

Bogotá D.C. Noviembre 8 de 2012

SEÑORES

CONSEJO CURRICULAR

Proyecto Curricular de Ingeniería Mecánica

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá

Ref. Presentación Anteproyecto Final

Con la presente reciban un cordial saludo señores (as) Miembros del consejo curricular.

En cumplimiento del reglamento interno de la facultad para la elaboración de trabajos de grado me permito presentar mi anteproyecto titulado:

ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y FLEXIBILIDAD DE TUBERÍAS Y EVALUACIÓN DE CARGAS EN BOQUILLAS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR MEDIANTE EL PROGRAMA CAESAR II, el cual con la presente solicito la asignación de un tutor, de preferencia el Ing. Carlos Bohórquez el cual ya está enterado del proyecto para su desarrollo. Este Documento fue revisado y aceptado por el profesor Héctor Orlando Pinilla Suárez

Cordialmente,

SEBASTIÁN DUQUE ARAGÓN

Código: 20112375072

HÉCTOR ORLANDO PINILLA SUÁREZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL “FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS” - FACULTAD TECNOLÓGICA		
PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA		
FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO		
Nº DE RADICACIÓN: _____		
INFORMACIÓN EJECUTORES		
Ejecutor 1		
Nombre (s):	Sebastián	
Apellido (s):	Duque Aragón	
Código:	20112375072	
E-mail:	sebas_d16@hotmail.com	
Teléfono fijo:	4926130 Ext. 131	
Celular:	3102480677	
INFORMACIÓN DEL PROYECTO		
Título del Proyecto:	Análisis de esfuerzos y flexibilidad de tuberías y evaluación de cargas en boquillas de intercambiadores de calor mediante el programa Caesar II	
Duración (estimada):	3 meses	
Tipo de Proyecto: (Marqué con una “x”)	Innovación y Desarrollo Tecnológico	
	Prestación y Servicios Tecnológicos	
	Otro	X
Modalidad del Trabajo de Grado:	Proyecto Científico	
Línea de Investigación de la Facultad*:	Desarrollo tecnológico local e institucional	
Línea de Investigación del Proyecto Curricular:	Diseño en ingeniería mecánica	
Grupo de Investigación:		
Proyecto de Investigación:		
Áreas del conocimiento que involucra:	Mecánica de Materiales y Sólidos	
INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA		
Director: (Vo. Bo.)	Carlos Arturo Bohórquez Ávila	
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)		
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.)	Héctor Orlando Pinilla Suárez	

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Contexto Nacional	4
1.2 Contexto Local	5
1.3 Diagnóstico	6
1.4 Problema	6
2. ESTADO DEL ARTE	6
3. JUSTIFICACIÓN	14
4. OBJETIVOS	15
4.1 Objetivo General	15
4.2 Objetivos Específicos	15
5. MARCO TEÓRICO	16
5.1 Análisis de Esfuerzos	16
5.2 Análisis de Flexibilidad	16
5.3 Software CAESAR II	17
5.4 Esfuerzos	17
5.5 Desplazamientos	18
5.6 Dilatación Térmica	18
5.7 Intercambiadores de Calor	19
5.8 ASME B31.3 Tubería de Proceso	20
6. METODOLOGÍA	21
6.1 Consideraciones para el Modelado de la Línea	21
6.2 Criterios Generales para el Estudio de Flexibilidad	22
6.3 Procedimiento y Evaluación	22
6.4 Casos de Análisis y Variables Empleadas	23
6.5 Casos de Carga	23
7. CRONOGRAMA	24
8. PRESUPUESTO	25
BIBLIOGRAFÍA	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Casos de carga utilizados para el análisis	23
Tabla 2. Cronograma de actividades	24
Tabla 3. Mano de Obra	25
Tabla 4. Servicios	25

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Contexto Nacional

Los sistemas de tubería están sujetos a diferentes esfuerzos durante su operación, lo que conlleva a la necesidad de un estudio de flexibilidad para su diseño, garantizando que no se produzcan deformaciones excesivas en las líneas ni fallas en los accesorios y equipos afectados, esto puede suceder debido al tipo de operación que se da en estos sistemas para el flujo de hidrocarburos, donde se pueden encontrar paradas de emergencia y cierre de válvulas que generen sobrepresiones y depresiones que causan el conocido golpe de ariete, dañando así mismo el sistema gravemente. Poco a poco, la necesidad de diseñar y construir facilidades de producción más seguras hace que los ingenieros desarrollen estudios mucho más precisos. Para esto deben adquirir nuevas herramientas más confiables de trabajo con estándares mucho mejor elaborados, con lo cual el presente trabajo podrá evaluar líneas que conecten a intercambiadores de calor.

El análisis estático de esfuerzos en tuberías tiene en cuenta factores de operación como temperatura y presión, el cual como objetivo principal se enfoca en cuantificar los esfuerzos causados por la dilatación térmica y el peso generado por la misma tubería, accesorios y el peso del fluido, además dicho análisis puede calcular con exactitud tanto la tensión interna de la tubería, como las fuerzas y momentos que son generados por el sistema hacia la estructura que la soporta y los equipos comparándolos con los esfuerzos máximos admisibles regidos por la norma, ya sea el caso del material de la tubería o las boquillas de conexión a los equipos. Asimismo, se puede garantizar la confiabilidad de operación del sistema, asegurando los factores de infraestructura, seguridad del personal operario presente, y donde también se conserve el medio ambiente cumpliendo las normas establecidas.

La operación segura de un sistema de tuberías depende de la comprensión de una amplia gama de normas y códigos para su correspondiente análisis de flexibilidad a diferencia de algunas actividades de la ingeniería. De esta manera, nos damos cuenta que para la aplicación de cada norma se deben tener en cuenta las características de lo que se va a estudiar, sabiendo que hay muchos detalles a analizar para la selección del código a utilizar. Durante mucho tiempo se han hecho desarrollos en cuanto a los estándares para esfuerzos permisibles de cada material, mediante ensayos a diferentes temperaturas y presiones, estableciendo así, los valores permisibles para cargas y momentos en los puntos de interés para el estudio, además de esto, los desplazamientos máximos debido a sismo y/o viento que están regidos por los códigos civiles y estructurales los cuales permiten calcular fuerzas distribuidas en base a las aceleraciones que se producen en un movimiento sísmico.

Todos los materiales tienen una resistencia a ciertas condiciones, lo que hace que el análisis de flexibilidad evalúe diferentes alternativas, haciendo de una de ellas la mejor opción para el sistema de tuberías. Con el uso de los códigos y las normas respectivas se logra determinar los datos mínimos para la separación entre los soportes y la deflexión entre ellos, para precisar un mejor dato existen programas tales como CAESAR II. Esta clase de software se basa en la norma ASME B31.1 para tuberías de vapor y sistemas de potencia, B31.3 para tuberías de proceso, B31.4 para sistemas de transporte de hidrocarburos y B31.8 para sistemas de transporte y distribución de gas, entre otras, así mismo, hay normas directamente relacionadas con el análisis de flexibilidad como la API (American Petroleum Institute), WRC (Welding Research Council Bulletin), FSA (Fluid Sealing Association), EJMA (Expansion Joint Manufacturers Association), MSS (Manufacturers Standardization Society), NEMA (National Electrical Manufacturers Association).

