

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



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA PARA EL
SISTEMA DE TRANSPORTE DE UREA EN EL MUELLE
PETROQUÍMICO DE PEQUIVEN - JOSE”**

Realizado por:

HERNÁNDEZ SÁNCHEZ MANUEL EDUARDO

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO MECÁNICO

Puerto la Cruz, Junio De 2009.

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



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA PARA EL
SISTEMA DE TRANSPORTE DE UREA EN EL MUELLE
PETROQUÍMICO DE PEQUIVEN - JOSE”**

ASESORES

Ing. Yordy González
Asesor Académico

Ing. Robin Sánchez.
Asesor Industrial

Puerto la Cruz, Junio De 2009.

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



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA PARA EL
SISTEMA DE TRANSPORTE DE UREA EN EL MUELLE
PETROQUÍMICO DE PEQUIVEN - JOSE”**

JURADO

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

Prof. Yordy González

Asesor Académico

Prof. Simon Bittar

Jurado Principal

Prof. Edgar Rodríguez

Jurado Principal

Puerto la Cruz, Junio De 2009.

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

Tanto mi trabajo de grado, como mi carrera y cada uno de los logros alcanzados en ella, se los dedico a mi Padre Celestial por ser mi guía, refugio y fortaleza ante cualquier adversidad. Nada podría ser posible en mi vida si no fuese su voluntad y sin estar unido a Él de día y de noche, fortaleciendo nuestra relación en su palabra, para llenarme de su paz, gracia y misericordia.

A mis Padres terrenales Cástulo Hernández y Noris de Hernández, les dedico este y cada uno de los triunfos que junto a ellos, y gracias a sus grandes y maravillosas enseñanzas me permiten ser valiente y seguir adelante con sus consejos.

“Solo en Dios encuentro paz; mi salvación viene de él. Solo él me salva y me protege. No caeré, porque él es mi refugio.”

Salmo 62: 1-2

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi Señor Jesucristo por haberme permitido estudiar esta hermosa carrera y poder concluir con este proyecto, que es un conglomerado de ideas, propuestas y análisis, que son fruto de mi esfuerzo y dedicación, y de muchas otras personas a las cuales debo agradecer como lo son:

- ✓ Mis padres Cástulo Hernández y Noris Sánchez, quienes nunca mendigaron el amor que sienten para conmigo y cada uno de sus hijos. Todos sus esfuerzos, paciencia, tolerancia y sabiduría para encaminarnos por una hermosa vida, son la evidencia de los especiales padres que han sido, que son y que seguirán siendo.
- ✓ A cada uno de mis hermanos Freddy, Gustavo, Marco y Lisette, gracias por su ayuda, apoyo y enseñanzas que de alguna u otra forma cada uno me ha entregado. En especial a Marco mil gracias por todos tus consejos y asesorías que me ayudaron a canalizar las ideas que pude plasmar en este proyecto.
- ✓ José Manuel Lao quiero darle mil gracias por formar parte de mi vida como otra imagen paterna que siempre ha estado dispuesto a entregar su cariño y su ayuda hacia mí a lo largo de toda mi vida.
- ✓ A Rafael y Rode Guzmán muchas gracias por su amistad, siempre han sido las personas en quien he podido confiar plenamente recibiendo de ustedes muchas enseñanzas, afecto y comprensión para compartir momentos buenos y malos.
- ✓ A mi gran amigo Freddy Morón que fue un excelente compañero de estudio durante los 4 años que estuvimos formándonos en nuestra carrera, estoy seguro que nuestros títulos de Ingeniero son fruto de un esfuerzo mutuo que junto a otras personas logramos alcanzar.
- ✓ Alex Gómez muchas gracias por cada enseñanza que siempre estabas dispuesto a transmitir, tú responsabilidad y orden me enseñaron muchas cosas que he podido aplicar y cambiar en mí para ser mejor persona.
- ✓ Nestor Rocca y Robert Sánchez también quiero agradecerles por su amistad, colaboración y ayuda que compartimos en muchas oportunidades, a pesar de que todos somos completamente diferentes pudimos compartir muy buenos momentos.
- ✓ Jesús Yáñez y Miguel Barrios mis grandes hermanos, gracias por los buenos momentos compartidos con ustedes y sus familias. Éxitos en todo.

- ✓ Jesús Brito y Gisela Gómez estaré infinitamente agradecido de todas las comidas que me brindaron en sus hogares, y además de eso siempre estaban dispuestos a compartir ideas, propuestas, pensamientos e inquietudes conmigo para juntos buscar una enseñanza de cada experiencia vivida.
- ✓ A mis compañeros udistas que de alguna u otra forma compartieron esta extenuante, increíble, y forzosa experiencia de estudiar en la UDO, pero para ninguno fue imposible y para todos muy gratificante: Gabriela Tobia, Cesar Moreno, José Mago, José García, Andreína Cabeza, Krizia Lazzarini y Milagros Rosal, mucho éxito.
- ✓ Al Profesor Yordy González por su colaboración y disposición para la realización de este trabajo, fueron muchas las enseñanzas que le agradezco.
- ✓ A Moisés Flores por su colaboración con la realización de mi pasantita.
- ✓ En Pequiven muchas gracias a Adolfo Carrillo, José Vergara, Robín Sánchez, Luis Bideau, Vladimir Ramos, y muy especialmente a Rubén Velásquez por toda su ayuda y enseñanzas en el muelle.
- ✓ A las Prof. Cecilia Marcano y Yuvi Moreno, al Ing. Gabriel González y a la Lic. Yolirma Márquez muchas gracias por su valiosa colaboración en la realización de esta tesis de grado.

