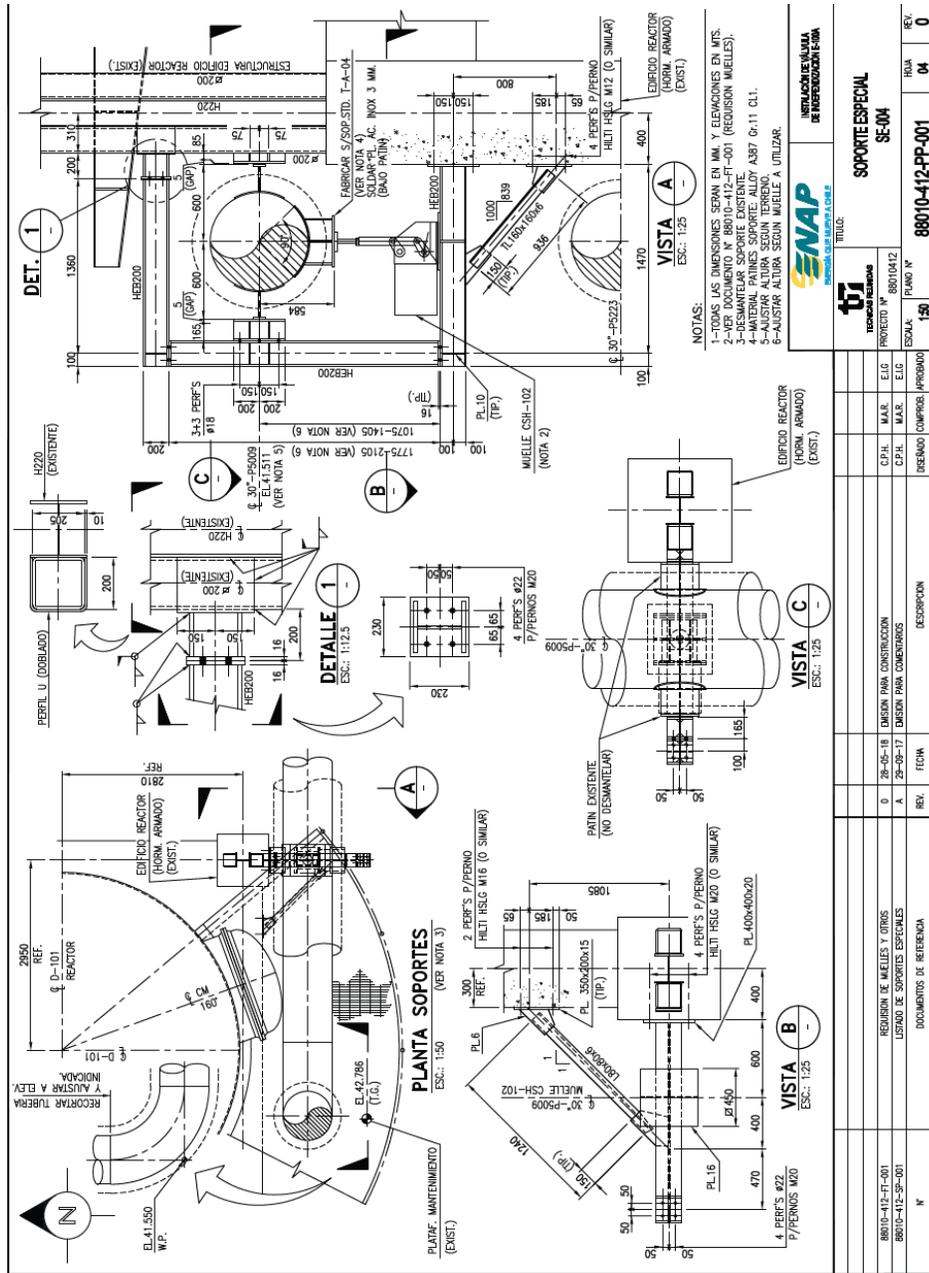


Figura 57: Plano soporte SE-004.

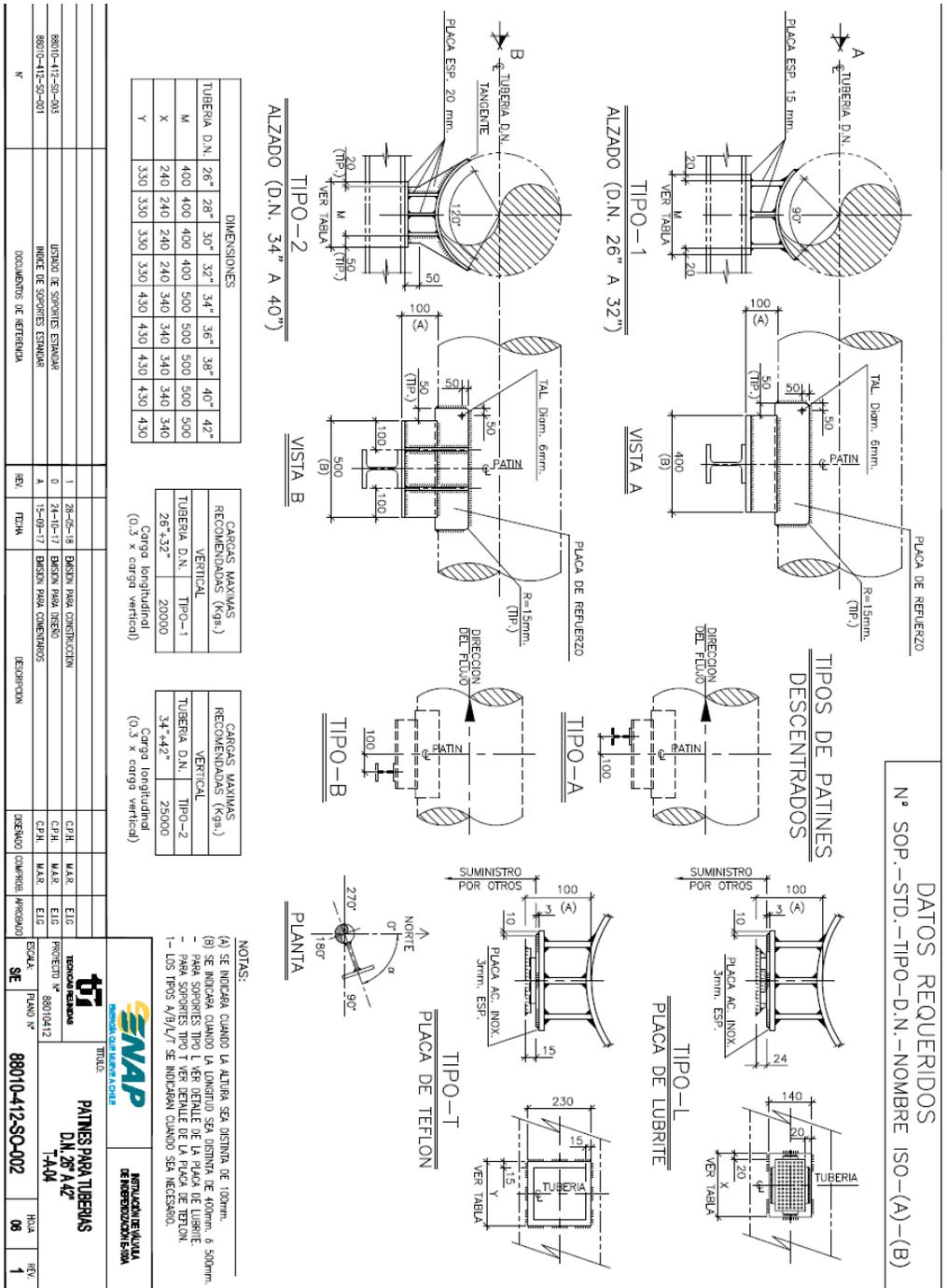


Figura 58: Plano soporte ST-001.

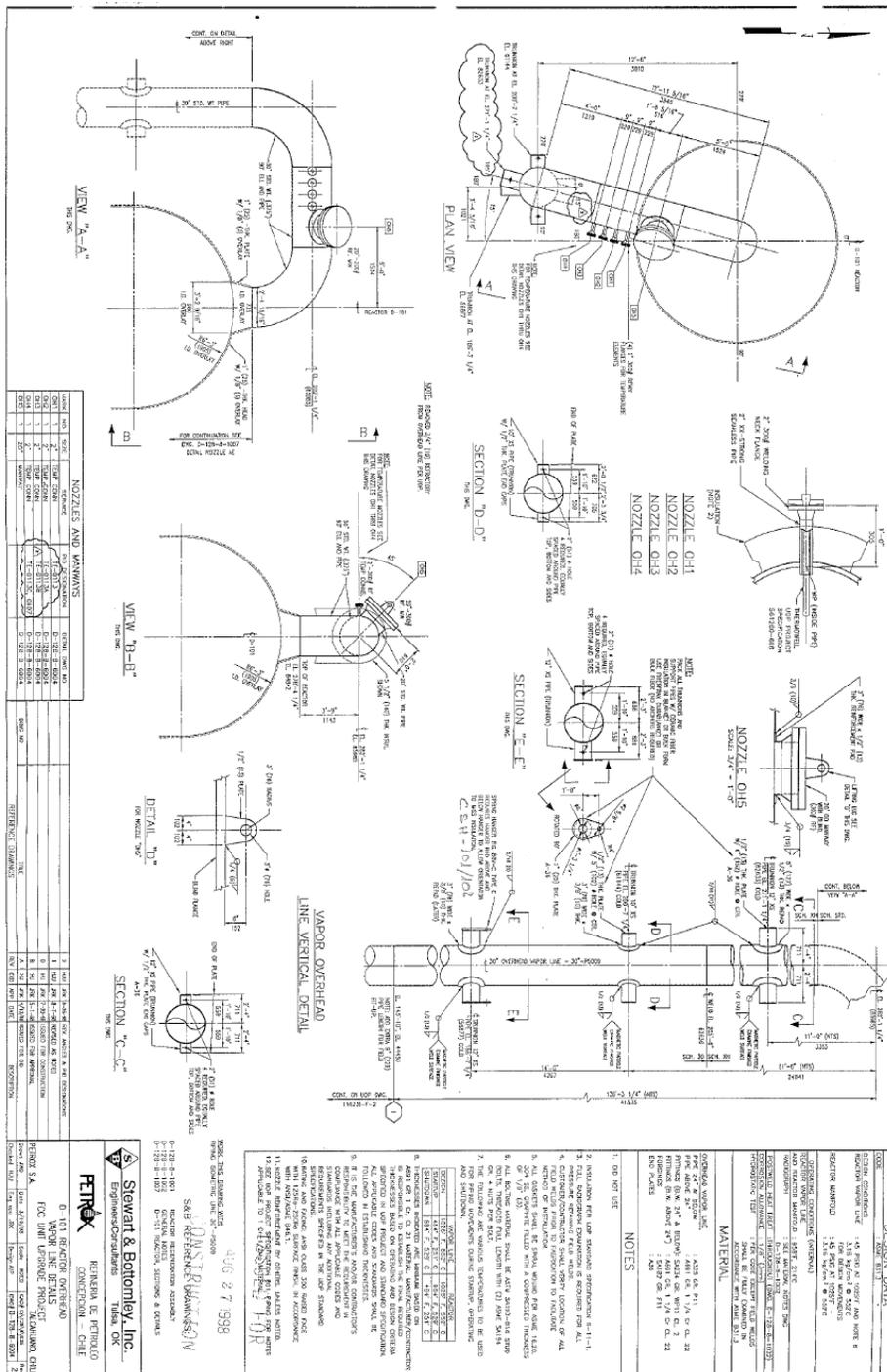


Figura 59: Plano soportes E-3, E-4 y E-5.