CAESAR II es el programa para el análisis de flexibilidad en tuberías más utilizado por los ingenieros encargados del área, ya que es de fácil uso, exactitud y de uso a nivel mundial, donde se puede modelar las redes que están sometidas a cargas tales como peso, temperatura, presión, dinámica, sísmica entre otras. Es usado para un análisis estático y dinámico cualesquiera que sea el caso con características que incluyen una gran capacidad de manejo de información, además la facilidad de poder importar los diseños desde CadWorx para un modelado más seguro y eficiente.

1.2 Contexto Local

Actualmente en la industria de hidrocarburos el estudio de esfuerzos en tuberías tiene gran importancia en el sector, debido a que en las grandes aplicaciones son necesarios los estudios que ayuden a predecir las posibles fallas, re-diseñar los arreglos de tubería colocando los accesorios adecuados y re-trazar la tubería para evitar golpes de ariete, cavitación y/o desplazamientos por encima de los permisibles a cierto plazo después de entrar en operación.

Generalmente, la problemática se ve reflejada con más frecuencia en las tuberías y los equipos que manejan altas temperaturas, puesto que pueden sufrir deformaciones y desplazamientos por dilatación térmica, lo que conlleva a un análisis mucho más detallado, para esto se debe realizar un estudio de flexibilidad. Esto presentará los puntos críticos del sistema, mostrando así como evitar la falla por medio de arreglos de tubería, tales como: soportes, guías, frenos, loops, etc.

El objetivo de este estudio para la estandarización de este procedimiento será realizado para los intercambiadores crudo-crudo en el sector de hidrocarburos, ya que manejan altas temperaturas, de esta manera no sólo se puede optimizar el análisis en las facilidades de producción, sino también en aplicaciones donde se necesite transportar crudo por medio de un intercambiador de calor.

1.3 Diagnóstico

Observando que no se ha realizado una investigación completa sobre la que se pueda sustentar el estudio de cargas en las boquillas de un intercambiador de calor en un artículo o tesis doctoral, demostrando esto en la búsqueda realizada de diferentes investigaciones para este proyecto, planteando de esta manera el establecimiento de un estado del arte.

1.4 Problema

En las investigaciones de proyectos de análisis de flexibilidad relacionados que se muestran en el ítem (2) dos de este documento no se pudo encontrar una recopilación de datos en la cual aparecieran proyectos con base en los tramos de tubería de diferentes equipos a los cuales se les hace un análisis para el estudio en las boquillas de conexión, aunque en la mayoría de proyectos de investigación sólo se encontraron estudios de casos especiales, cuyo procedimiento en cada uno es totalmente diferente, por lo cual no se logra una optimización muy visible, teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, surge la pregunta de investigación, **¿es necesario un análisis de flexibilidad para un intercambiador de calor?**. Con el ánimo de solucionar los problemas ya descritos.

Un análisis de flexibilidad debe realizarse por diferentes razones, ya sea porque el sistema maneje altas presiones, altas temperaturas o que estén conectados a equipos críticos. Existen aplicaciones especiales que requieren estudios detallados, sin embargo en aplicaciones más comunes se puede lograr un rendimiento mucho mayor si se estandariza un proceso, esto podría facilitar el análisis de esfuerzos en los intercambiadores de calor.

2 ESTADO DEL ARTE

Las investigaciones recientes que se han realizado en el diseño de tuberías para observar bajo qué criterios, qué herramientas se utilizan, en qué situaciones se realiza un análisis de flexibilidad y qué nuevos métodos además de los convencionales se han desarrollado para el diseño de tuberías.

Para poder entrar a analizar las investigaciones de diseño de tuberías hay que, primero, revisar qué implica diseñar una tubería, cómo se hace convencionalmente y la importancia que tiene dentro del desarrollo tecnológico.

El diseño de tuberías tiene como finalidad construir las rutas de transporte para fluidos, llámese fluidos a gases y líquidos, actualmente en los dos campos que más se diseña y se construye tuberías es para el transporte de agua e hidrocarburos.

Trazar un sistema de tubería consiste en el diseño, especificación y selección de los canales o vías por donde se transporta el fluido, válvulas, pernos, empaques, filtros, bridas, o-lets, reducciones, tees, codos y todo tipo de accesorios que se necesiten para poder transportar un fluido de un lado a otro, además, se debe tener en cuenta el diseño de la estructura que nos permite soportar la tubería y sus demás accesorios. Para poder diseñar una tubería se deben realizar una serie de pasos que nos permitan establecer las necesidades que se tienen para que cumplan con su propósito, los pasos son enumerados a continuación:

1. Establecer las condiciones de operación y diseño del proceso entre las cuales se debe establecer las propiedades del fluido tales como la presión, presión de vapor, temperatura, caudal, viscosidad, densidad y además determinar las condiciones del terreno y del viento, entre otros.
2. Determinar los diámetros de la tubería con base a las corridas hidráulicas para establecer las condiciones de proceso del sistema.
3. Seleccionar los materiales de la tubería considerando las propiedades del fluido que pueden llegar a afectarla, las cuales son comúnmente: corrosión, erosión, toxicidad, inflamabilidad, fragilización, resistencia.
4. Seleccionar los accesorios para la conexión entre tramos de tubería: Tees, reducciones, olets, codos, niples, bridas y válvulas.
5. Calculo del espesor mínimo de pared, para que la tubería soporte los esfuerzos producidos por el fluido.
6. Establecer los soportes y la estructura que permitirán que la tubería tenga una buena flexibilidad.
7. Análisis de esfuerzos de tubería debido a las cargas vivas y muertas, comprobando que éstas no sobre pasen los valores permisibles.
8. Si la tubería no cumple con los requerimientos necesarios se debe pensar en tomar acciones que permitan solucionar los problemas para que cumpla con la norma como lo son: reubicación de soportes, reubicación del recorrido de la tubería, guías, loops, stops, resortes, juntas de expansión (en un caso muy crítico) y otros tipos de medidas.

El diseño de tuberías se rige comúnmente por dos normas internacionales, la norma ASME (American Society of Mechanical Engineers) y la ANSI (American Standard Institute). Estas normas son el fruto del trabajo de ingenieros, investigadores y empresas que han podido estandarizar el diseño de tubería para condiciones específicas, un ejemplo es el transporte y la distribución de gas, aunque la norma ayuda a desarrollar diseños de tubería para muchos casos, aún quedan pendientes otros tantos por investigar de lo cual algunos casos trataremos a continuación.

La documentación sobre investigación en tuberías se puede clasificar en ciertas temáticas para entender mejor su aporte sobre el tema:

- Nuevos métodos de diseño de tuberías.

Este campo se viene desarrollando desde que se planteó la necesidad de diseñar tuberías, aunque los métodos actuales han alcanzado un grado de confiabilidad alto, algunos investigadores siguen desarrollando métodos alternativos para diseñar tuberías aportando cada día más formas de solucionar los problemas. El caso que se encontró fue el del ingeniero A. Rodríguez que desarrolló un método para calcular el esfuerzo admisible en tuberías mediante regresión polinómica.