También quiero agradecer a las personas que de alguna forma me ayudaron durante mi carrera y que no he podido nombrar aquí, a cada uno muchas gracias.

“El Señor es mi poderoso protector; en él confié plenamente, y él me ayudó. Mi corazón está alegre; cantaré y daré gracias al Señor”

Salmo 28:7

RESUMEN

En el siguiente trabajo se desarrolla el diseño de un sistema de limpieza para el sistema de transporte de urea del muelle petroquímico de Jose, el cual esta formado por una red de tuberías que opera con agua y aire alternativamente, que garantiza el cumplimiento de los requerimientos básicos para la limpieza de dicho sistema y una mejor calidad en el servicio de estibado de urea en los buques. En primer lugar se describe el contexto operacional del sistema de transporte en estudio, para plantear distintas alternativas del ruteo de tuberías del sistema de limpieza. Posteriormente se dimensionan cada una de las propuestas, y se realiza un análisis hidráulico de cada una que permitió seleccionar como mejor alternativa a la propuesta N° 3, la cual operara a razón de 3554,36 L/min de agua y 1381,32 L/min de aire. Seguidamente se estudian los niveles de esfuerzos permisibles en la red de tuberías a través del simulador Caesar II 5.1, los cuales permitieron constatar que el esfuerzo máximo se encuentra 37% por debajo del valor máximo permisible. Esta verificación dio cabida a la realización de los planos y redacción del presente trabajo donde se incluye la documentación referente al tema, los elementos seleccionados para la red de tuberías, diagramas, manuales y cálculos necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto.

CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Pequiven S.A.

Pequiven, Petroquímica de Venezuela, S.A. es la corporación del Estado venezolano encargada de producir y comercializar productos petroquímicos fundamentales con prioridad hacia el mercado nacional y con capacidad de exportación.

La empresa propicia la creación de empresas mixtas y de producción social (EPS), estimula el desarrollo agrícola e industrial de las cadenas productivas y promueve el equilibrio social con alta sensibilidad comunitaria y ecológica. Pequiven ofrece a los mercados nacional e internacional más de 40 productos petroquímicos. Su visión internacional del negocio y la vinculación con importantes socios en la conformación de las empresas mixtas en la que participa le ha permitido consolidar una importante presencia en los mercados de la región, así como de otras partes del mundo.

Pequiven fue creada en 1977 asumiendo las operaciones del Instituto Venezolano de Petroquímica (IVP), fundado en 1955. Desde su transformación, Pequiven ha vivido sucesivas etapas de reestructuración, consolidación y expansión, en las que ha ampliado su campo de operaciones, desarrollando un importante mercado interno y externo para sus productos. La empresa ha orientado su crecimiento en tres líneas específicas de negocios: fertilizantes, productos químicos industriales y olefinas y resinas plásticas.

Mediante decreto del Presidente de la República Bolivariana de Venezuela, Hugo Chávez Frías, Pequiven pasó de ser filial de de Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA), para convertirse en una corporación independiente, adscrita al Ministerio de Energía y Petróleo. Esta independencia le permitirá a la empresa la

consolidación de un sector industrial fortalecido capaz de impulsar las industrias transformadoras del plástico así como al sector agroindustrial y al de productos químicos industriales.

1.1.1 Visión

Ser la Corporación capaz de transformar a Venezuela en una potencia petroquímica mundial para impulsar su desarrollo.

1.1.2 Misión

Producir y comercializar con eficiencia y calidad productos químicos y petroquímicos, en armonía con el ambiente y su entorno, garantizando la atención prioritaria a la demanda nacional, con el fin de impulsar el desarrollo económico y social de Venezuela.

1.1.3 Valores

Los valores organizacionales son el conjunto de creencias que una organización tiene sobre su quehacer diario. Son el soporte de la cultura organizacional, inspiran y dan marco a la Visión, Misión y Objetivos de la empresa. Los valores organizacionales se deben internalizar de tal manera que se manifiesten y sean tangibles en la actividad diaria de cada uno de los miembros de la empresa, por lo tanto los valores de Pequiven son:

- Respeto
- Lealtad
- Compromiso Social
- Humildad
- Honestidad
- Responsabilidad

- Disciplina
- Sentido de Pertenencia
- Justicia Social
- Igualdad

1.2 Planteamiento del problema

Petroquímica de Venezuela (PEQUIVEN) posee tres Complejos Industriales a lo largo de la costa norte del país: El Tablazo (Zulia), Morón (Carabobo) y José Antonio Anzoátegui (Anzoátegui), los cuales comercializan y exportan sus productos por medio de instalaciones portuarias que facilitan el despacho para Venezuela y el mundo. El Complejo Criogénico e Industrial General de división José Antonio Anzoátegui, ubicado en el Municipio Simón Bolívar del Estado Anzoátegui, se inauguró el 14 de agosto de 1990 con el fin de impulsar el desarrollo de la petroquímica en el oriente del país, y actuar como condominio industrial de las empresas mixtas que operan en el área mediante el suministro de los servicios básicos necesarios para su operación.