Anexo E

Anexo E1: Casos de carga

Tabla 8: Casos de carga.

Caso	Combinación de cargas	Esfuerzo admisible para cada caso de carga
Caso 1	Peso total	5.250 psi
Caso 2	Expansión térmica	13.156 psi
Caso 3	Peso total + Presión + Expansión térmica	-
Caso 4	Peso total + $S_a X$ (sismo horizontal en dirección X)	6.983 psi
Caso 5	Peso total + $S_a Z$ (sismo horizontal en dirección Z)	6.983 psi

Anexo E2: análisis de configuración actual

Resultados configuración actual

Para garantizar una simulación precisa del modelo, se consideró el desplazamiento relativo de los soportes y guías ubicados en las proximidades del reactor D-101. Se tuvieron en cuenta los desplazamientos del punto más cercano entre reactor y soporte, lo cual proporciona una representación más exacta de la interacción entre los componentes del sistema. En la Tabla 9 se muestran detalladamente los desplazamientos, donde se puede observar el vector 1 correspondiente al caso de carga 3, el vector correspondiente al caso de carga 4 y el vector 3 correspondiente al caso de carga 5. Para el caso 2, se empleó un movimiento similar al utilizado en el caso 3.

Los soportes en el sistema de tuberías existente están numerados del 1 al 5, como se puede observar en la Figura 18.

Tabla 9: Desplazamientos relativos en soportes y guías configuración existente.

Desplazamientos	Nodo 150 (soporte E-5)			Nodo 140 (soporte E-4)		
	Vector 1	Vector 2	Vector 3	Vector 1	Vector 2	Vector 3
Dx (in)	-0,1100	1,1400	-0,0108	-0,0469	0,5900	-0,0027
Dy (in)	16,014	-0,0223	-0,0224	8,548	-0,0186	-0,0197
Dz (in)	-0,0529	-0,0015	1,0772	-0,0227	-0,0006	0,5635

Para la representación visual de los resultados tanto en la configuración actual como en la futura, se emplean mapas de color que se definen en función de los esfuerzos generados. En la Tabla 10 se especifican los colores asignados a los diferentes rangos de valores de esfuerzos.

Los esfuerzos presentados en las gráficas han sido calculados de acuerdo con el código ASME B31.3.

Tabla 10: Valor de colores para esfuerzos.

Color	Esfuerzo (psi)
	Valor < 1.000
	1.000 < Valor ≤ 5.250
	5.250 < Valor ≤ 6.983
	6.983 < Valor ≤ 10.000
	10.000 < Valor ≤ 12.000
	Valor > 12.000

Caso de carga 1

A continuación, en la Figura 60, se presenta una representación visual de los esfuerzos. Esta representación gráfica permite una mejor comprensión de la distribución de los esfuerzos en el sistema de tuberías, facilitando la identificación de las zonas con mayores y menores niveles de esfuerzo.

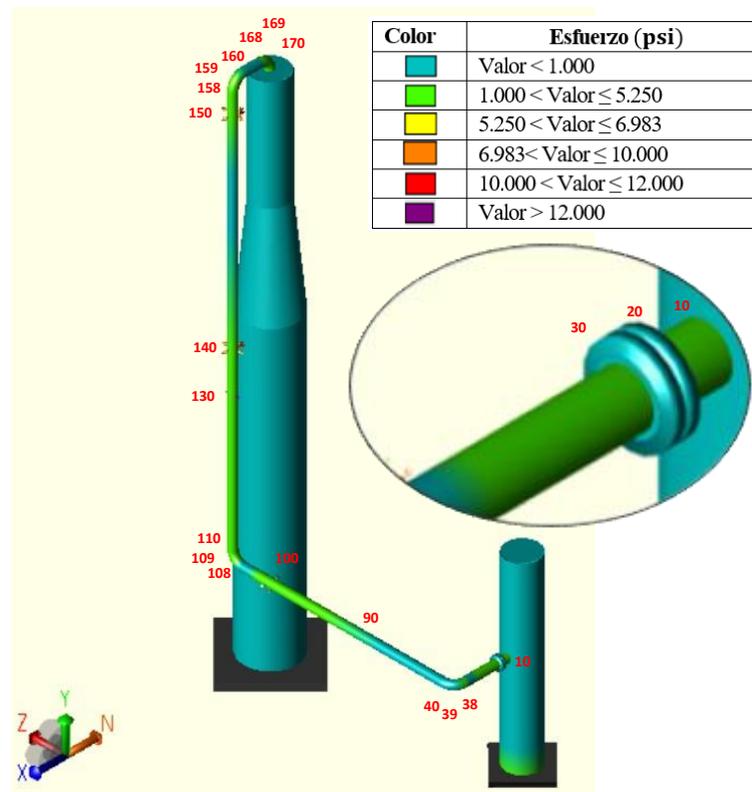


Figura 60: Esfuerzos máximos caso 1 configuración actual.

En el primer escenario de carga, el nodo 10 muestra el esfuerzo máximo, alcanzando los 3.939 psi, como se ve en la Figura 61 este valor se encuentra dentro del límite de esfuerzo permisible en condiciones de calor para el material utilizado. En lo que respecta al análisis de los desplazamientos máximos, se ha identificado que el nodo 130, que es la ubicación del soporte de resorte (spring hanger), experimenta un desplazamiento de 0,24 pulgadas hacia abajo desde su posición original. Estos valores de desplazamientos sirven para tener un punto de comparación entre la configuración actual y la futura.

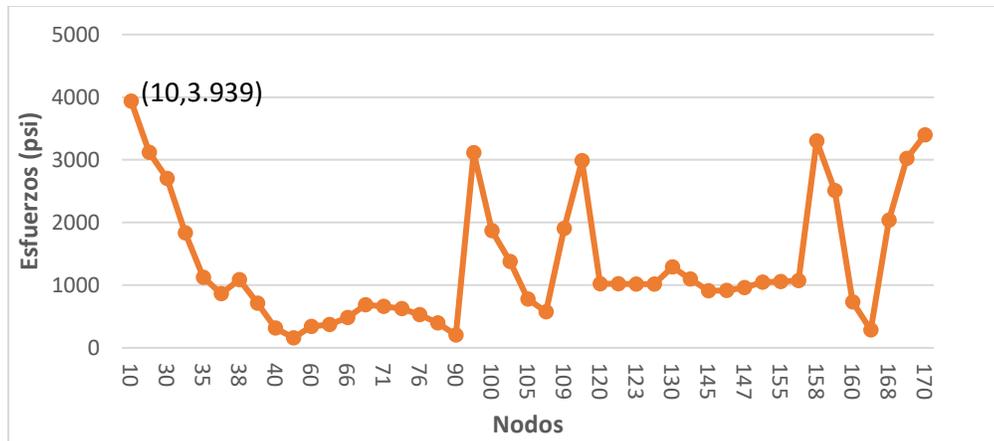


Figura 61: Esfuerzos máximos caso 1 configuración actual (grafica).

Caso de carga 2

Para el caso de carga 2, el esfuerzo máximo se encuentra en el codo inferior de la línea vertical, específicamente en el nodo 108. Sin embargo, esta dentro del esfuerzo admisible para expansión térmica según el ASME B31.3. En la Figura 62 y Figura 63 se puede ver más en detalle los esfuerzos.

En relación con los desplazamientos, se han identificado deformaciones significativas en ciertos puntos del sistema de tuberías. En el codo superior, específicamente en el nodo 160, se observa un desplazamiento de 17,2 pulgadas en la dirección +Y, causado principalmente por la expansión térmica experimentada por el reactor y el regenerador los cuales tienen una temperatura de diseño de gran magnitud.

Por otro lado, en el codo inferior comprendido entre los nodos 108 y 110, se detecta una deformación de 7 pulgadas en la dirección +Z y una deformación de 4 pulgadas en la dirección -Y.

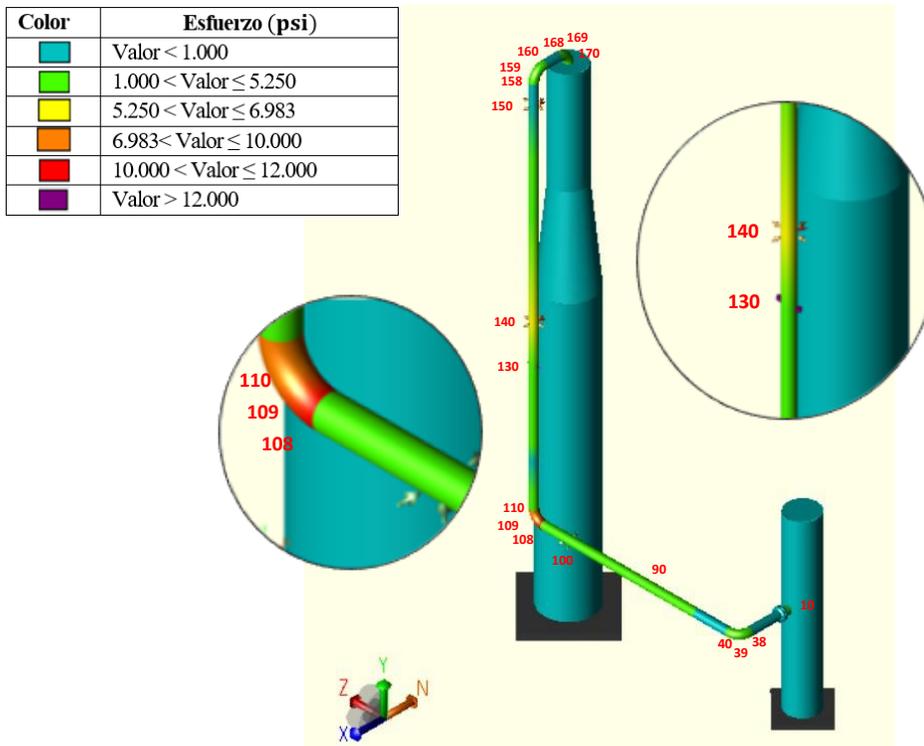


Figura 62: Esfuerzos máximos caso 2 configuración actual.