El método de regresión polinómica permite determinar el espesor de la tubería por medio de curvas que permiten obtener por medio de una calculadora programable los esfuerzos admisibles de un sistema de tubería sencillo. Estas curvas son polinómicas de tercer, cuarto y quinto grado, que se ajustan a las curvas de temperatura-esfuerzo de los aceros utilizados en el transporte de hidrocarburos.

La regresión polinómica permite generar modelos con alto valor predictivo con resultados similares a los métodos convencionales y de una manera sencilla. Este tipo de investigaciones aporta a los métodos de diseño en tuberías a tener más herramientas a la hora de enfrentar diversas situaciones, teniendo varios caminos para llegar a resultados confiables y precisos.

- Diseño de tuberías por medio de computadora

El diseño por medio de computadora está basado en el método de los elementos finitos por lo cual es importante conocer de que se trata, la mayoría de fenómenos que ocurren en la naturaleza son fenómenos que transcurren de forma continua y en la mayoría de los casos se pueden representar por medio de ecuaciones diferenciales, pero en muchas ocasiones, dichas ecuaciones son difíciles de solucionar y, por eso, se pensó en desarrollar un método numérico que permitiera llegar a la solución de las ecuaciones.

El método numérico que se desarrolló fue el método por elementos finitos que consiste en tomar las ecuaciones diferenciales, que representan en una gráfica continua y la dividieron en infinitos elementos o puntos de esa gráfica, a este proceso se basa en pasar de un estado continuo a uno discreto. Una representación discreta es una sucesión de puntos que van cambiando en el tiempo, esto permite la solución por medio de sistemas de cómputo, porque es el lenguaje como ellos entienden los procesos.

El método de los elementos finitos fue desarrollado a partir de 1950 y han venido evolucionando hasta lo que hoy podemos encontrar en su aplicación en los software denominados CAE, este tipo de software permite simular geometrías,

condiciones físicas, nos ayuda a solucionar problemas de diferentes áreas como fluidos, transferencia de calor, campos magnéticos y de esfuerzos en estructuras. En pocas palabras se puede decir que un sistema CAE es un laboratorio con muchos recursos para evaluar infinidad de parámetros con las ventajas sobre los laboratorios convencionales de que no se necesita una infraestructura física, no se necesita construir prototipos para realizar pruebas, los costos son menores y se pueden plantear sistemas que en la vida real tardarían mucho tiempo en resolver.

Las investigaciones que se realizan por medio de los sistemas CAE van con base en evaluar diferentes diámetros y longitudes de tubería, someter la tubería a esfuerzos complejos, evaluar condiciones máximas de operación; ejemplo a altas temperaturas y altas presiones, probar diferentes materiales y observar su comportamiento bajo diferentes condiciones, y por último evaluar tuberías que ya han sido diseñadas para mejorarlas.

Una forma de describir sencillamente cómo se realiza el diseño de tuberías en un sistema CAE es primero definiendo las condiciones iniciales del sistema, propiedades del fluido, presión, temperatura, diámetro, longitud, aislamiento, propiedades del material en la cual se va a trabajar y otras propiedades o condiciones que pueda necesitar el diseñador, lo siguiente es que ya teniendo el modelo se procede a enmallar, lo anterior sirve para discretizar el modelo en otras palabras dividirlo en partes más pequeñas que se pueden analizar más rápidamente y de forma más precisa. Hay diferentes tipos de enmallado dependiendo de la precisión como se quiera que salgan los resultados, las formas de los enmallados pueden ser elementos tipo beam (puntos), elementos tipo link (líneas), cuadriláteros, triángulos y otras formas de polígonos.

Una vez enmallado el diseñador coloca las fuerzas, presiones, momentos y todo tipo de esfuerzos o cargas a la que esté sometido el modelo y después tiene que saber qué resultado quiere que el software le muestre: distribución de esfuerzos, valores de diferentes propiedades, y otros resultados. Por último los programas que también tienen la versatilidad de mostrarnos de forma dinámica dichos resultados utilizando imágenes, tablas, colores y símbolos como recurso para que la información sea clara y fácil de entender. Algunos de los programas CAE más conocidos son ANSYS, COMSOL y CATIA.

- Diseños de tubería en ambientes no comunes.

Aunque los software CAE son muy potentes aún depende de los análisis que realizan los ingenieros sobre las variables y condiciones que influyen en cualquier problema de diseño, porque el programa es sólo una herramienta que desarrolla ecuaciones y expresiones matemáticas, pero es el diseñador el que primero le suministra las condiciones que afectan el diseño y luego tiene que interpretar los resultados.

Por lo anterior, el siguiente campo donde se centra las investigaciones en ingeniería es el diseño de tuberías en ambientes no comunes por ejemplo: con el crecimiento del consumo energético, se ha tenido que buscar nuevas fuentes de energía en especial de combustibles fósiles los cuales no son renovables y, por ello, se ha tenido que ir a los ambientes más inhóspitos del planeta para conseguirlos, éste es el caso de las bases petroleras en los océanos. En estas zonas las tuberías están sometidas a un número mayor de cargas que en ambientes normales, puesto que, en el caso de las tuberías submarinas y de las tuberías enterradas, el agua y la tierra no tienen las mismas propiedades que tiene el aire. Además de los esfuerzos adicionales que se presentan también se tiene que se deben garantizar unas medidas de seguridad para el correcto funcionamiento de la tubería.

Para diseñar una tubería que esté en ambientes no convencionales se debe comenzar por evaluar las cargas, temperaturas, presiones, humedad y diferentes propiedades del ambiente que se consiguen por medio de la medición y la toma de datos. Este es tal vez uno de los procesos más difíciles a la hora de comenzar a diseñar una tubería porque las mediciones en muchos de los casos son difíciles de realizar ya sea por accesibilidad, por costo, falta de desarrollo tecnológico o por condiciones externas que las alteran. Una vez se tiene las condiciones y las limitantes del lugar se prosigue a evaluar las cargas a la que posiblemente está sometida la tubería, para ello se tienen que realizar desarrollos matemáticos que traten de modelar el comportamiento del sistema que se esté diseñando.

Cuando se obtiene el modelo matemático, el diseñador ha logrado lo más importante y lo que viene a continuación es probar su modelo utilizando las herramientas que tenga a su disposición, como lo venimos mencionando una de ellas son los programas CAE, también la construcción de prototipos y la experimentación dentro de laboratorios.

Los ambientes submarinos y suelos geodésicos, son los ambientes en los que más se ha realizado investigación debido a que últimamente el boom por la explotación petrolera a llevado a que para que se pueda obtener petróleo se deba instalar tuberías en esos lugares.

- Diseño de tuberías en casos especiales

Aunque el tema anterior también hace parte del tema que se trata a continuación se maneja aparte, porque es uno de los campos en que se está investigando y generando grandes cantidades de información, por eso era conveniente conocer más acerca del tema.