Uno de los productos comercializados en el Complejo Petroquímico de Jose es la urea, este fertilizante sólido de forma granular y de ligero olor amoniacal, posee una concentración de Nitrógeno de 46%, que forma una parte de las proteínas y la clorofila de los cultivos. Este fertilizante es producido por la empresa mixta Fertilizantes Nitrogenados (FERTINITRO), y comercializada por vía terrestre, en sacos de aproximadamente 100 Kg.; y por vía marítima, en una presentación a granel para consumo nacional y exportaciones, por medio de buques y a través de las instalaciones del muelle o terminal marítimo de Pequiven. Para trasladar la urea desde el depósito en Fertinitro, a lo largo del muelle petroquímico hasta los buques, existe un sistema de bandas transportadoras que conducen el producto a través del muelle manteniendo sus propiedades físicas y químicas durante la trayectoria, que posteriormente lo vierten en un brazo de

carga (Shiploader) que se encarga de distribuirlo de manera uniforme en las bodegas del buque.

Una vez completada la carga del producto en un buque, se debe realizar mantenimiento general al sistema de transporte antes mencionado, para evitar que las propiedades corrosivas y contaminantes de la urea afecten tanto las instalaciones del muelle, como al personal que en ellas laboran. La mejor sustancia para realizar la limpieza es el agua, debido a que proporciona las condiciones necesarias para diluir la urea. Luego de la limpieza con agua, las instalaciones son secadas con aire de instrumentos en las zonas donde el agua puede quedar retenida, causar corrosión de las estructuras u otro tipo de daño. Actualmente la limpieza del sistema es realizada por los operadores de la planta, que con ayuda de mangueras y equipos de limpieza (cepillos, haraganes, entre otros), deben desplazarse a través de toda la plataforma e ir conectando los equipos a las distintas tomas de agua existentes en el muelle. Este procedimiento expone a los trabajadores a un mayor contacto físico con la urea, que puede generarle enfermedades; también los expone a posibles accidentes, debido a las maniobras que deben realizar durante la limpieza por no poseer la estructura necesaria para tal fin; y además genera un elevado nivel de consumo de agua a la empresa, y disminuye la vida útil de las estructuras.

Por las razones antes expuestas, en beneficio de una mejor calidad del servicio de transporte de urea en la empresa, es necesario diseñar un sistema de limpieza automático que permita cumplir con las necesidades de mantenimiento del sistema de transporte en estudio, disminuyendo el nivel de consumo de agua y aire de servicio y los elevados costos que éste genera a la corporación, y que a su vez, genere mayor tiempo al trabajador de llevar a cabo otras actividades en su puesto de trabajo. Además el diseño debe mantenerse dentro de los estándares establecidos por la empresa para el diseño de tuberías, y por las regulaciones ambientales que rigen los procesos de mantenimiento en las instalaciones del muelle.

Para el diseño del sistema de limpieza se realiza una evaluación de los procedimientos de mantenimiento actuales que se llevan a cabo en sistema de transporte en estudio, para establecer las alternativas del ruteo de las redes de tuberías y para la correcta selección de los accesorios que componen cada propuesta. Se realizará el dimensionamiento de las tuberías hidráulicamente y mecánicamente, y serán verificados a través de un análisis hidráulico basado en los datos obtenidos del software Pipephase versión 9.0, y un análisis de esfuerzos de acuerdo con los resultados del análisis mecánico hecho con el software Caesar II 5.1. De esta manera podrá seleccionarse como mejor propuesta la que mejor se adapte a las necesidades que debe satisfacer para cumplir con su operación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de limpieza para el sistema de transporte de urea en el muelle petroquímico de Pequiven-Jose, con el fin de mejorarse la calidad del servicio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1) Describir el contexto operacional del sistema de transporte de urea en el muelle petroquímico de Pequiven-Jose.
- 2) Plantear distintas alternativas para el ruteo y arreglo de tuberías del sistema de limpieza.
- 3) Determinar las capacidades y dimensiones preliminares de las redes de tuberías.

- 4) Realizar un análisis hidráulico mediante el simulador Pipephase ® versión 9.0 para la selección de la mejor alternativa.
- 5) Establecer los niveles de esfuerzos en la red de tuberías seleccionada a través del simulador Caesar II ® versión 5.1.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

El diseño de redes de tuberías, para sistemas de limpieza por riego, aspersión, distribución de fluidos, entre tantos usos existentes para las mismas, no ha tenido cambios considerables durante las últimas décadas, los cálculos y ecuaciones utilizadas para cálculos hidráulicos datan de hace más de tres décadas, pero las herramientas utilizadas para agilizar dichos cálculos, iteraciones, distribuciones y optimización de los distintos sistemas de tubería, han evolucionado de manera considerable con el avance de la tecnología a nivel mundial, permitiendo de esta manera, que mediante un programa computarizado puedan realizarse los cálculos y/o el dimensionamiento de diferentes distribuciones de tuberías.

Vidalón [1] en el año 2003, realizó el diseño y cálculo de tuberías de servicio para una línea de envasado de una empresa productora de cerveza, el diseño propuesto garantizó la presión exigida en cada una de las máquinas de la línea. Para lograr esto, realizó los cálculos de pérdidas de presión en las tuberías de servicio, tomando en cuenta la capacidad instalada de la planta y los requerimientos de cada equipo en la línea de producción. Para ello estableció la ruta de las tuberías, efectuó las mediciones correspondientes y la selección de válvulas y accesorios, y además realizó un análisis de los soportes ubicados en el área de la línea, y un análisis de flexibilidad en las tuberías para evitar que los equipos y maquinarias sufran daños en sus componentes.