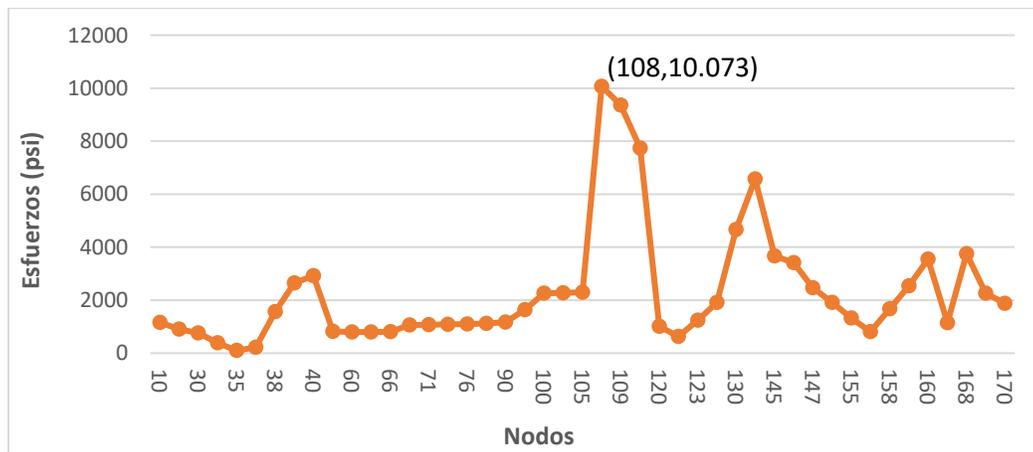


Figura 63: Esfuerzos máximos caso 2 configuración actual (grafica).

Caso de carga 3

En el tercer caso de análisis, donde se considera el peso total, la presión y la expansión térmica, se ha observado que el esfuerzo máximo se encuentra en el codo inferior de la línea vertical, precisamente en el nodo 108. Este valor alcanza los 11.351 psi. Es importante señalar que aún se encuentra bastante lejos del punto en que el material empieza a ceder.

Además, en el nodo 140, que es la ubicación del soporte E-4, también se ha registrado un esfuerzo importante de 7.251 psi. Para un análisis más detallado de estos resultados, se tienen las Figura 64 y Figura 65.

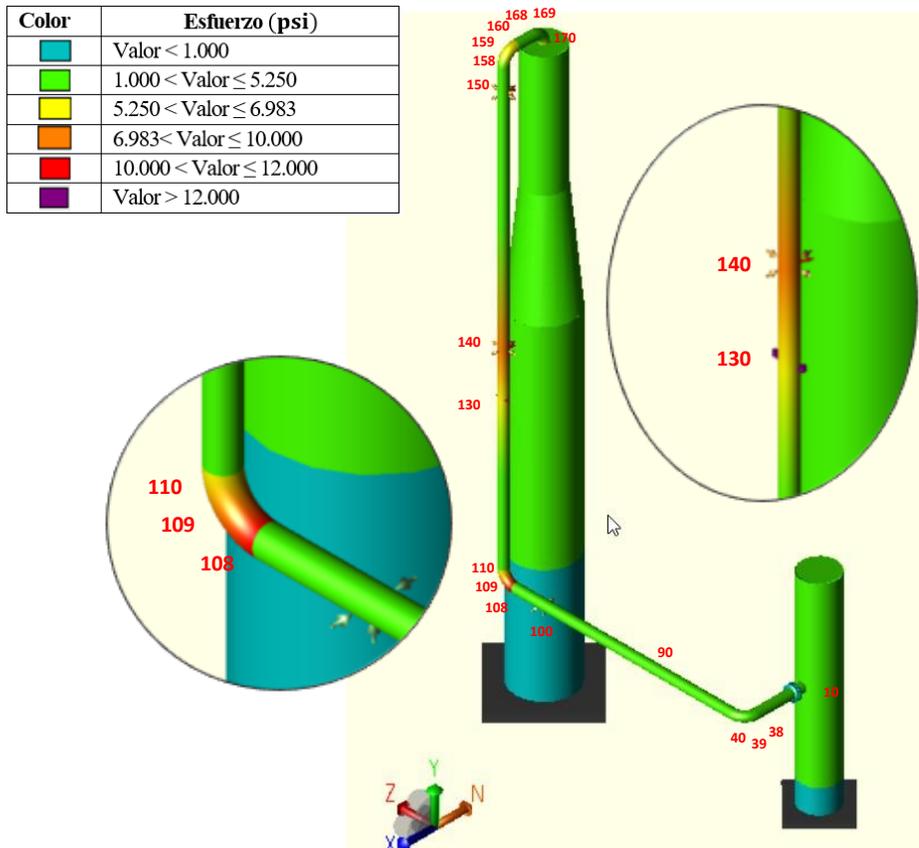


Figura 64: Esfuerzos máximos caso 3 configuración actual.

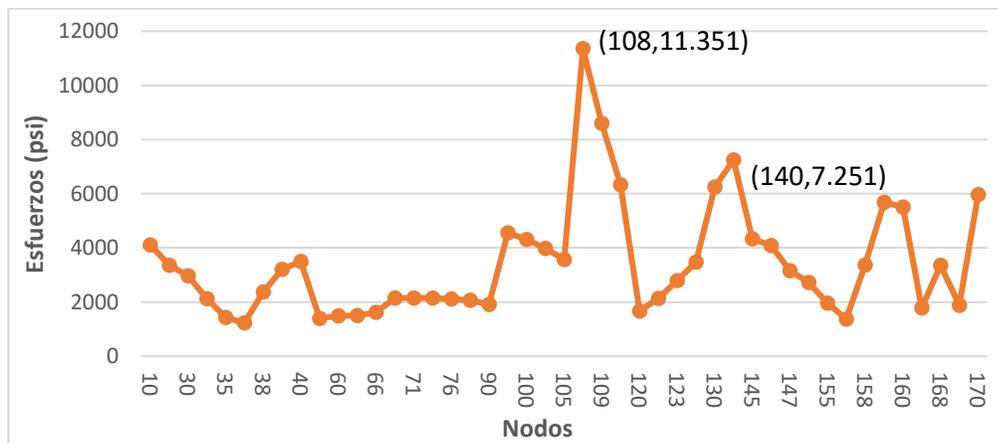


Figura 65: Esfuerzos máximos caso 3 configuración actual (grafica).

Los desplazamientos máximos en esta situación son similares a los del caso anterior, donde solo se consideraba la expansión térmica. En el codo superior de la línea vertical, se ha registrado un desplazamiento de 17,5 pulgadas hacia arriba (+Y), mientras que en el codo inferior, el desplazamiento es de 6 pulgadas en dirección +Z. Esta información proporciona una visión clara de cómo se está comportando la tubería bajo esta carga particular.

Caso de carga 4

Se ha identificado que el esfuerzo máximo se encuentra en las proximidades de la boquilla del equipo E-100A. Sin embargo, es fundamental destacar que este esfuerzo se encuentra dentro de los límites admisibles establecidos por el código aplicable. Esto se puede verificar en la Figura 66 y Figura 67.

En el análisis de desplazamientos, se ha identificado que el nodo 158 experimenta un desplazamiento de 1,58 pulgadas en sentido +X, en respuesta a la carga sísmica en la dirección X.

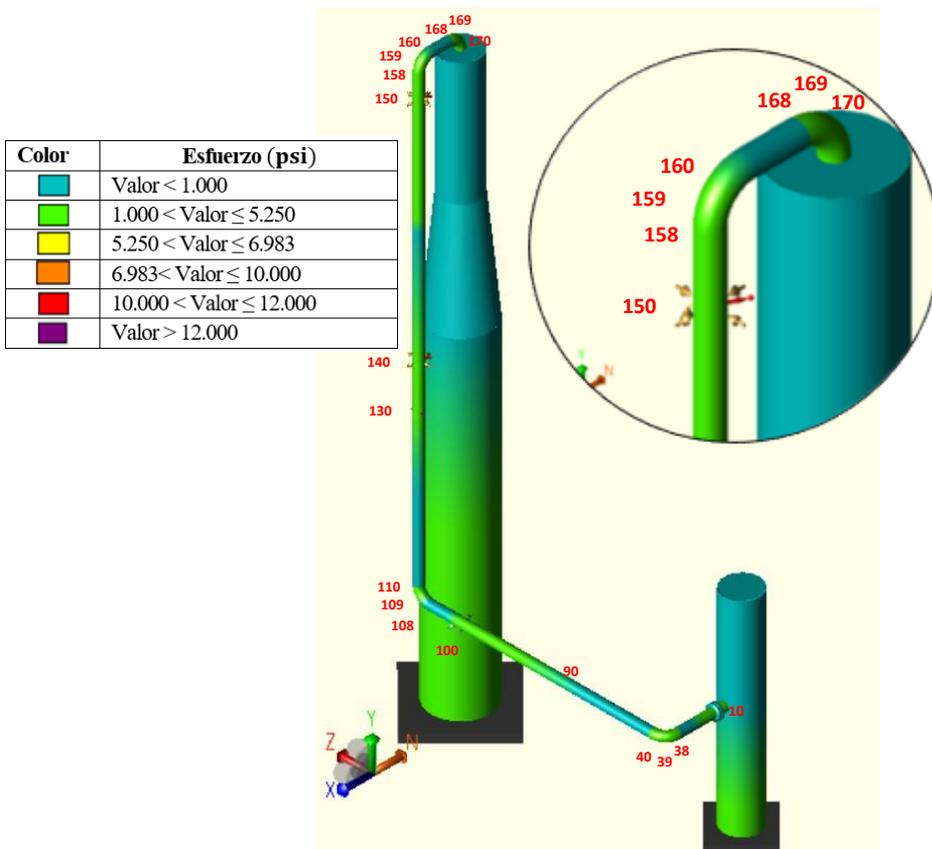


Figura 66: Esfuerzos máximos caso 4 configuración actual.