Los casos especiales en el diseño son muy frecuentes y tienen condiciones únicas en las cuales deben ser analizadas y estudiadas de forma detenida. Un ejemplo de un caso especial en el diseño de tuberías se dio en nuestro país donde a raíz de los atentados terroristas a poliductos y oleoductos se comenzó a estudiar como influían las abolladuras que causaban las explosiones, por lo tanto se comenzó a

analizar los nuevos factores en esas tuberías y como afectaba la tubería en su estructura. La investigación se realizó por parte de ECOPETROL, esto nos muestra que nuestro país también hay casos especiales en el diseño de tuberías, lo que conlleva a comprender que sería interesante comenzar a desarrollar más estudios en el caso en la empresas y universidades.

- Análisis de Desempeño de Tubería de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) de Pared Estructurada Usada Como Elevador de Pozo de Inspección (Manhole)

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar tubería de pared estructurada de Polietileno de alta densidad (HDPE) que puede ser elaborada localmente para ser usada como elevador de pozo de inspección (Manhole) y comprobar su desempeño en usos sub-superficiales. El método de evaluación constó de dos partes, en la primera se evaluó las cargas transmitidas a la estructura en base a las propiedades del terreno circundante, en la segunda parte se verificó el desempeño a largo-plazo del material y de la geometría de la tubería de pared estructurada frente a las cargas transmitidas por el terreno. El procedimiento de desempeño evaluó la deflexión, el pandeo, esfuerzos permisibles, límites de deformación en compresión, límites de deformación de flexión, además se analizó la deformación combinada, revisando las propiedades mecánicas y los requisitos estructurales en base a lo establecido por la norma ASTM F1759 (estándar para el diseño de manholes de polietileno) y a otros criterios como las normas AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).¹

- Análisis de Tuberías Enterradas en Suelos Loésicos: Efecto de la Saturación del Suelo

El cálculo y diseño de tuberías enterradas se realiza normalmente mediante fórmulas aproximadas o métodos semi-empíricos. A pesar de su amplia difusión, estas teorías no permiten explicar las fallas observadas en numerosas tuberías. Tampoco es posible tener en cuenta el efecto de la pérdida de confinamiento lateral que ocurre cuando se satura o inunda el terreno natural. Este problema es de fundamental importancia en los limos loésicos del centro de Argentina, y se ha convertido en una de las principales causas de rotura de tuberías. En este trabajo se desarrolló un modelo bidimensional en elementos finitos para analizar el comportamiento de tuberías enterradas en suelos loésicos. Los resultados obtenidos permitieron determinar la influencia de la rigidez de la tubería y de la saturación del suelo en las deflexiones de la misma. Se analizó el efecto de las interfases suelo-caño, la influencia del comportamiento no-elástico del suelo, la necesidad de considerar pequeñas y grandes deformaciones en el cálculo, y la contribución del ancho de la trinchera y del módulo de deformación del relleno en las deflexiones de las tuberías. Se concluye en este trabajo, que el método de

¹ J. L. Cevallos, A. Rigail. "Análisis de desempeño de Tubería de Polietileno de alta densidad (HDPE) de Pared Estructurada usada como elevador de Pozo de Inspección (Manhole)"

elementos finitos permite modelar en forma efectiva el comportamiento de las tuberías enterradas en suelos loésicos. Se demostró que los métodos tradicionales de cálculo tienden a predecir deflexiones y esfuerzos no conservadores, lo cual permite apreciar la importancia de utilizar métodos numéricos en el análisis de tuberías enterradas.²

- Análisis Estático de Flexibilidad de la Línea de Crudo de la Unidad de Destilación Atmosférica DA-1 de la Refinería Puerto la Cruz

En el presente trabajo de grado se realizó un Análisis Estático de Flexibilidad de la Línea de Crudo de la Unidad de Destilación Atmosférica DA-1 de la Refinería Puerto la Cruz, empleando el software de flexibilidad en tuberías CAESAR. Se analizaron los esfuerzos en el sistema, producidos por cargas sostenidas y expansiones térmicas, además se compararon las cargas en las boquillas de los diferentes equipos conectados a la línea, con su norma correspondiente. Se encontraron diferencias entre los isométricos de la empresa con respecto a las características actuales que posee la línea de crudo en planta. Los esfuerzos de las tuberías se compararon con los permisibles por la norma ASME B31.3, las cargas en la boquilla de la bomba se compararon con las fundamentadas por la API 610, las de los intercambiadores con la WRC 107 y por último las cargas en las boquillas o pases del horno con la API 560. Los esfuerzos obtenidos en el sistema de la línea de crudo sobrepasan a los permisibles por el código. Se observó que tanto la boquilla de la bomba como las boquillas del horno, superan las cargas admisibles por las normas que los rigen. Caso contrario al que sucede con las cargas en las boquillas de los intercambiadores de calor. Debido a esto se realizaron propuestas de mejoras en el sistema de tuberías, en donde se propuso cambiar el ruteo de la línea, agregando un lazo de expansión y añadir y/o reemplazar distintos soportes al sistema. Una vez aplicadas las propuestas planteadas, se realizó un análisis estático de flexibilidad al modelo recomendado, en el cual se comprobó, que el mismo se encuentra dentro de las cargas permisibles y los límites de esfuerzos establecidos en las normas o códigos que rigen a dicho sistema.³

Corrales, J. y Neptune, J., realizaron una análisis dinámico de flexibilidad de un sistema de bombeo residual con la finalidad de incrementar la confiabilidad del sistema, reduciendo de esta manera las fallas en el mismo a fin de lograr restituir la integridad mecánica, así como también incrementar la seguridad operacional del sistema. Se contemplaron evaluaciones estáticas y dinámicas de las líneas mediante la realización de simulaciones computacionales que sirvieron para la

² F. M. Francisca, E. R. Redolfi, C. A. Prato. "Análisis de tuberías enterradas en suelos loésicos: efecto de la saturación del suelo": Córdoba, Argentina: Universidad, Departamento de ingeniería civil.

³ C. J. Urrieta. *Análisis estático de flexibilidad de la línea de crudo de la unidad de destilación atmosférica da-1 de la refinería puerto la cruz*: Puerto La Cruz, Venezuela: Universidad, Departamento de Mecánica.

elaboración de un manual operativo del sistema de tuberías orientado a facilitar el manejo del sistema a los operadores.⁴

Bastardo, F. y Valdivia, P., realizaron un proyecto donde se plantean las condiciones precarias en las que se encuentran los cabezales de vapor de DA-1 en cuanto al retorno de condensado. Además, en este trabajo se determinó el ahorro que implica para la empresa la implementación del sistema diseñado.⁵

Molero, Y., realizó un proyecto donde se analizaron los esfuerzos y desplazamientos en las tuberías de succión y descarga de las bombas GA-15-10 y GA-17-10, de la Refinería Puerto La Cruz; tanto por cargas sostenidas como por expansiones térmicas. Se realizó una propuesta de modificación en las líneas de succión y descarga de las bombas involucradas. Seguidamente se realizó un análisis de flexibilidad en el modelo propuesto donde recomendó la instalación de juntas de expansión para absorber los desplazamientos de la tubería.⁶