Sánchez [2] en el 2007, presentó el estudio de flexibilidad del sistema de tuberías de descarga de suspensión de bauxita molida, para determinar las causas de algunos problemas tales como: desprendimiento de soportes, fugas en bridas y oscilaciones y rupturas en las tuberías. Para este fin se realizaron una serie de

estudios sobre los factores de mayor incidencia sobre el problema, comparaciones entre las condiciones físicas y variables de operacionales actuales con respecto a las de diseño, y un análisis de flexibilidad del sistema de tuberías utilizando el software Caesar II. Todos estos estudios permitieron determinar el origen de las fallas, mediante el uso del diagrama de Ishikawa (diagrama causa-efecto), para considerar y plantear los reemplazos, rediseño en la soportaría y recomendaciones de operación del sistema, que permitan el buen funcionamiento en dicho sistema de tuberías.

Aguado [3] en el año 2007, planteó las modificaciones necesarias para adecuar el sistema de tuberías de un tanque de diesel, a las condiciones requeridas por un mercado en particular. Para sugerir las modificaciones, posterior a la evaluación de las características de operación del sistema en estudio, se recopiló la información referente al dimensionamiento, presión, flujo y tipo de material del sistema de tuberías del tanque, y se compararon los datos obtenidos con los establecidos en las normas de PDVSA para el cálculo hidráulico de tuberías. Los cambios planteados fueron evaluados mediante el simulador Pipephase, para observar si las tuberías pueden operar con seguridad a las condiciones normales de presión y flujo.

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 Complejo petroquímico de jose

Denominado oficialmente como Complejo Criogénico e Industrial General de división José Antonio Anzoátegui se inauguró el 14 de agosto de 1990, con el fin de impulsar el desarrollo de la petroquímica en el Oriente del país y actuar como condominio industrial de las empresas mixtas que operan en el área, mediante el suministro de los servicios básicos necesarios para su operación.

Al igual que los Complejos El Tablazo en el estado Zulia, y Morón en el estado Carabobo, el complejo José Antonio Anzoátegui está ubicado en la zona norte del país, cuya situación geográfica ofrece ventajas comerciales para la corporación abasteciendo desde el occidente al oriente, respectivamente, el mercado nacional, y exportando sus productos a diferentes mercados internacionales, mediante las instalaciones portuarias que facilitan su despacho.

2.2.1.1 Reseña Histórica

En el año 1987 se inician los trabajos de construcción del Complejo Petroquímico José en el estado Anzoátegui, y cuatro años más tarde entran en operación la planta de MTBE de SuperOctanos y la de Polipropileno de Propilven en dicho complejo industrial. Un año más tarde, en 1992, se constituye dos nuevas empresas mixta Supermetanol y Metor, destinadas a la producción de Metanol.

Posteriormente en 1997 se concreta con Mobil Chemical un acuerdo preliminar de desarrollo para construir y operar un complejo de Olefinas y Derivados en el oriente del país, y también se da inicio a la construcción del Muelle Petroquímico y Sistema de Suministro de Agua Industrial para el Complejo José.

En 1999 Pequiven estrena Aguas Industriales de José en asociación con Earth Tech. El convenio estimó unos 150 millones de dólares los cuales fueron destinados a la creación de una planta de tratamiento de agua, con la finalidad de surtir a todas las empresas que hacen vida en este complejo.

Luego del paro petrolero del 2001, este complejo alcanzó su estado 100 % operativo a inicios del año 2003, año en que se firma en tiempo record una nueva Convención Colectiva Pequiven (2003 – 2005) con excelentes beneficios para 1.370 trabajadores de Pequiven. 2005 fue el año en que el Presidente de la República Bolivariana de Venezuela, Hugo Chávez Frías, decreta la creación de

Pequiven como Corporación Petroquímica de Venezuela S.A., independiente de PDVSA y adscrita al Ministerio de Energía y Petróleo.

La nueva Convención colectiva Pequiven fue firmada en el año 2006 con vigencia hasta el año 2008, un año mas tarde se inician los trabajos de construcción de la segunda fase del muelle, y los servicios prestados por dichas instalaciones alcanzan los valores mas elevados de despacho de urea granular y amoniaco liquido.

2.2.1.2 Ubicación Geográfica

Este complejo petroquímico se ubica en la zona norte del estado Anzoátegui a 25 Km de la ciudad de Barcelona, teniendo un 85 % de su extensión en territorio del municipio Simón Bolívar y el 15 % restante pertenece al municipio Peñalver (ver figura 2.1)