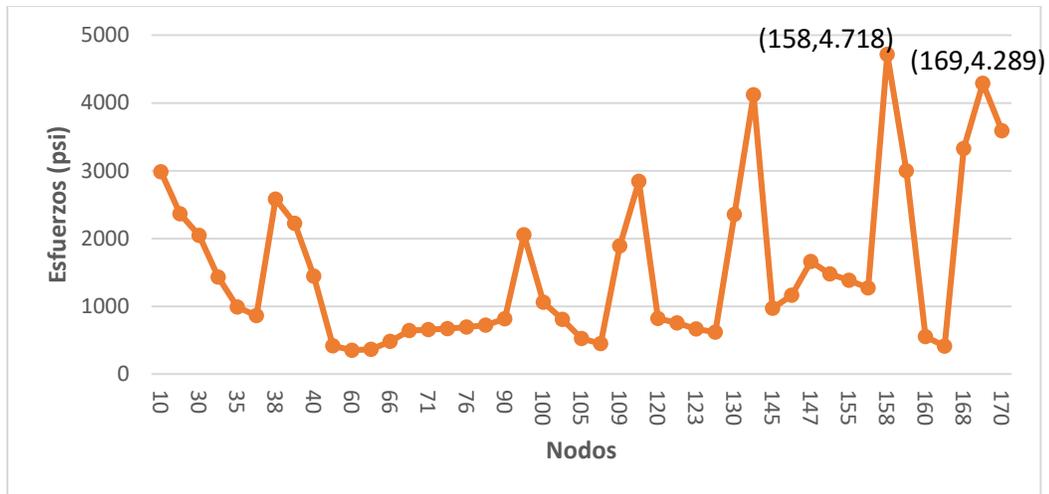


Figura 67: Esfuerzos máximos caso 4 configuración actual (grafica).

Caso de carga 5

Se ha identificado que el esfuerzo máximo se encuentra en las proximidades de la boquilla del equipo E-100A, específicamente en el nodo 10. Sin embargo, es importante destacar que este esfuerzo se encuentra dentro de los límites admisibles establecidos por el código aplicable. Se puede ver esto en la Figura 68 y Figura 69.

El análisis de los desplazamientos revela que el desplazamiento máximo registrado es de 1,58 pulgadas en el sentido +Z en el nodo 159. Este desplazamiento se produce como resultado del caso sísmico en la dirección Z y ocurre en el codo superior de la línea vertical.

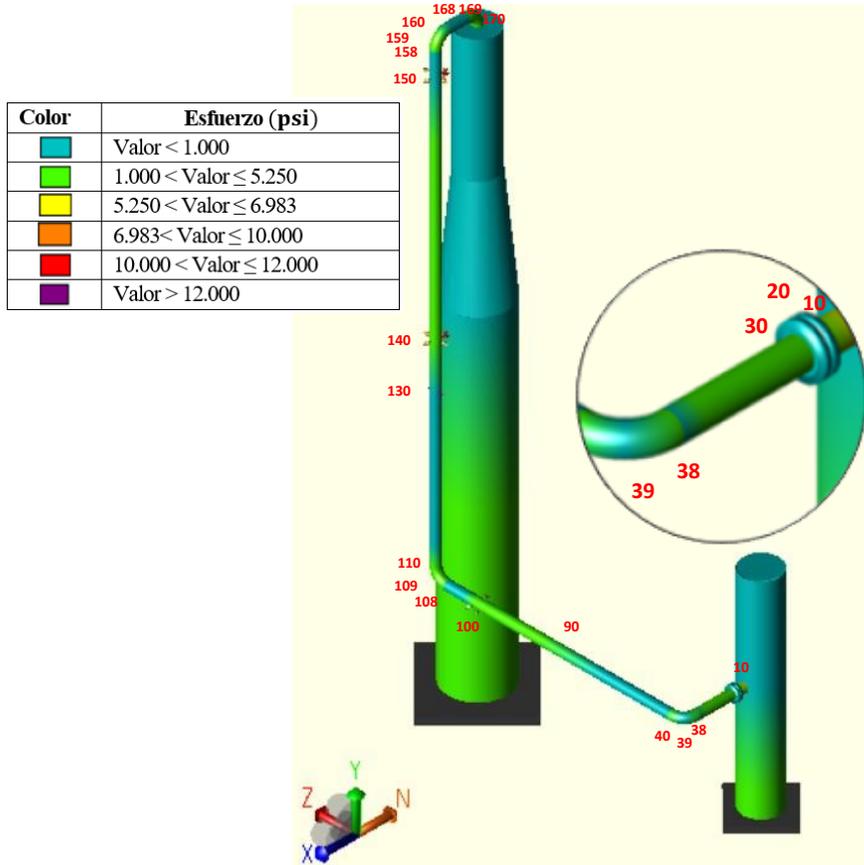


Figura 68: Esfuerzos máximos caso 5 configuración actual.

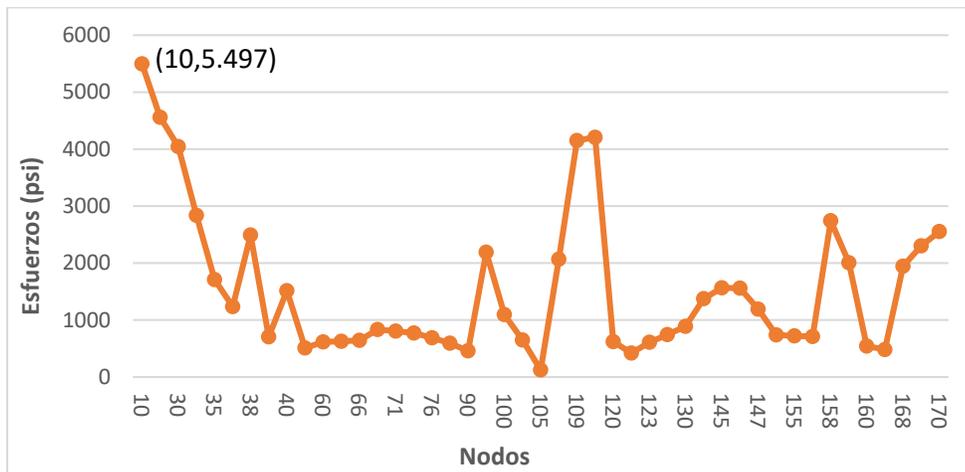


Figura 69: Esfuerzos máximos caso 5 configuración actual (grafica).

Anexo E3: análisis de configuración futura

Para garantizar una simulación precisa del modelo, se consideró el desplazamiento relativo de los soportes y guías ubicados en las proximidades del reactor D-101 en base al movimiento de la tubería. En la Tabla 11 se muestran detalladamente los desplazamientos, donde se puede observar el vector 1 correspondiente al caso de carga 3, el vector correspondiente al caso de carga 4 y el vector 3 correspondiente al caso de carga 5. Para el caso 2, se empleó un movimiento similar al utilizado en el caso 3.

Tabla 11: Desplazamientos relativos en soportes y guías configuración futura.

Desplazamientos	Nodo 150 (soporte E-5)			Nodo 140 (soporte E-4)		
	Vector 1	Vector 2	Vector 3	Vector 1	Vector 2	Vector 3
Dx (in)	-0,1124	1,1361	-0,0109	-0,0424	0,5461	-0,0035
Dy (in)	16,4202	-0,0223	-0,0224	8,2380	-0,0181	-0,0182
Dz (in)	-0,0538	-0,0015	1,1627	-0,0210	-0,0006	-0,5548

5.3.1 Caso de carga 1

En el primer caso de carga para la configuración futura, se comprueba que los esfuerzos cercanos a la válvula de aislamiento se encuentran dentro de los límites admisibles establecidos por el código ASME B31.3.

En relación con los esfuerzos máximos, se ha identificado que el nodo 170 es el más afectado, superando en un 3% el esfuerzo admisible del material en caliente. Se pueden observar estos resultados en detalle en la Figura 70 y Figura 71, donde se presenta de manera gráfica la distribución de esfuerzos a lo largo del sistema de tuberías. Es relevante señalar que, aunque este valor se ubica por encima del límite admisible, este nodo se corresponde con la conexión entre la tubería y el reactor. Un análisis posterior con el boletín WRC-107 demuestra que los esfuerzos en las boquillas están dentro del rango permisible.

Se pudo verificar que las cargas permanentes representan menos del 75% de las cargas totales, lo que descarta la necesidad de evaluar el efecto sísmico vertical.

En relación a los desplazamientos, se ha registrado un desplazamiento de 1,2 pulgadas en el nodo 76 hacia abajo, coincidiendo con la ubicación de la junta de expansión. Un análisis en el terreno confirmó que este desplazamiento no genera ningún impacto o contacto con otras tuberías cercanas.

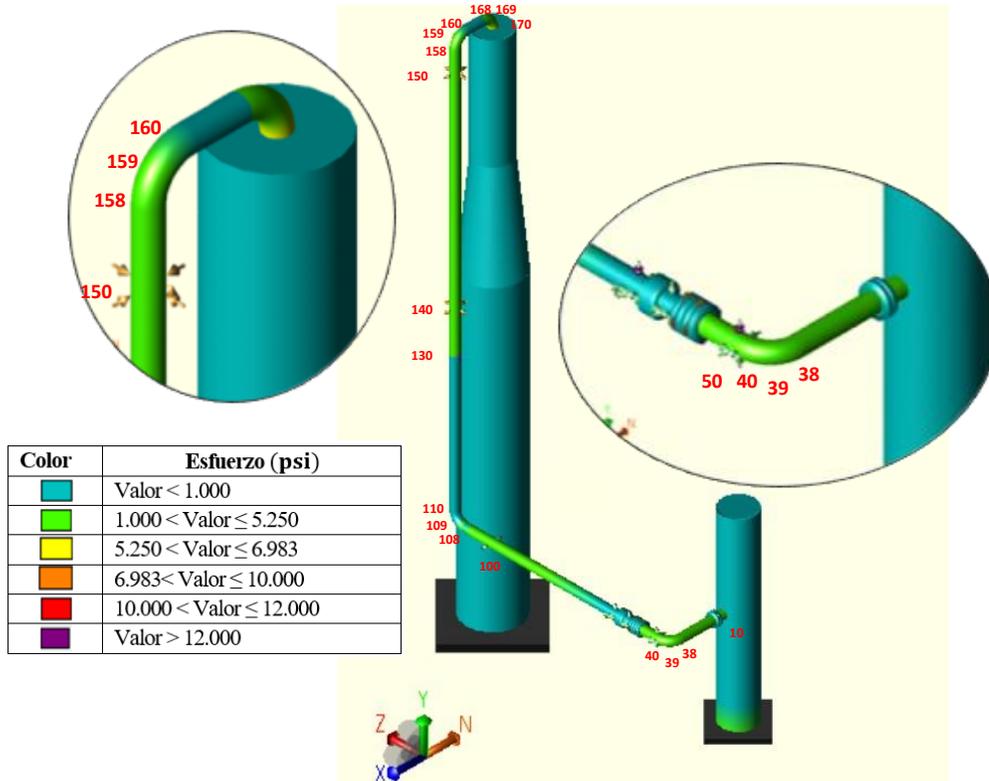


Figura 70: Esfuerzos máximos caso 1 configuración futura.