Armas, R., realizó un proyecto donde se analizaron los esfuerzos en el sistema producidos por cargas sostenidas y expansiones térmicas; además se compararon las cargas en las boquillas de las 28 turbinas conectadas al sistema con las permisibles por la norma NEMA SM23. Se encontró que el 75% de los equipos tenían esfuerzos por encima de los admisibles.⁷

- Análisis Estructural de Tuberías de Oleoductos Abolladas por Carga Explosiva

Se registra en este artículo la amplia experiencia obtenida en el oleoducto Caño Limón Coveñas, OCLC, en Colombia, sobre el manejo y evaluación de las abolladuras causadas en la tubería por cargas explosivas. El OCLC ha sido sometido a más de 450 atentados terroristas con cargas explosivas. La mayoría de estos daños no llegan a la ruptura total de la tubería sino que generan deformaciones o abolladuras permanentes, mayores al 5%. Por lo tanto, se trata de adquirir elementos de juicio para la toma de decisiones sobre cuándo cambiarla y a su vez conocer el rango de presión en el cual puede operar el oleoducto de manera continua y segura. En el estudio se consideran varios aspectos relacionados con la evaluación de las abolladuras. Estos son: (a) La caracterización de las abolladuras

⁴ Corrales, J. y Neptune, J. “Estudio dinámico de flexibilidad del sistema de bombeo de residual de la Refinería Puerto la cruz”. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UDO, Puerto la Cruz, Venezuela (2001).

⁵ Bastardo, F. y Valdivia, P. “Mejoras al Sistema de Retiro y Condensado e Ingeniería Básica para el Diseño del Sistema de Recolección y Retorno de Condensado de DA-1 hacia Servicios Industriales”. Tesis de Grado, Coordinación Docente de Ingeniería Mecánica, USB, Venezuela (2005).

⁶ Molero, Y. “Análisis de Flexibilidad en las líneas de Succión y Descarga de las bombas GA-15-10 Y GA-7-10 de la casa de bombas en la Refinería de Puerto La Cruz”. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UNEFA, Puerto Cabello, Mayo (2004).

⁷ Armas, R. “Análisis Estático de Flexibilidad de Los Cabezales de Vapor de la Unidad DA-1 de la Refinería PLC”. Tesis de Grado, Coordinación Docente de Ingeniería Mecánica, USB, Sartenejas, Abril (2007).

en cuanto a la geometría, materiales (dureza, estructura metalográfica y esfuerzos, entre otros), efectos de las cargas explosivas y de la presión de operación y pruebas de presión hidrostática en tuberías a escala real. (b) La creación y validación de un nuevo procedimiento para evaluar las abolladuras. (c) Discusión del análisis con modelamiento numérico. Los resultados muestran un aumento en la resistencia elástica y de ruptura del material localizada en la zona afectada y, por lo tanto, una disminución de la resistencia a la fatiga. Esta última es posiblemente la causa de la ruptura posterior de la tubería una vez ha sido abollada por la carga explosiva. Las pruebas hidrostáticas han demostrado que la tubería, al ser sometida a la presión interna de operación, sufre una recuperación parcial de su forma. En el caso de una abolladura tipo 24%, a presión de 12,4 MPa, se recuperará 0,036 m.⁸

- Estudio de Esfuerzos Mecánicos en Tuberías Submarinas para Distribución de Gas Natural Costa Afuera

El incremento de la demanda en energía a nivel mundial ha hecho que empresas especializadas en esta área se dediquen a buscar recursos energéticos no renovables en lugares remotos e inhóspitos. La necesidad de llevar la energía hacia las fuentes de consumo ha estimulado el desarrollo de infraestructura para transportar gas natural desde los campos de producción y/o almacenamiento hacia plantas de tratamiento, facilidades de distribución y finalmente al consumidor, doméstico, comercial e industrial. Los sistemas de líneas submarinas para llevar gas a tierra firme son parte importante en la red de distribución para el consumo, su diseño requiere de estudios y análisis especializados para garantizar que los esfuerzos mecánicos resultantes cumplan con los valores permisibles y así asegurar su funcionamiento sin causar daños o accidentes. Este trabajo presentará un estudio de esfuerzos mecánicos en tuberías submarinas para distribución de gas natural costa afuera, desarrollando también una metodología para resolver problemas de diseño en tuberías submarinas concernientes a la determinación de esfuerzos mecánicos y los estándares aplicables para la evaluación de los niveles de esfuerzos permisibles para un funcionamiento seguro.⁹

3 JUSTIFICACIÓN

El motivo por el cual se pretende realizar una investigación sobre los resultados del análisis de esfuerzos de tuberías y una evaluación de cargas en las boquillas de un intercambiador de calor es básicamente para estandarizar el proceso de análisis, mostrar el procedimiento a seguir en el cual se pueden encontrar diferentes tipos

⁸ G. Latorre, R. Mora, F. Mejía, A. Martínez y R. Suárez. "Análisis estructural de tuberías de oleoductos abolladas por carga explosiva". Ecopetrol- Gerencia Caño Limón-Coveñas (1998).

⁹ J. L. Rojas. "Estudio de esfuerzos mecánicos en tuberías submarinas para distribución de gas natural costa afuera". Caracas, Venezuela. Decanato de estudios de Posgrados. (2008).

de intercambiadores que se deberán estudiar con sus respectivas normas y códigos aplicables sea el caso.

Registrar los resultados del estudio y las conclusiones de la estandarización nos facilitaría los análisis de flexibilidad posteriores que contengan el mismo tipo de equipos. De esta manera, optimizar los tiempos de Horas Hombre para este proceso. Un ejemplo claro es el continuo trabajo que hay que desarrollar para el análisis de esfuerzos en las boquillas de los intercambiadores de calor de tubo y coraza en el sector energético que, dependiendo del proceso, se deberá estudiar según la norma que aplique para los esfuerzos permisibles, implementando la estandarización del proceso de análisis se lograría un trabajo mucho más eficaz y completo, teniendo en cuenta la reducción del tiempo de trabajo.

Cabe resaltar que los análisis de esfuerzos y flexibilidad son muy comunes en la industria, lo cual nos conlleva al análisis de intercambiadores de calor crudo-crudo que se encuentran en la industria de hidrocarburos donde se presentan este tipo de intercambiadores con más frecuencia, de manera que logran facilitar en una gran cantidad el trabajo del diseño de tubería de proceso; no sólo los *Pipe Stress Engineers* deberían tener el conocimiento sino que también los *Piping Designers*, para que con un modelado rápido y sencillo puedan verificar ciertos pequeños diseños sin necesidad de tener un especialista al lado.

A nivel de producción, este análisis logra aumentar la vida útil de los equipos, ya que puede detectar los puntos críticos del sistema y las posibles fallas que puedan tener los intercambiadores, haciendo que disminuya su eficiencia hasta cero, dichos problemas pueden ser atacados de raíz antes de entrar en operación, algo que económicamente puede ser muy favorable para el cliente, gracias al análisis de flexibilidad y estudio de cargas en las boquillas.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Realizar el análisis de esfuerzos y flexibilidad del sistema de tubería de proceso y evaluar las cargas que se presentan en las boquillas de los intercambiadores de calor crudo-crudo mediante el programa CAESAR II.