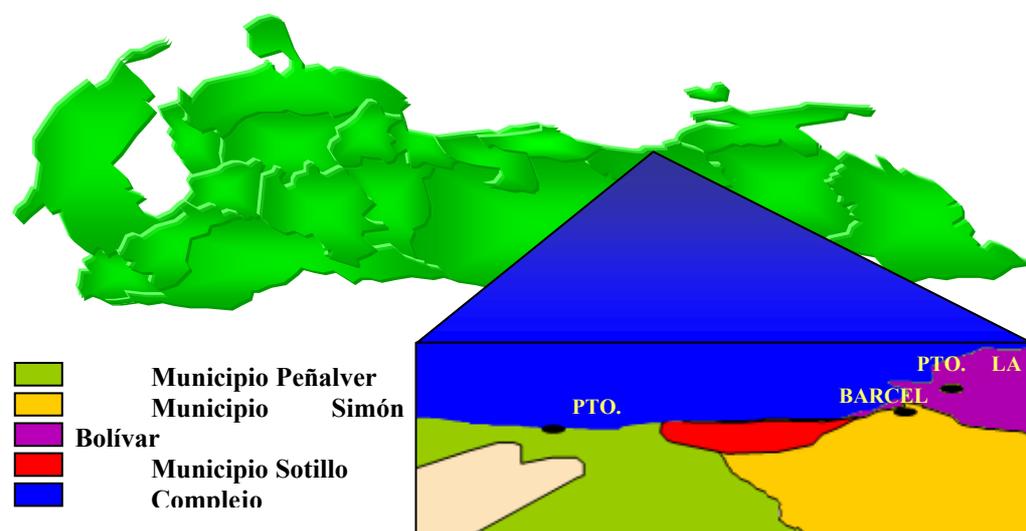


Figura 2.1: Ubicación geográfica del Complejo Petroquímico de Jose.

[1]

2.2.1.3 Unidades de Servicios

El complejo Petroquímico G/D José Antonio Anzoátegui cuenta con tres unidades de servicios que prestan servicios a todas las empresas ubicadas dentro del Complejo Criogénico de Jose, dichas unidades son:

- ✓ Planta de Agua: Es una planta de tratamiento de agua, que potabiliza el agua proveniente del río Neverí, a través de distintos procesos tales como: sedimentación, filtración, y cloración, hasta obtener diversos tipos de aguas que varían en su pureza o potabilidad dependiendo de las necesidades de cada cliente.
- ✓ Planta Eléctrica: Esta unidad recibe energía eléctrica a través del suministro de alta tensión de la empresa EDELCA, y la transforma a corrientes que varían en su intensidad y voltaje, de acuerdo a los requerimientos en las distintas plantas del Complejo.
- ✓ Muelle Petroquímico: Este Terminal marino sirve de estibador entre las plantas de las Empresas Mixtas adscritas a Pequiven, y los buques de transporte y carga de los distintos productos comercializados por dichas empresas tales como: urea, amoniaco y metanoles (ver figura 2.2).



Figura 2.2: Vista actual del Muelle Petroquímico de Jose [4].

2.2.2 Urea granular

Es un fertilizante que se caracteriza por poseer un color blanco característico, tiene forma de perla o gránulo, y es altamente soluble e higroscópica. Este fertilizante es producido por la empresa Fertilizantes Nitrogenados de Venezuela (FERTINITRO), y posee la mayor concentración de Nitrógeno (46%) en el mundo, el cual es de vital importancia para la nutrición de los cultivos. El Nitrógeno es parte integral de las proteínas y de la clorofila, es uno de los elementos de mayor movilidad dentro de las plantas, y está asociado con el crecimiento vegetativo vigoroso y un intenso color verde de las hojas.

Este producto es también conocido como carbamida, carbonildiamida o ácido carbamídico, es el nombre del ácido carbónico de la diamida, cuya fórmula química es $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. Se presenta como un sólido cristalino, y no es una sustancia peligrosa, ni cancerígena, ni inflamable, tampoco se considera altamente tóxica aunque en algunas personas es levemente irritante cuando tiene contacto con los ojos y la piel.

Entre algunas de las ventajas que ofrece la utilización de urea como fertilizante tenemos: ahorro en el manejo, transporte y aplicación en el campo; su uso es compatible en mezclas físicas de fertilizantes granulados; puede emplearse tanto en forma sólida como en solución; en comparación con las fuentes a base de nitratos, no se pierde fácilmente por el lavado; además, el proceso de transformación de la urea en amoníaco, garantiza una suplencia adecuada del Nitrógeno a las plantas en condiciones tropicales [5].

2.2.3 Muelle petroquímico de Jose

Este muelle tiene como objetivo transportar los productos químicos producidos en las Plantas de Fertilizantes Nitrogenados (FERTINITRO), Metanoles de Oriente (METOR), Supermetanol (SUMECA), y Súper Octanos (SOCA) en el Complejo Petroquímico de Jose, tales como Urea, Amoníaco,

Metanol, MTBE e IsoOctano, hacia los barcos de carga que atraquen en las plataformas destinadas para tal fin.

Este Terminal marino esta siendo construido en dos fases (ver figura 2.3): Fase I, Consiste de una plataforma petroquímica con dos muelles (A y B), una plataforma para el manejo de Urea a granel y la otra para el transporte de contenedores (100% Operativas); y una Fase II, consiste de una segunda plataforma petroquímica con dos muelles (C y D), para el manejo de productos líquidos (50 % operativa).