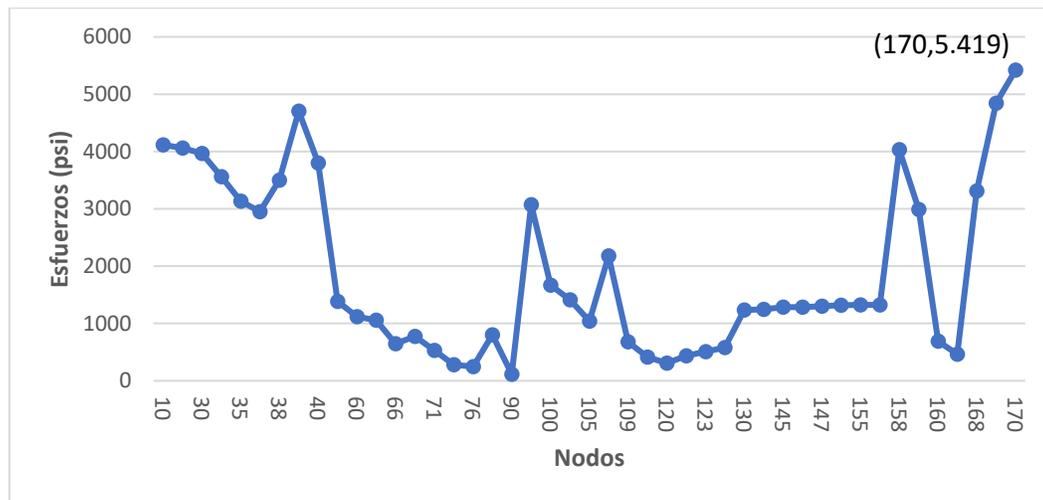


Figura 71: Esfuerzos máximos caso 1 configuración futura (grafica).

En lo que respecta a la válvula de aislamiento, se ha constatado que las fuerzas y momentos aplicados en las bridas se mantienen dentro de los límites aceptables definidos por el fabricante. Este hecho asegura que las conexiones de la válvula cumplen con las especificaciones proporcionadas por el fabricante, corroborando que la válvula ha sido diseñada para resistir las condiciones operativas

previstas. Los detalles precisos pueden ser consultados en la Tabla 12, donde la columna con título “Porcentaje de Carga” significa en que porcentaje están las fuerzas y momentos con respecto al admisible dado por el fabricante.

Tabla 12: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 1).

	Nodo 64	Admisible	Porcentaje de Carga	Nodo 65	Admisible	Porcentaje de Carga
Fx (lb)	7.173	25.000	28,69%	234	25.000	0,94%
Fy (lb)	203	30.000	0,68%	10.181	30.000	33,94%
Fz (lb)	0	25.000	0,00%	0	25.000	0,00%
Mx (ft*lb)	60	30.000	0,20%	666	30.000	2,22%
My (ft*lb)	4.578	50.000	9,16%	1.701	50.000	3,40%
Mz (ft*lb)	50	30.000	0,17%	50	30.000	0,17%

5.3.2 Caso de carga 2

Dentro del segundo caso de carga, que corresponde a la configuración futura, se ha identificado que el esfuerzo máximo alcanza los 8.356 psi en el nodo 108, ubicado en el codo inferior de la línea vertical. Es fundamental resaltar que este esfuerzo máximo representa aproximadamente el 66,2% del límite de carga admisible, el cual es de 12.625 psi. Esta información se encuentra detallada en la Figura 72 y la Figura 73.

En relación a los desplazamientos, se han identificado deformaciones notables en puntos específicos del sistema de tuberías. En el codo superior, precisamente en el nodo 160, se ha observado un desplazamiento de 17,2 pulgadas en la dirección -Y, principalmente debido a la expansión térmica experimentada por el reactor y el regenerador.

Por otro lado, en el codo inferior de la línea vertical de tubería, que abarca los nodos 108, 109 y 110, se ha identificado una deformación de 7 pulgadas en la dirección +Z, así como una deformación de 4 pulgadas en la dirección +Y. Es importante señalar que un análisis en el terreno ha confirmado que estos desplazamientos no generan conflictos en términos de interferencias con otras tuberías u obstáculos circundantes.

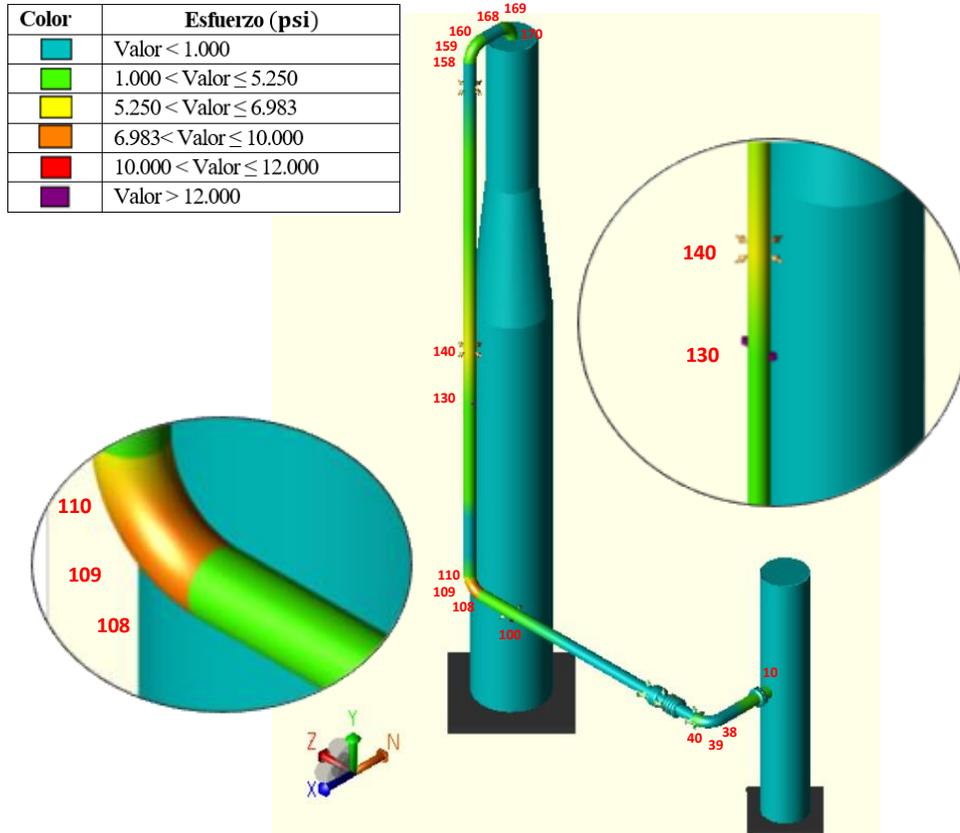


Figura 72: Esfuerzos máximos caso 2 configuración futura.

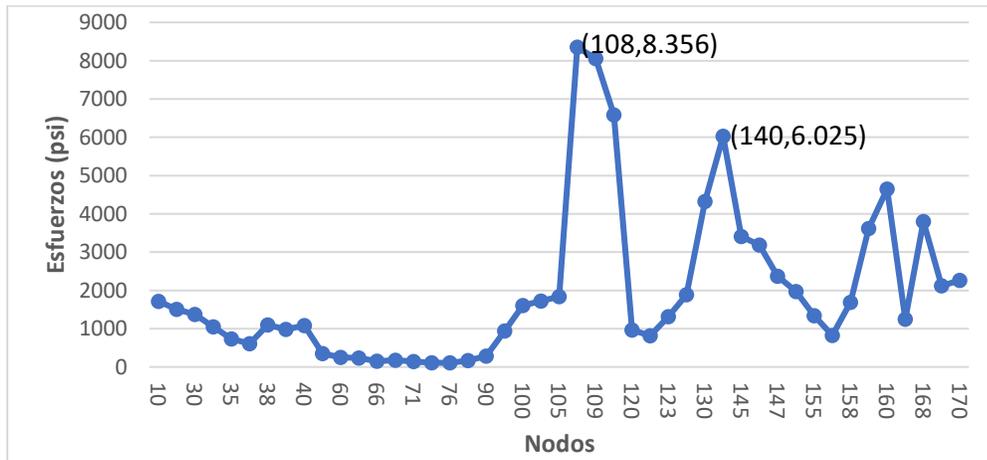


Figura 73: Esfuerzos máximos caso 2 configuración futura (grafica).

En cuanto a la válvula, se ha verificado que las fuerzas y momentos aplicados en las bridas se mantienen dentro de los límites aceptables definidos por el fabricante. Esto asegura que las conexiones de la válvula cumplen con las especificaciones proporcionadas por el fabricante, confirmando que la válvula está diseñada para resistir las condiciones operativas previstas. Los detalles precisos se

encuentran en la Tabla 13. Estos resultados brindan confianza en la capacidad de la válvula para funcionar de manera segura.

Tabla 13: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 2).