4.2 Objetivos Específicos

- Modelar un sistema desde un rack de tubería hasta los intercambiadores de calor mediante el software CAESAR II.
- Verificar que el diseño de tubería cumpla con las normas y estándares aplicables.

- Determinar que los esfuerzos máximos en los puntos críticos del sistema no sobrepasen los esfuerzos permisibles del sistema de tubería.
- Verificar que los desplazamientos máximos de todo el sistema no sobrepasen los permisibles establecidos por las normas aplicables.
- Estandarizar el procedimiento de análisis de flexibilidad y evaluación de las boquillas de los intercambiadores de calor crudo-crudo.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Análisis de Esfuerzos

El análisis de esfuerzos proporciona la técnica necesaria para que los ingenieros diseñen sistemas de tubería sin sobre-esforzar o sobrecargar los componentes de tubería y equipo conectado. Los términos siguientes de mecánica aplicada están aquí brevemente discutidos (no definidos) para familiarizar al ingeniero con ellos.

5.2 Análisis de Flexibilidad

El análisis de flexibilidad de tuberías consiste en determinar el comportamiento de una tubería, al esfuerzo y deformación, por transportar un fluido a temperatura caliente, criogénica o que la misma tubería sea de una gran longitud. De este estudio de análisis de flexibilidad resulta el diseño de los soportes a la misma tubería que permitirán el desplazamiento de expansión o de contracción de la tubería.

- Líneas de tuberías de vapor (calientes).
- Líneas de nitrógeno (criogénicas).
- Ductos calientes.
- Soportes para tuberías.
- Cálculos de esfuerzos.
- Estaciones de bombeo y de válvulas.
- Sistema de venteo.
- Análisis térmico.
- Cambios de temperatura.

El análisis de flexibilidad estático en tuberías considera factores de operación como la presión y temperatura, tiene por objetivo cuantificar los esfuerzos causados por la dilatación térmica y el propio peso de la tubería. Los estudios de análisis de flexibilidad calculan con exactitud la tensión interna de la tubería, y las fuerzas y momentos que genera el sistema hacia la estructura que soporta la tubería y los equipos.

Las tensiones internas de la tubería son comparadas contra los esfuerzos máximos admisibles del material del tubo. Las fuerzas y los momentos generados por el sistema y que son transmitidos a los equipos y estructura soportante, son comparados contra los valores de norma que rigen los equipos y lo permitido por las estructuras.

5.3 Software CAESAR II

Desde su introducción en 1984 el CAESAR II es el programa para análisis de esfuerzos en tuberías preferido por los profesionales del área por su fácil uso, exactitud y reconocida aceptación mundial. Este programa hace de la modelación de redes de tuberías sujetas a cargas dinámicas, peso, presión, temperatura, sísmicas y otras cargas estáticas, una tarea sencilla.

CAESAR II es un programa totalmente interactivo, utilizado para el análisis estático y dinámico de redes de tuberías, sus extraordinarias características incluyen una capacidad virtualmente ilimitada de resolución de problemas.

CAESAR II puede importar los datos de multitud de programas de diseño de tuberías, entre ellos del CADWorx, del cual recibe datos y luego exporta los cambios que se hayan realizado, manteniendo el modelo siempre actualizado.

5.4 Esfuerzos

Al construir una estructura se necesita tanto un diseño adecuado como unos elementos que sean capaces de soportar las fuerzas, cargas y acciones a las que va a estar sometida. Los tipos de esfuerzos que deben soportar los diferentes elementos de las estructuras son:

Tracción. Hace que se separen entre sí las distintas partículas que componen una pieza, tendiendo a alargarla.

Compresión. Hace que se aproximen las diferentes partículas de un material, tendiendo a producir acortamientos o aplastamientos.

Cizallamiento o cortadura. Se produce cuando se aplican fuerzas perpendiculares a la pieza, haciendo que las partículas del material tiendan a resbalar o desplazarse las unas sobre las otras.

Flexión. Es una combinación de compresión y de tracción. Mientras que las fibras superiores de la pieza sometida a un esfuerzo de flexión se alargan, las inferiores se acortan, o viceversa.

Torsión. Las fuerzas de torsión son las que hacen que una pieza tienda a retorcerse sobre su eje central. Están sometidos a esfuerzos de torsión los ejes, las manivelas y los cigüeñales.

Cortadura. Es el esfuerzo al que está sometida una pieza cuando las fuerzas aplicadas tienden a cortarla o desgarrarla.

5.5 Desplazamientos

Cuando un medio continuo se deforma, la posición de sus partículas materiales cambia de ubicación en el espacio. Este cambio de posición se representa por el llamado vector desplazamiento, $u = (u_x, u_y, u_z)$. No debe confundirse desplazamiento con deformación, porque son conceptos diferentes aunque guardan una relación matemática entre ellos:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \sum_k \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)$$

Por ejemplo en un voladizo o ménsula empotrada en un extremo y libre en el otro, las deformaciones son máximas en el extremo empotrado y cero en el extremo libre, mientras que los desplazamientos son cero en el extremo empotrado y máximos en el extremo libre.

5.6 Dilatación Térmica

Se denomina dilatación térmica al aumento de longitud, volumen o alguna otra dimensión métrica que sufre un cuerpo físico debido al aumento de temperatura que se provoca en él por cualquier medio.

De una forma general, cuando aumentamos la temperatura de un cuerpo (sólido o líquido), aumentamos la agitación de las partículas que forman ese cuerpo. Esto causa un alejamiento entre las partículas, resultando en un aumento en las dimensiones del cuerpo (dilatación térmica). Por otra parte, una disminución en la temperatura de un cuerpo, acarrea una reducción en sus dimensiones (contracción térmica).

El coeficiente de dilatación lineal, designado por α_L , para una dimensión lineal cualquiera, se puede medir experimentalmente comparando el valor de dicha magnitud antes y después de donde ΔL , es el incremento de su integridad física cuando se aplica un pequeño cambio global y uniforme de temperatura ΔT a todo el cuerpo. El cambio total de longitud de la dimensión lineal que se considere, puede despejarse de la ecuación anterior:

$$L_f = L_0[1 + \alpha_L(T_f - T_0)]$$

Donde:

α =coeficiente de dilatación lineal [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
L0 = Longitud inicial
Lf = Longitud final
T0 = Temperatura inicial.
Tf = Temperatura final

5.7 Intercambiadores de Calor

Un intercambiador de calor se puede describir como un equipo en el que dos corrientes a distintas temperaturas fluyen sin mezclarse con el objeto de enfriar una de ellas o calentar la otra o ambas cosas a la vez.