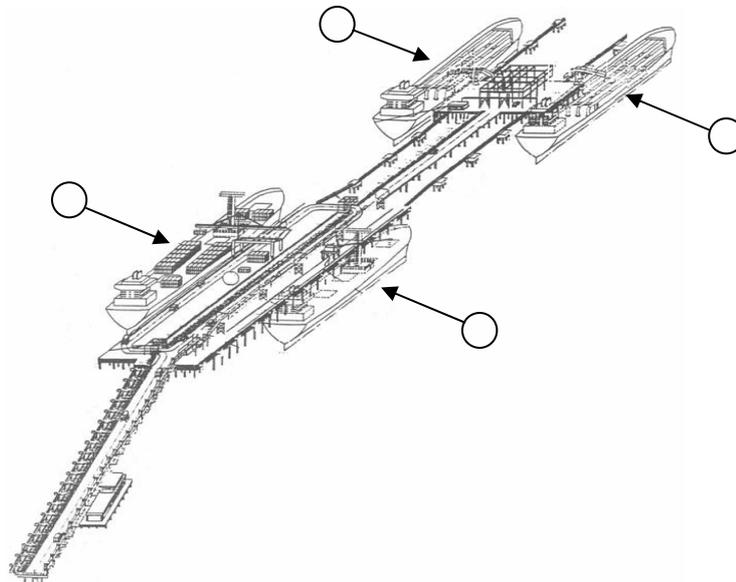


Figura 2.3: Plataformas del Muelle Petroquímico de Jose [6]

2.2.3.1 Plataformas del Muelle Petroquímico de Jose.

2.2.3.1.1 Plataforma para el manejo de Urea (A)

Esta plataforma es usada para el despacho de Urea a granel a una rata de carga 1000 Ton/hora desde la planta de Fertilizante (FERTINITRO). Esta tiene una torre de transferencia que recibe Urea desde la planta de fertilizantes a través

de una cinta tubular transportadora, y se deposita en otra cinta transportadora que se desplaza por una larga galería, que a su vez, esta equipada con un sistema que permite mover el punto de transferencia entre dicha cinta transportadora y el brazo de carga, este último posee un telescopio ascendente que distribuye la urea en las galerías de los buques (Ver figura 2.4).



(A)

(B)

Figura 2.4: Plataforma de manejo de Urea. (A) Vista frontal. (B) Galería y Brazo de carga (Ship Loader). Fuente Propia.

El muelle de Urea tiene capacidad para recibir buques de hasta 65.000 DWT (Toneladas de peso muerto) y esta equipado con las utilidades requeridas

para su operación, servicios de electricidad, agua potable, aire de instrumentos, y dos canales de acceso libre para vehículos. Las características de los buques que aplican para esta plataforma se presentan en la tabla 2.1.

2.2.3.1.2 Plataforma de Contenedores (B)

Esta plataforma, orientada en la dirección predominante de las olas (22°0'0" NE), esta prevista para la carga y descarga de contenedores o unidades tipo trailer, mientras la embarcación se encuentre asegurada al muelle. Una grúa con sistema de deslice es usada para el manejo de contenedores tanto vacíos como llenos. También ha sido prevista de un espacio para el transito de vehículos de carga y descarga de contenedores bajo la grúa, y otra zona para acceso a la plataforma desde la vía principal del muelle.

Esta plataforma posee las utilidades requeridas para operar, tales como: servicio de electricidad, agua potable y de servicio, y aire de instrumentos. El muelle de contenedores tiene una capacidad de recibir buques de hasta 50.000 DWT.

Esta plataforma construida de concreto reforzado posee un área nominal de 255 m de largo por 27 m de ancho, donde el punto más alto de la cubierta está a 6 msnm (por encima del nivel del mar). Las características de los buques que aplican para esta plataforma son las mostradas en la tabla 2.2.

Tabla 2.1: Características de los buque que aplican para la plataforma “A”, “C” y “D” del Muelle Petroquímico de Jose [6]

Plataforma de manejo de productos sólidos y líquidos.	Buques mayor tamaño	Buques tamaño intermedio	Buques menor tamaño
DWT	650	25000	600

	00		0
Ángulo en el compartimiento (deg)	10	10	15
Velocidad en el compartimiento (m)	0.15	0.20	0.30
Máximo desplazamiento de carga (Tons)	8500	33000	8000
Longitud general (m)	255	180	120
Ancho (m)	33.50	25.00	16.00
Compensación del múltiple (hacia la proa) (m)	10.00	8.00	3.00
Calado (cargado) (m)	13.00	10.00	7.50

Tabla 2.2: Características de los buque que aplican para la plataforma “B” del Muelle Petroquímico de Jose [6].

Plataforma de Contenedores	Buques mayor tamaño	Buques tamaño intermedio	Buques menor tamaño
DWT	50000	25000	3000
Ángulo en el compartimiento (deg)	10	10	15
Velocidad en el compartimiento (m)	0.15	0.20	0.30
Máximo desplazamiento de carga (Tons)	85000	33000	8000
Longitud general (m)	255	180	120

Ancho (m)	33.5 0	25.00	16.0 0
Compensación del múltiple (hacia la proa) (m)	10.0 0	8.00	3.00
Calado (cargado) (m)	13.0	10.0	7.50

2.2.3.1.3 Plataforma de Líquidos (C y D)

Estas plataformas tienen capacidad para recibir buques hasta 65.000 DWT en ambos muelles para la carga y descarga de productos petroquímicos tales como el Amoniaco (en el caso de la Fase I), y Metanol, MTBE, Isooctanos, entre otros, (planificado para la Fase II del Terminal Marino). Esto quiere decir que, para la Fase I, fuera de los diez brazos de carga que son planeado para esta plataforma, solo el brazo de carga M-0501 es utilizado para el despacho de amoniaco de la planta de Fertilizante (FERTINITRO), Este fue instalado en el muelle con todos los servicios requeridos para las operaciones (electricidad, servicio de agua, agua potable, aire de instrumentos, nitrógeno, y la seguridad necesaria, detección y extinción de fuego y un sistema de detección de gases toxicos).