	Nodo 64	Admisible	Porcentaje de Carga	Nodo 65	Admisible	Porcentaje de Carga
Fx (lb)	170	25.000	0,68%	170	25.000	0,68%
Fy (lb)	436	30.000	1,45%	10.819	30.000	36,06%
Fz (lb)	1.981	25.000	7,92%	5.426	25.000	21,70%
Mx (ft*lb)	2.587	30.000	8,62%	2.157	30.000	7,19%
My (ft*lb)	696	50.000	1,39%	387	50.000	0,77%
Mz (ft*lb)	29	30.000	0,10%	29	30.000	0,10%

5.3.3 Caso de carga 3

En el caso 3, que representa la situación de carga más desfavorable, se ha identificado que el codo inferior de la línea vertical, ubicado específicamente en el nodo 108, es el punto donde se registra el esfuerzo máximo, alcanzando 11.222 psi. Una visualización detallada de esta información está disponible en la Figura 74 y la Figura 75 que presentan gráficamente la distribución de esfuerzos en todo el sistema. Importante resaltar que estos esfuerzos no exceden el límite de fluencia del material a la temperatura máxima de diseño, lo que indica que se mantienen dentro del rango elástico del material.

Además, es relevante señalar que el esfuerzo máximo en comparación con el límite de fluencia del material a la temperatura de diseño, que es de 21.315 psi, equivale aproximadamente al 52,7%, destacando un margen de seguridad considerable en el diseño. Esta observación fortalece la confiabilidad y la solidez de la estructura ante condiciones de carga excepcionalmente desafiantes.

En términos de desplazamientos, se han identificado deformaciones notables en puntos específicos del sistema de tuberías. En el codo superior, ubicado en el nodo 160, se observa un desplazamiento de 17,5 pulgadas en la dirección +Y, en concordancia con los desplazamientos registrados en la configuración actual, que presenta un desplazamiento máximo de 17,5 pulgadas. Asimismo, en el nodo 109 se registran desplazamientos de 6 pulgadas en dirección +Z, en línea con los desplazamientos presentes en la configuración actual. Estas deformaciones tienen su origen en la expansión térmica experimentada por el reactor y el regenerador, componentes cercanos en el sistema. Importante mencionar que estos desplazamientos no generan interferencias ni inconvenientes, ya que no existen obstáculos ni choques con otras tuberías o componentes cercanos.

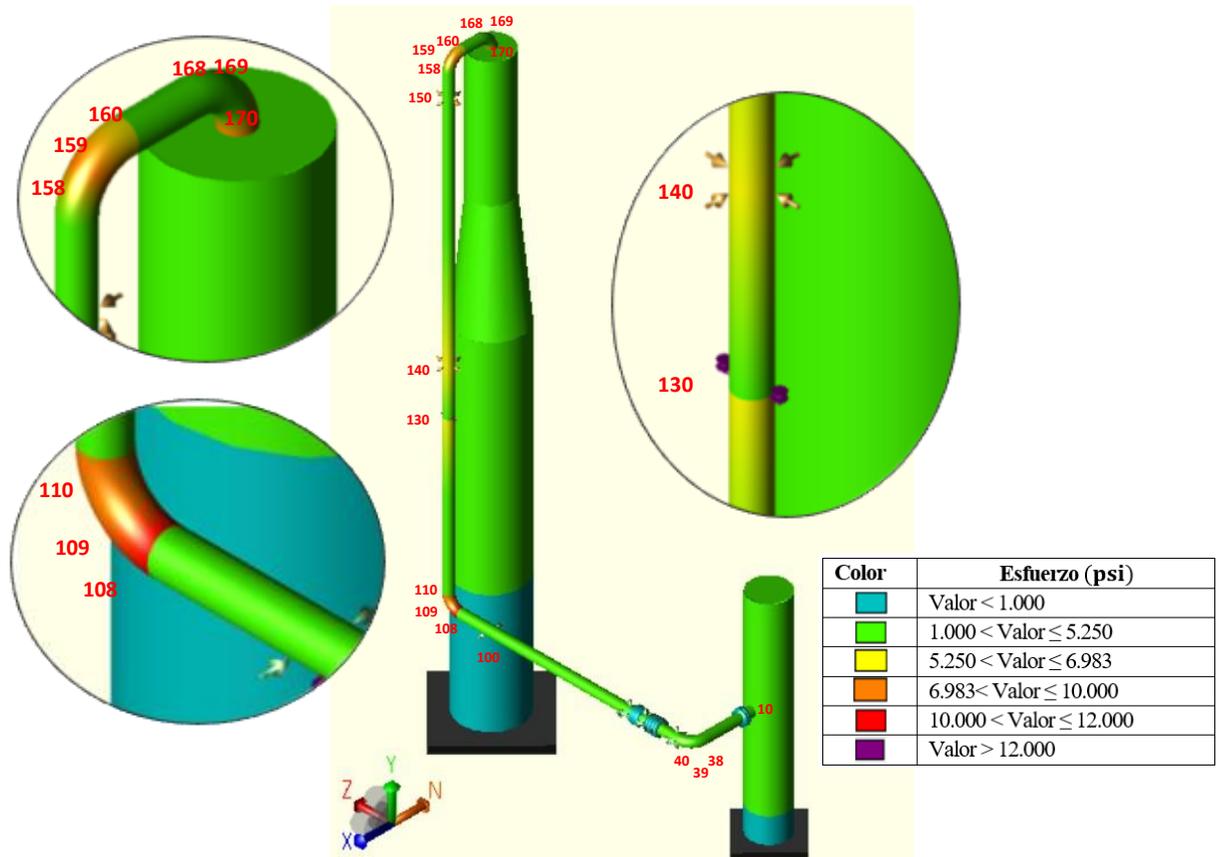


Figura 74: Esfuerzos máximos caso 3 configuración futura.

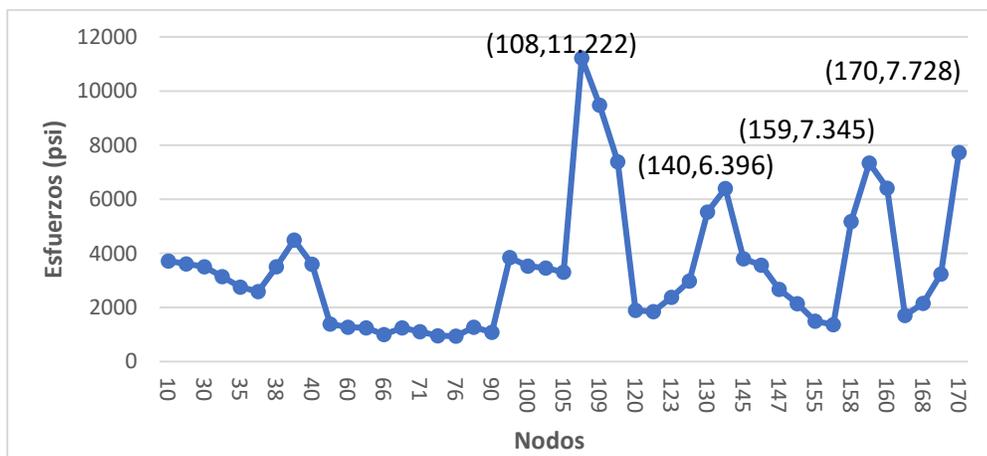


Figura 75: Esfuerzos máximos caso 3 configuración futura (grafica).

En el ámbito de la válvula, se ha constatado que las fuerzas y momentos aplicados en las bridas se encuentran dentro de los límites aceptables definidos por el fabricante. Esta validación asegura que las conexiones de la válvula cumplen con las especificaciones proporcionadas por el fabricante,

confirmando que la válvula está diseñada para resistir las condiciones operativas previstas. Los detalles precisos se encuentran detallados en la Tabla 14.

Tabla 14: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 3).

	Nodo 64	Admisible	Porcentaje de Carga	Nodo 65	Admisible	Porcentaje de Carga
F_x (lb)	209	25.000	0,84%	209	25.000	0,84%
F_y (lb)	2.313	30.000	7,71%	12.696	30.000	42,32%
F_z (lb)	2.609	25.000	10,44%	2.609	25.000	10,44%
M_x (ft*lb)	17.179	30.000	57,26%	13.352	30.000	44,51%
M_y (ft*lb)	1.047	50.000	2,09%	667	50.000	1,33%
M_z (ft*lb)	45	30.000	0,15%	45	30.000	0,15%

5.3.4 Caso de carga 4

El esfuerzo máximo se ha localizado en el nodo 40, con una magnitud de 5.511 psi. Esta información se encuentra visualizada en las respectivas gráficas. Vale resaltar que este valor se mantiene dentro del rango admisible, con un porcentaje de carga con respecto al límite admisible de aproximadamente el 78,9%, siendo el valor límite admisible establecido en 6.983 psi. se puede visualizar esta información detallada en Figura 76 y Figura 77 que representan gráficamente los esfuerzos en el sistema.

En cuanto a los desplazamientos, se ha observado un desplazamiento máximo de 1,8 pulgadas en el nodo 147, que se encuentra cerca del soporte y la guía ubicada en la línea vertical, mientras que el desplazamiento para la configuración actual es de 1,5 pulgadas en el mismo punto, por lo que la diferencia no es mucha. Además, no hay problemas de topamiento con otras tuberías.

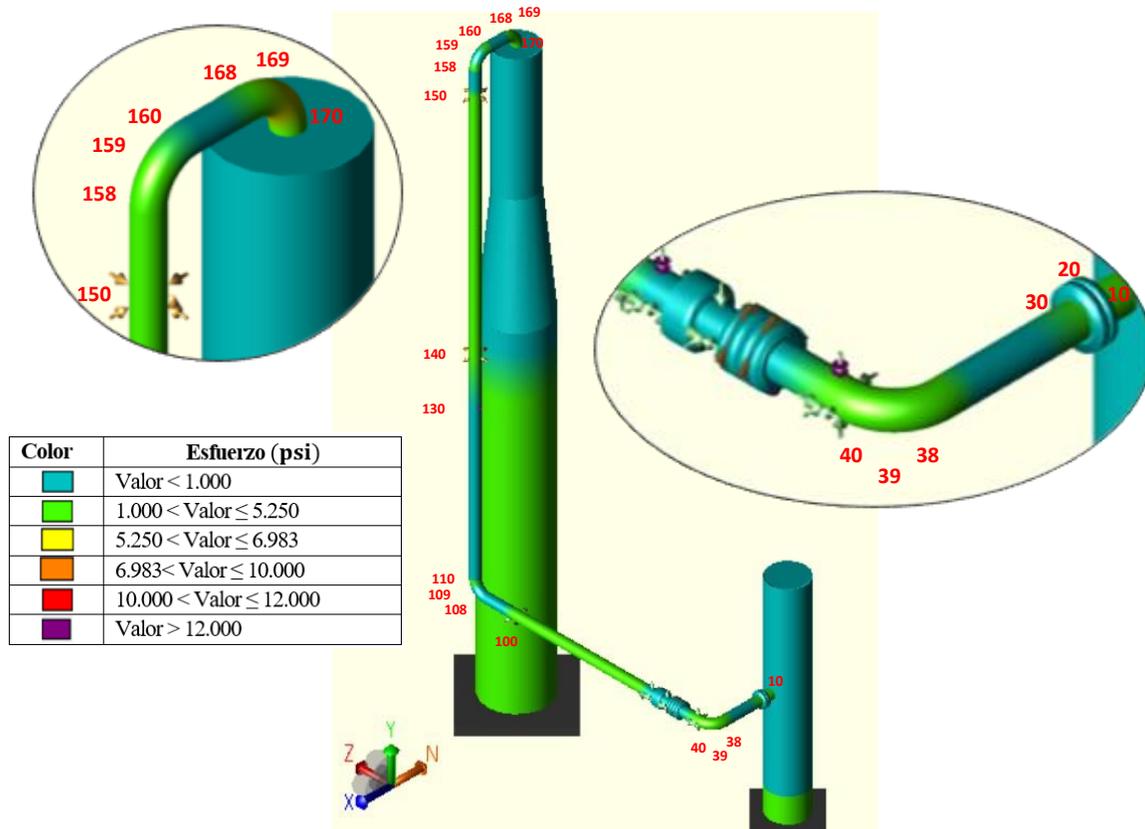


Figura 76: Esfuerzos máximos caso 4 configuración futura.