El intercambiador de calor es uno de los equipos industriales más frecuentes. Prácticamente no existe industria en la que o se encuentre un intercambiador de calor, debido a que la operación de enfriamiento o calentamiento es inherente a todo proceso que maneje energía en cualquiera de sus formas. En una forma muy general podemos clasificarlos según el tipo de superficie:

- Intercambiadores con tubos
 - Intercambiadores de serpentines sumergidos.
 - Intercambiadores de doble tubo.
 - Intercambiadores de coraza y tubos.
 - Enfriadores de cascada (trombones).
- Intercambiadores de superficies planas
 - Recipientes encamisados.
 - Intercambiadores de placa.
- Intercambiadores compactos

Para efectos de este proyecto, se profundizará un poco más en los intercambiadores de calor de coraza y tubos.

- Intercambiador de Coraza y Tubos. Las unidades conocidas con este nombre están compuestas en esencia por tubos de sección circular montados dentro de una coraza cilíndrica con sus ejes paralelos al eje de la coraza. Los intercambiadores de calor líquido-líquido pertenecen en general a este grupo y también en algunos casos los intercambiadores gas-gas.

Son muy adecuados en las aplicaciones en las cuales la relación entre los coeficientes de transferencia de calor de las dos superficies o lados opuestos es generalmente del orden de 3 a 4 y los valores absolutos son en general menores que los correspondientes a los intercambiadores de calor líquido-líquido en un factor de 10 a 100, por lo tanto se requiere un volumen mucho mayor para transferir la misma cantidad de calor.

Existen muchas variedades de este tipo de intercambiadores; las diferencias dependen de la distribución de configuración de flujo y de los aspectos específicos de construcción. La configuración más común de flujo de intercambiadores líquido-líquido de coraza y tubos. Un factor muy importante para determinar el número de pasos del flujo por el lado de los tubos es la caída de presión permisible. El haz de tubos está provisto de deflectores para producir de este modo una distribución uniforme del flujo a través de él.

Con el fin de incrementar el área para la convección relativa al volumen del fluido, es común diseñar intercambiadores con múltiples tubos dentro de un simple intercambiador, con múltiples tubos es posible arreglar el flujo de manera que una región estará en paralelo y otra región en contracorriente.

5.8 ASME B31.3 Tubería de Proceso

Tuberías de proceso: se encuentran típicamente en las refinerías de petróleo, en plantas químicas, farmacéuticas, papeleras, de semiconductores y criogénicas, y en plantas y terminales relacionadas con el procesamiento.

El Código establece requisitos de ingeniería considerados necesarios para el diseño y la construcción seguros de tuberías a presión. Aunque la seguridad es un aspecto básico, este factor por sí solo no regirá, necesariamente, las especificaciones finales para cualquier instalación de tuberías. Se advierte al diseñador que el Código no es un manual de diseño y no elimina la necesidad del criterio de un ingeniero competente o de un diseñador.

Los requisitos para diseño del Código, se encuentran, de la manera más amplia posible, establecidos en términos de fórmulas y principios básicos de diseño. Estos se complementan, de ser necesario, con requisitos específicos a fin de asegurar una implementación coherente de principios, y de guiar la selección y aplicación de elementos de tuberías. El Código prohíbe diseños y prácticas conocidas como inseguras e incluye advertencias cuando se ameriten precauciones, pero ninguna prohibición está señalada.

Esta sección del Código incluye lo siguiente:

- Referencias a especificaciones de materiales aceptables y a normas de componentes, incluidos requisitos dimensionales y clasificaciones de presión-temperatura.
- Requisitos para el diseño de componentes y ensamblajes, incluidos soportes de tuberías.
- Requisitos y datos para la evaluación y limitación de esfuerzos, reacciones y movimientos asociados con la presión, los cambios de temperatura y otras fuerzas.
- Orientación y limitaciones para la selección y aplicación de materiales, componentes y métodos de unión.
- Requisitos para la fabricación, el ensamblaje y el montaje de tuberías.
- Requisitos para exámenes, inspecciones y pruebas de tuberías.

6 METODOLOGÍA

6.1 Consideraciones para el Modelado de la Línea

Para el modelado de las líneas desde un rack de tubería a unos intercambiadores de calor, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El modelado del sistema se realiza de acuerdo al diseño ya establecido de los intercambiadores crudo-crudo 320-HX-010-020-030 ubicados en batería 4 en campo rubiales.
- Las líneas desde el rack de tubería de 12" SCH. STD. hasta los intercambiadores de calor de diámetro de 40" se modelan con una tubería de diámetro de 6" SCH. STD. en Acero al Carbono ASTM A-106 Gr. B, anclada en su punto inicial, (conexión al rack de tubería), el extremo final de la línea se modela como un anclaje en su conexión al intercambiador de calor.
- Las líneas desde el rack de tubería hasta los intercambiadores de calor se modelan con sus respectivas elevaciones en una parte de su trayecto, tal como se especifica en el diseño.

- Los datos de proceso para el rack de tubería y las líneas que conectan a los intercambiadores son:
 - Temperatura de diseño (T1) = 219°F
 - Temperatura de operación (T2) = 169°F
 - Presión de diseño (P1) = 125 Psig
 - Presión de operación (P2) = 100 Psig
 - Presión Hidrostática (HP) = 187.5 Psig
 - Densidad del fluido = 57.8 Lb/ft³
 - Corrosión permisible = 1/8 in
 - Espesor de aislamiento = 1 in

6.2 Criterios Generales para el Estudio de Flexibilidad

Los criterios seguidos para el análisis de flexibilidad son los siguientes:

- Mantener las solicitaciones en las tuberías por debajo de los límites de esfuerzos permisibles a las condiciones de diseño, determinados por el código ASME B31.3.
- Mantener los desplazamientos en rangos permitidos. En el caso de las tuberías horizontales los desplazamientos en vertical no deben sobrepasar a 1" (25.4mm) y en la horizontal no más de 6" (150mm), o lo que permitan las restricciones impuestas al sistema, sin crear excesivas cargas laterales.
- Mantener las cargas sobre los soportes dentro de los límites que sus elementos estructurales lo permitan. Siempre se tratará de usar al máximo soportes estandarizados.
- Mantener las cargas de las boquillas de los equipos por debajo de sus valores admisibles.
- El coeficiente de fricción utilizado es 0.3.

6.3 Procedimiento y Evaluación

- Se realizará la evaluación de esfuerzos locales en la interconexión de las boquillas de entrada del intercambiador, bajo Welding Research Council Bulletin WRC 107, para asegurar que las cargas evaluadas estén dentro de los valores permisibles para este tipo de equipos.

- Las líneas de salida del intercambiador también se evaluarán, ubicando la soportería y cumpliendo los “Criterios generales para el estudio de flexibilidad” y las recomendaciones del código ASME B31.3.

6.4 Casos de Análisis y Variables Empleadas

Tabla 1. Casos de carga utilizados para el análisis

DESCRIPCIÓN CASOS DE CARGA - CONDICIONES DE OPERACIÓN		
CASO	CARGAS	DESCRIPCIÓN
L1	WW+HP	PRUEBA HIDROSTÁTICA
L2	W+T1+P1	CONDICIÓN DE DISEÑO
L3	W+T2+P2	CONDICIÓN DE OPERACIÓN
L4	W+P1	CARGAS SOSTENIDAS DISEÑO
L5	W+P2	CARGAS SOSTENIDAS OPERACIÓN
L6	L2-L4	EXPANSIÓN TÉRMICA DISEÑO
L7	L3-L4	EXPANSIÓN TÉRMICA OPERACIÓN

Donde:

- T1 = Temperatura 1 = Temperatura de diseño.
 T2 = Temperatura 2 = Temperatura de operación.
 P1 = Presión 1 = Presión de diseño.
 P2 = Presión 2 = Presión de operación.
 W = Peso.