La plataforma del oeste “C” esta provista con un brazo de carga de amoniaco que tiene dos conexiones: una conexión de carga de 12”, provista de una conexión de desacople rápido; y una conexión de venteo de 8”, también provista de una conexión de desacople rápido. Las características de los buques que aplican para estas plataformas se presentan en la tabla 2.1.

2.2.3.1.4 Plataforma de Servicio

La plataforma de servicio es el área de control del Terminal Marino, aquí se encuentra localizada la sala de control para las distintas operaciones, tiene una instalación donde funcionan equipos mecánicos, compresores de aire, secadores y

tanques acumuladores para instrumentos de aire, una sub-estación eléctrica, un generador eléctrico de emergencia, bombas de diesel-fuel contra incendio y los tanques de fuel asociados con cada bomba, tanques de espuma contra incendio, y un sistema que proporciona tal espuma hacia todas las plataformas del muelle (generador de solución de espuma).

La plataforma ha sido abastecida con equipos de seguridad personal y con equipos de aseo personal: baños, duchas y cuarto para el cambio de la ropa de los trabajadores. El tanque para el almacenaje de aguas residuales de los buques esta también localizada en la plataforma de servicio. Hay libre acceso para vehículos alrededor del edificio y una entrada adicional para visitantes.

Esta plataforma tiene dos funciones principales:

- ✓ Alojar varios equipos de operación del muelle (Sala de Control) ubicados en un edificio que incluye la sala de bombas, sala de compresores, sala de equipos eléctricos y Sala de Control.
- ✓ Proveer un servicio de remolcadores.

Para la Plataforma de Servicios, fue construido un pequeño muelle que permite el embarque y desembarque de remolcadores, embarcaciones de seguridad, ambulancias, entre otros barcos de menor tamaño, las características de las embarcaciones que aplican para dicha plataforma se presentan a continuación.

Tabla 2.3: Características de los buque que aplican para la plataforma de servicios del Muelle Petroquímico de Jose [6].

Plataforma de Servicios	Bote de remolcadores	Embarcación de servicios
--------------------------------	-----------------------------	---------------------------------

Ángulo en el compartimiento (deg)	20	20
Velocidad en el compartimiento (m)	0.45	0.45
Máximo desplazamiento de carga (Tons)	500	130
Longitud general (m)	23	13
Ancho (m)	7.50	4.00
Calado (cargado) (m)	3.50	2.00

2.2.3.2 Condiciones Ambientales del Muelle Petroquímico de Jose

2.2.3.2.1 Temperatura:

Temperatura Máxima: 37° C

Temperatura Promedio Anual: 28° C

Temperatura Mínima Externa: 15° C (Bulbo seco); 24° C (Bulbo húmedo)

Temperatura para Diseño de Compresores y Ventiladores: 34° C (Bulbo seco); 30° C (Bulbo húmedo).

2.2.3.2.2 Presión:

Presión Atmosférica Promedio: 1.013 Bar

Promedio de Elevación: 7.5 m

2.2.3.2.3 Humedad:

Humedad Promedio: 77%

Máxima humedad en verano: 100%

Humedad de Diseño: 79%

2.2.3.2.4 Vientos:

Promedio de Velocidad: 54 Km/h (6 msnm.)

Velocidad Máxima Anual (invierno): 170 Km/h (15 msnm.)

2.2.3.2.5 Lluvias:

Promedio Anual: 850mm

Máxima en una Hora: 63.4 mm

Máxima en 5 minutos: 17.9 mm. [6]

2.2.4 Flujo de fluidos en tuberías

Los flujos de fluidos en tuberías se encuentran en todas las partes de una industria. Desde el suministro de agua hasta el transporte de fluidos industriales, los ingenieros han diseñado y construido incontables kilómetros de tuberías a gran escala. También abundan unidades de tuberías más pequeñas: en controles hidráulicos, en sistemas de calefacción y aire acondicionado, y en sistemas de flujo cardiovasculares y pulmonares, por nombrar algunos. Estos flujos pueden ser incompresibles o compresibles, y el material del que están hechas las tuberías puede variar de acuerdo a las necesidades. Se considera que los sistemas de tuberías se componen de elementos y componentes. Básicamente, los elementos de tubos son tramos de tubos de diámetro constante y los componentes son válvulas, tes, codos, reductores o cualquier otro dispositivo que provoque una pérdida en el sistema. Además de los componentes y elementos, las bombas agregan energía al sistema y las turbinas extraen energía.

2.2.5 Fluido

Desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, un fluido es una sustancia que no puede resistir un esfuerzo cortante. Si éste se presenta, el fluido se deforma y continúa deformándose mientras el esfuerzo exista. En este proceso de deformación continua las diferentes partes del fluido cambian de posición relativa en forma permanente; este movimiento relativo se conoce como flujo, en otros términos, el flujo es el movimiento de un fluido con respecto a un sistema de inercial de coordenadas, generalmente ubicado en un contorno sólido.