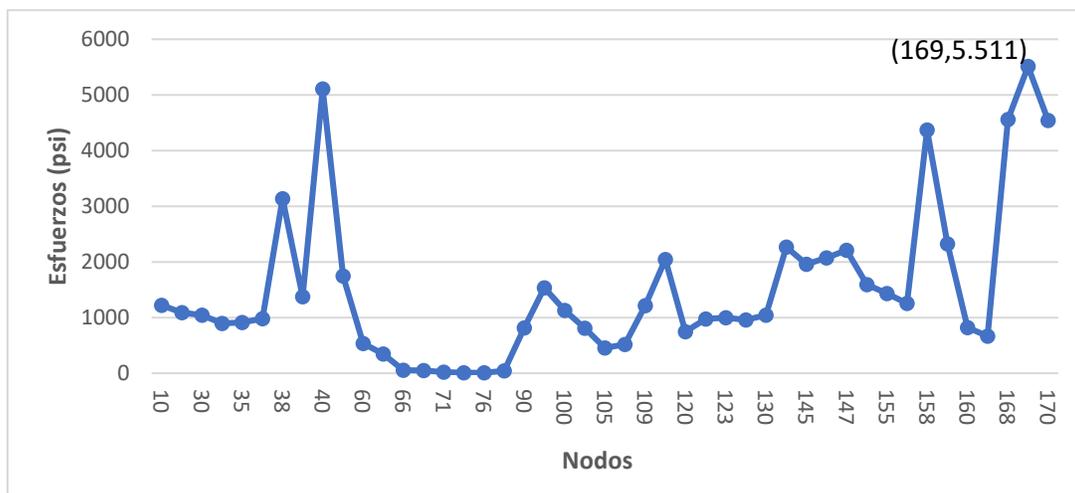


Figura 77: Esfuerzos máximos caso 4 configuración futura (grafica).

Con respecto a la válvula se ha determinado que las fuerzas y momentos en los extremos de la válvula de aislamiento se encuentran dentro de los límites admisibles establecidos por el fabricante. Esto se ve reflejado en la Tabla 15.

Tabla 15: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 4).

	Nodo 64	Admisible	Porcentaje de Carga	Nodo 65	Admisible	Porcentaje de Carga
F_x (lb)	7.168	25.000	28,67%	239	25.000	0,96%
F_y (lb)	793	30.000	2,64%	10.450	30.000	34,83%
F_z (lb)	0	25.000	0,00%	2.601	25.000	10,40%
M_x (ft*lb)	3.075	30.000	10,25%	3.313	30.000	11,04%
M_y (ft*lb)	4.596	50.000	9,19%	1.675	50.000	3,35%
M_z (ft*lb)	51	30.000	0,17%	-51	30.000	0,17%

5.3.5 Caso de carga 5

Al evaluar los esfuerzos máximos presentes en el sistema, se ha identificado que el nodo 169 es el más susceptible, con un valor de esfuerzo de 5.141 psi. Esta cifra representa aproximadamente el 73,5% del límite admisible de 6.983 psi. Estos resultados han sido visualizados y detallados en la Figura 78 y la Figura 79.

En cuanto a los desplazamientos, se ha notado que el valor máximo se encuentra en el nodo 159, correspondiente al codo superior de la línea vertical. El desplazamiento en este punto es de 1,75 pulgadas en dirección +Z. En comparación con el caso actual, se registra un desplazamiento ligeramente menor de 1,6 pulgadas en la misma dirección. Es importante resaltar que estos desplazamientos no generan problemas de interferencia con otras tuberías, garantizando así la integridad del sistema.

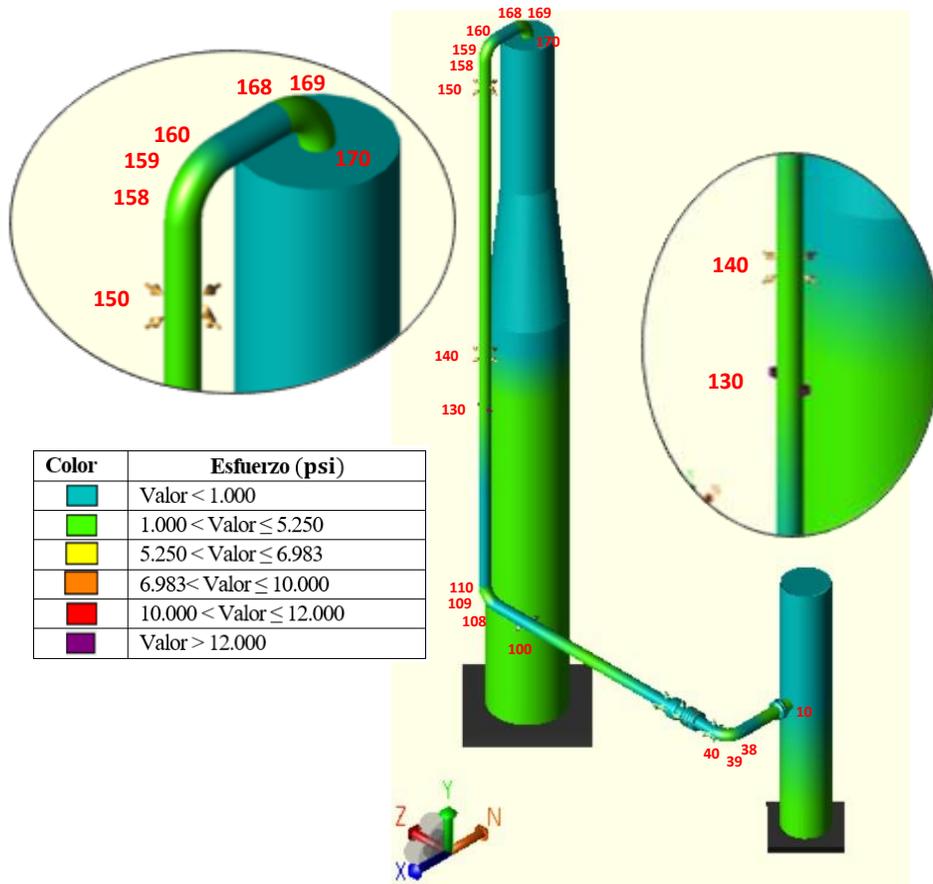


Figura 78: Esfuerzos máximos caso 5 configuración futura.

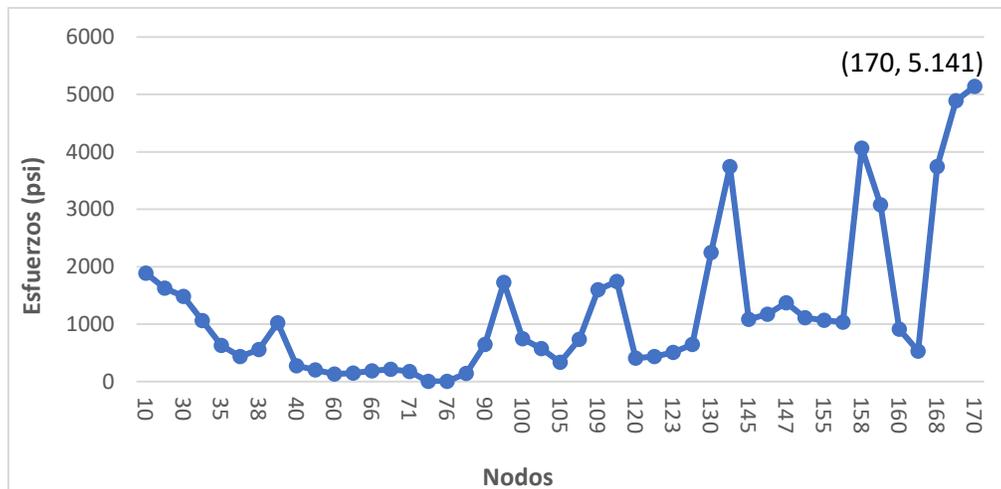


Figura 79: Esfuerzos máximos caso 5 configuración futura (grafica).

Se ha determinado que las fuerzas y momentos en los extremos de la válvula se encuentran dentro de los límites admisibles establecidos por el fabricante. Esto se ve reflejado en la Tabla 16, donde la columna con título “Porcentaje de Carga” significa en que porcentaje están las fuerzas y momentos con respecto al admisible dado por el fabricante.

Tabla 16: Fuerzas y momentos en válvula de aislamiento (caso 5).

	Nodo 64	Admisible	Porcentaje de Carga	Nodo 65	Admisible	Porcentaje de Carga
Fx (lb)	169	25.000	0,68%	169	25.000	0,68%
Fy (lb)	154	30.000	0,51%	11.088	30.000	36,96%
Fz (lb)	1.981	25.000	7,92%	5.426	25.000	21,70%
Mx (ft*lb)	5.723	30.000	19,08%	4.806	30.000	16,02%
My (ft*lb)	700	50.000	1,40%	395	50.000	0,79%
Mz (ft*lb)	21	30.000	0,07%	21	30.000	0,07%

Anexo E4: Análisis de boquillas con boletín WRC-107

Las cargas transmitidas por una tubería conectada a un recipiente generan esfuerzos de manera más exacta de calcular estos esfuerzos es mediante la aplicación del método de elementos finitos. En el boletín WRC-107, se presenta el resultado de la aplicación de este método, mostrando ecuaciones y curvas adimensionales, basado en parámetros como: la relación entre el diámetro de la boquilla y el del recipiente y de este último con el espesor del recipiente.