6.5 Casos de Carga

Caso 1: Se asignarán las condiciones de prueba de presión hidrostática (presión y peso de tubería con agua a temperatura ambiente).

L1= CASO 1 (HYD): WW + HP

Caso 2: Se asignarán las condiciones de diseño (presión 1 y temperatura 1) y el peso de tubería W incluyendo el fluido.

L2= CASO 2 (OPE): W + T1 + P1

Casos 3: Se asignarán las condiciones de operación (presión 2 y temperatura 2) y el peso de tubería W incluyendo el fluido.

L3= CASO 3 (OPE): W + T2 + P2

Casos 4 y 5: Permiten verificar el cumplimiento del código ASME B 31.3 para los casos de cargas sostenidas (peso y presión).

L4= CASO 4 (SUS): W + P1 Cargas Sostenidas en diseño

L5= CASO 5 (SUS): W + P2 Cargas Sostenidas en operación

Casos 6 y 7: Permiten verificar el cumplimiento del código ASME B 31.3 para los casos de expansión.

L6= CASO 6 (EXP): L6 = L2 – L4 Cargas Expansión en diseño

L7= CASO 7 (EXP): L7 = L3 – L4 Cargas Expansión en operación.

7 CRONOGRAMA

Tabla 2. Cronograma de actividades

FASE	ACTIVIDAD	DURACIÓN (meses)		
		1	2	3
Fase Inicial	Recolección de información del proceso y diseño del sistema	■		
Fase de Modelamiento	Modelado del sistema en el software CAESAR II	■	■	
	Inclusión de datos de proceso del sistema dentro del software CAESAR II		■	
	Corrida del sistema en el software CAESAR II		■	
Fase de Evaluación de Errores del Modelado	Evaluación de errores generados por el modelamiento		■	
	Corrección de errores		■	
Fase de Análisis	Análisis contra la norma ASME B31.3 de esfuerzos permisibles		■	
	Análisis de desplazamientos por dilatación térmica		■	
	Evaluación de cargas en las boquillas de acuerdo a la norma WRC 107		■	
Fase de Evaluación del Sistema por fallas de Diseño	Revisión detallada del modelado			■
	Ubicación de soportes, guías y frenos			■
	Corrida del sistema en el software CAESAR II			■
	Análisis de cumplimiento de acuerdo a los códigos			■
Fase final	Redacción del borrador del trabajo			■
	Redacción final del trabajo			■

8 PRESUPUESTO

A continuación se observan los gastos por mano de obra tabla 3, los gastos por servicios tabla 4 y los gastos totales que hacen parte del presupuesto del proyecto.

Tabla 3. Mano de obra.

Ítem	Unidad	No de unidades	Valor unidad	Subtotal	Financiación
Investigador 1	Horas	100	\$ 50.000,00	\$ 5.000.000,00	Recursos Propios
Investigador 2	Horas	100	\$ 50.000,00	\$ 5.000.000,00	Recursos Propios
Asesor	Horas	50	\$ 80.000,00	\$ 4.000.000,00	Universidad
Subtotal				\$ 14.00.000,00	

Tabla 4. Servicios

Ítem	Unidad	No de unidades	Valor unidad	Subtotal	Financiación
Internet	Horas	20	\$ 1.500,00	\$ 30.000,00	Recursos Propios
Licencia Software Caesar II	Un	1	\$ 40.000.000,00	\$ 40.000.000,00	Recursos Propios
Impresiones	#	300	\$ 100,00	\$ 30.000,00	Recursos Propios
Subtotal				\$ 60.000,00	

Subtotal 1	\$14,000,000.00
Subtotal 2	\$60,000.00
Total sin imprevistos	\$14,060,000.00
10% de imprevistos	\$1,406,000.00

BIBLIOGRAFÍA

SÆVIK, Svein. "Theoretical and experimental studies of stresses in flexible pipes". *Computers & Structures*, Volumen 89, Issues 23–24, Diciembre 2011, Pages 2273-2291.

CEVALLOS, José Luis. "Análisis de desempeño de Tubería de Polietileno de alta densidad (HDPE) de Pared Estructurada usada como elevador de Pozo de Inspección (Manhole) de Aguas Iluvias". *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Disponible en:

< <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/13582>>

KIM, Yun-Jae, HUH, Nam-Su ,KIM, Young-Jin. "Reference stress based fracture mechanics analysis for circumferential through-wall cracked pipes: experimental validation". *Nuclear Engineering and Design*, Volumen 226, Issue 2, Diciembre 2003, Paginas 83-96

FRANCO, Francisca M., REDOLFI, Emilio R., PRATO, Carlos. "Análisis de tuberías enterradas en suelos loésicos: efecto de la saturación del suelo". *Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*. Volumen 2, núm. 2; Diciembre 2002.

LATORRE, G., MORA, R., MARTÍNEZ, A., SUÁREZ, R., "Análisis estructural de tuberías de oleoductos abolladas por carga explosiva". *C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro*, Volumen 1 no. 4, Bucaramanga; Diciembre 1998 .

RODRÍGUEZ, A.J. "Determinación del esfuerzo admisible en tuberías mediante regresión polinómica". *Ingeniería Química*. 38(440): 108-115, 4 Ref; 2006.

AREVALO, Nelson, TORRES, Alfredo. "Estudio Para La Selección E Instalación De Línea Submarina Para Recepción Y Despacho De Combustible En Terminal Barbasquillo". *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Disponible en: <<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/1863>>

MATHAN, G., SIVA PRASAD, N. "Study of dynamic response of piping system with gasketed flanged joints using finite element analysis". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volumen 89, Enero 2012, Pages 28-32.

FONSECA, E., DE MELO, F., OLIVEIRA, C. "The thermal and mechanical behaviour of structural steel piping systems". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volumen 82, Issue 2, Febrero 2005, Paginas 145-153.

BEER, Ferdinand. "*Mecánica de Materiales*". DF, México: Editorial Mc Graw Hill. 1995.

HIBBELER, Russell. “*Mecánica de Materiales*”. DF, México: Editorial Continental S.A. 1994.

KREITH, Frank. “*Mechanical Engineering Handbook*”. Boca Raton: Editorial CRC Press. 1999.

KANNAPPAN, Sam. “*Introducción al análisis de esfuerzos de tuberías*”. Knoxville, Tennessee: Agosto 2008. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/6416463/Introduccion-Al-Analisis-de-Esfuerzos-de-Tuberia>>

CARREÑO, Pedro. “*Rediseño de la línea 200-stl-38-749-k, perteneciente al área 38 de cvg bauxilum, mediante un análisis de esfuerzos*”. Ciudad Guayana: Marzo 2009.