El Boletín WRC-107 puede ser utilizado para analizar conexiones a recipientes cilíndricos o esféricos. En cuanto al tipo de conexiones pueden ser cilíndricas o cuadradas tanto huecas como sólidas, también se pueden analizar conexiones rectangulares, pero únicamente sólidas.

En el presente estudio, se evaluaron las boquillas tanto en su configuración actual como en la futura. En el caso del análisis en la boquilla del reactor, se encontró que tanto en la configuración actual como en la futura, los esfuerzos se encuentran por debajo del límite admisible. Además, con la configuración futura, se logró reducir aún más los esfuerzos en todos los casos.

En cuanto al análisis de la boquilla de la torre E-100A, se observó que tanto en la configuración actual como en la futura, los esfuerzos superan el límite admisible. Sin embargo, se destacó que, en la configuración futura, estos esfuerzos disminuyen en comparación con los obtenidos en la configuración actual. Dado el historial de operación sin incidentes en la línea durante muchos años y la ausencia de fallos en las boquillas de los equipos, la configuración actual emerge como un indicador sólido para determinar la eventualidad de la amenaza de estos esfuerzos.

En las siguientes figuras, se presentan los resultados del análisis realizado mediante el método de elementos finitos WRC-107 (Welding Research Council) utilizando el programa CAESAR II.

Type of Stress Int.	Max. S.I.	S.I. Allowable lb./sq.in.	Result
Pm (SUS)	2392	5250	Passed
Pm (SUS+OCC)	4784	6300	Passed
Pm+Pl (SUS)	4624	7875	Passed
Pm+Pl (SUS+OCC)	9391	9450	Passed
Pm+Pl+Q (TOTAL)	13387	39975	Passed

Figura 80: Esfuerzos boquilla reactor D-101 configuración existente.

Type of Stress Int.	Max. S.I.	S.I. Allowable lb./sq.in.	Result
Pm (SUS)	2392	5250	Passed
Pm (SUS+OCC)	4784	6300	Passed
Pm+Pl (SUS)	3662	7875	Passed
Pm+Pl (SUS+OCC)	7153	9450	Passed
Pm+Pl+Q (TOTAL)	10298	39975	Passed

Figura 81: Esfuerzos boquilla reactor D-101 configuración futuro.

Type of Stress Int.	Max. S.I.	S.I. Allowable lb./sq.in.	Result
Pm (SUS)	4529	5250	Passed
Pm (SUS+OCC)	9059	6300	Failed
Pm+P1 (SUS)	17555	7875	Failed
Pm+P1 (SUS+OCC)	34001	9450	Failed
Pm+P1+Q (TOTAL)	63665	39975	Failed

Figura 82: Esfuerzo boquilla torre E-100A configuración actual.

Type of Stress Int.	Max. S.I.	S.I. Allowable lb./sq.in.	Result
Pm (SUS)	4529	5250	Passed
Pm (SUS+OCC)	9059	6300	Failed
Pm+P1 (SUS)	15600	7875	Failed
Pm+P1 (SUS+OCC)	21728	9450	Failed
Pm+P1+Q (TOTAL)	51688	39975	Failed

Figura 83: Esfuerzo boquilla torre E-100A configuración futuro.

Anexo E5: Cargas en soportes para cada caso

Tabla 17: Cargas en soportes.

Node	FX lb.	FY lb.	FZ lb.	MX ft.lb.	MY ft.lb.	MZ ft.lb.	Restraint Type/Tag	Caso de carga
10	7	482	8	-57216.8	-86.6	70730.7	TYPE=Rigid ANC;	Caso 1
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 1
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 1
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 1
50	0	-5610	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 1
64	7	3020	8	-21575.0	-0.4	-83.4	TYPE=Rigid ANC;	Caso 1
64	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 1
65	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 1
65	7	13404	8	-16467.1	-13.2	-83.4	TYPE=Rigid ANC;	Caso 1
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 1
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 1
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 1
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 1
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 1
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 1
80	0	-9139	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 1
90	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 1
100	115	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 1
100	0	-1831	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 1
130	0	-32000	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 1
130	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Displ. Reaction;	Caso 1
140	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 1
140	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 1
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 1
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 1
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 1
172	122	-1055	8	-86.3	-2041.3	-24037.6	TYPE=Rigid ANC;	Caso 1
10	-181	-697	-2585	11168.7	44885.2	-12775.4	TYPE=Rigid ANC;	Caso 2
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 2
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 2
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 2
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 2
64	-181	-697	-2585	4333.1	-880.7	41.8	TYPE=Rigid ANC;	Caso 2
64	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 2
65	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 2
65	-181	-697	-2585	3071.6	-552.4	41.8	TYPE=Rigid ANC;	Caso 2
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 2
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 2
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 2
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 2
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 2
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 2
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 2
90	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 2
100	-112	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 2
100	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 2
130	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 2
130	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Displ. Reaction;	Caso 2
140	0	0	4314	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 2
140	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 2
150	5965	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 2
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 2
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 2
172	5672	-697	1729	-7924.7	-10158.5	-9735.3	TYPE=Rigid ANC;	Caso 2
10	-209	-226	-2609	-45880.4	44884.2	57753.7	TYPE=Rigid ANC;	Caso 3
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 3
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 3
50	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 3
50	0	-5610	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 3
64	-209	2313	-2609	-17179.9	-1047.0	-45.4	TYPE=Rigid ANC;	Caso 3
64	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 3
65	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 3
65	-209	12696	-2609	-13352.9	-667.9	-45.4	TYPE=Rigid ANC;	Caso 3
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 3
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 3

71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 3
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 3
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 3
80	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 3
80	0	-9139	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 3
90	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 3
100	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 3
100	0	-1831	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 3
130	0	-32000	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 3
130	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Displ. Reaction;	Caso 3
140	0	0	4370	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 3
140	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 3
150	6786	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 3
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 3
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 3
172	6577	-1763	1761	-8387.9	-10370.6	-33722.4	TYPE=Rigid ANC;	Caso 3
10	-15525	-3096	-2934	-2428.1	24234.1	4970.9	TYPE=Rigid ANC;	Caso 4
50	25550	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 4
50	0	354	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 4
50	0	0	2934	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 4
50	0	-5610	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 4
64	7173	-203	0	60.3	4578.2	-49.9	TYPE=Rigid ANC;	Caso 4
64	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 4
65	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 4
65	-234	10181	0	-665.7	-1701.4	-49.9	TYPE=Rigid ANC;	Caso 4
71	575	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 4
71	0	-953	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 4
71	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 4
80	-1058	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 4
80	0	13269	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 4
80	0	0	68	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 4
80	0	-9139	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 4
90	2790	-9298	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 4
100	3547	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 4
100	0	-1831	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 4
130	0	-32000	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 4
130	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Displ. Reaction;	Caso 4
140	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 4
140	5581	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 4
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 4
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 4
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 4
172	-2864	-1270	67	-1064.7	-3675.8	-19902.8	TYPE=Rigid ANC;	Caso 4
10	-3764	-4187	-2239	-3819.7	48128.3	-15071.6	TYPE=Rigid ANC;	Caso 5
50	3935	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 5
50	0	2084	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 5
50	0	0	7072	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 5
50	0	-5610	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 5
64	170	436	1981	-2587.6	696.4	-29.0	TYPE=Rigid ANC;	Caso 5
64	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 5
65	0	-10780	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 5
65	170	10819	-5426	-2157.7	387.8	-29.0	TYPE=Rigid ANC;	Caso 5
71	-176	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 5
71	0	-1593	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 5
71	0	0	5970	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 5
80	-722	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid XSNB;	Caso 5
80	0	11621	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid YSNB;	Caso 5
80	0	0	4286	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid ZSNB;	Caso 5
80	0	-9139	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 5
90	857	-7492	154	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 5
100	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 5
100	0	-1831	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 5
130	0	-32000	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=User Design CSH;	Caso 5
130	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Displ. Reaction;	Caso 5
140	0	0	6031	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 5
140	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 5
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid X w/gap;	Caso 5
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid Z w/gap;	Caso 5
150	0	0	0	0.0	0.0	0.0	TYPE=Rigid +Y;	Caso 5
172	130	-1107	-2722	-3865.2	21229.0	-23469.3	TYPE=Rigid ANC;	Caso 5

Anexo F

Anexo F1: Dificultades del proyecto

El proyecto enfrentó principalmente dificultades durante la fase de modelado. Inicialmente, se construyó un modelo que consideraba las conexiones en los equipos como puntos de anclaje, siguiendo las pautas de las guías de usuario. Sin embargo, esta aproximación resultó en esfuerzos excesivamente elevados debido a las altas temperaturas de los equipos y la tubería. Estos valores discordantes con la realidad llevaron a la decisión de simular los equipos como si fueran una tubería de mayor diámetro, buscando una representación más precisa de la situación.

Otra complicación surgió en relación con los movimientos relativos de los soportes en la línea vertical. Inicialmente, se optó por no considerar estos movimientos debido a la falta de indicaciones en este sentido. Sin embargo, resultó necesario incluirlos para reflejar la expansión térmica de los equipos a dichas temperaturas. La ausencia de movimientos relativos llevó a esfuerzos incorrectos en los nodos vinculados a estos soportes, que divergían significativamente de los resultados proporcionados por la empresa de ingeniería.

Adicionalmente, surgieron desafíos al intentar incorporar la estructura existente entre los nodos 50 y 90. Aunque esta omisión no afectó en gran medida la precisión de los resultados en los casos 1, 2 y 3, representó un inconveniente para el análisis sísmico. Esto se debió a que esta estructura también experimenta movimientos sísmicos en el suelo.

El análisis dinámico también planteó dificultades considerables, ya que ni las guías de usuario ni el curso proporcionado por Hexagon University abordaban de manera absoluta el análisis modal de espectro de respuesta. Esta carencia de enfoque generó desafíos adicionales durante esta fase del proyecto. Como resultado, se tomó la decisión de realizar un análisis estático en lugar de un análisis dinámico, principalmente debido a la incertidumbre en los datos necesarios para llevar a cabo un análisis dinámico preciso.