El flujo en un canal o tubería se puede determinar mediante las siguientes cantidades físicas: desplazamiento de una partícula en el fluido, velocidad o aceleración de una partícula de fluido en un punto del campo de flujo.

Las cantidades anteriores pueden permanecer constantes o variar con el espacio y/o con el tiempo. Con respecto al espacio, los flujos se califican en *uniformes* (si permanecen constantes en el espacio) y *no uniformes*. Con respecto al tiempo se clasifican en *permanentes o estacionarios* (si las cantidades del flujo permanecen constantes en el tiempo) y *no permanentes*. [7]

2.2.5.1 Propiedades de los Fluidos

2.2.5.1.1 Densidad (ρ): se define como la masa por unidad de volumen. La unidad utilizada para esta propiedad en el Sistema Internacional (SI) es Kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Donde: m = masa del fluido (Kg.)

V = volumen que ocupa dicha masa en un lugar determinado (m³)

2.2.5.1.2 Peso específico (γ): es una propiedad directamente relacionada con la densidad. Se define como:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.2)$$

Donde g es la gravedad local (m/s²). Las unidades de peso específico son N/m³ (lb/ft³).

2.2.5.1.3 Gravedad específica (S): esta propiedad es utilizada con frecuencia para determinar el peso específico o la densidad de un fluido (en general o un líquido). Se define como la relación de la densidad de una sustancia con la del agua a una temperatura de referencia de 4°C [8]

$$S = \frac{\rho}{\rho_{agua}} = \frac{\gamma}{\gamma_{agua}} \quad (2.3)$$

2.2.5.1.4 Viscosidad: expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. El coeficiente de la viscosidad absoluta, o simplemente la viscosidad absoluta de un fluido, es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas, por lo tanto esta propiedad desempeña un rol primordial en la generación de la turbulencia de un fluido. Se pueden describir dos tipos de viscosidad:

- ✓ Viscosidad absoluta o dinámica (ν): Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el newton segundo por metro cuadrado (N s/m^2), o sea kilogramo por metro segundo (Kg/m). El poise es la unidad correspondiente en el sistema CGS de unidades y tiene dimensiones de DINA segundo por centímetro cuadrado o de gramos por centímetro segundo. El submúltiplo centipoise (cP), 10^{-2} poise, es la unidad más utilizada para expresar este tipo de viscosidad.
- ✓ Viscosidad cinemática (μ): Es el cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad. En el Sistema Internacional su unidad es el metro cuadrado por segundo (m^2/s). La unidad CGS correspondiente es el store (St), con dimensiones de centímetro cuadrado por segundo y el centistoke (sSt), 10^{-2} stoke, que es el submúltiplo mas utilizado. [9]

2.2.5.2 Regímenes de flujo de fluidos en tuberías

Los flujos donde los efectos de la viscosidad son importantes y no pueden ser ignorados, son llamados flujos viscosos, y pueden ser clasificados como flujo laminar y flujo turbulento.

2.2.5.2.1 Flujo laminar: el fluido fluye sin mezclado significativo de sus partículas próximas entre sí. Si se inyecta un colorante, por ejemplo, el flujo no se mezclaría con el fluido cercano excepto por actividad molecular; conservara su identidad durante un lapso de tiempo relativamente largo. Los esfuerzos cortantes viscosos siempre influyen en un flujo laminar, y éste flujo depende en gran medida del tiempo (t), pudiendo ser discontinuo (por causa del movimiento errático de un pistón), o continuo como se muestra en la figura 2.5 (b).

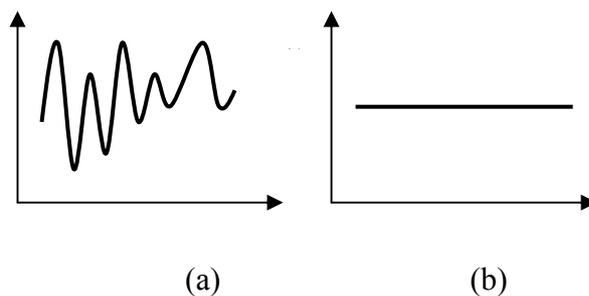


Figura 2.5: Velocidad como función del tiempo en un flujo laminar: a) flujo discontinuo; b) flujo continuo. [8]

2.2.5.2.2 Flujo turbulento: en este tipo de flujo los movimientos del fluido varían irregularmente de tal suerte que las cantidades tales como la velocidad y presión muestran una variación aleatoria con el tiempo (ver figura 2.5.a) y las coordenadas espaciales. Un flujo turbulento “continuo” puede ser definido como: un flujo en que las cantidades físicas promedio dependen del tiempo y no cambian con éste. Un colorante inyectado en un flujo turbulento se mezclará de inmediato por la acción del movimiento aleatorio de sus partículas; rápidamente perderá su identidad en este proceso de difusión.

La razón por la cual un flujo puede ser laminar o turbulento tiene que ver con lo que sucede a una pequeña perturbación del flujo, una perturbación de las componentes de velocidad. Una perturbación del flujo puede incrementar o disminuir su tamaño. Si una perturbación del flujo en un flujo laminar se incrementa, el flujo puede llegar a ser turbulento; si la perturbación disminuye, el flujo permanece laminar.

2.2.6 Número de Reynolds

Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, es decir, laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad de flujo. El número de Reynolds, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad, y puede expresarse como se muestra en la ecuación 2.4.

El régimen de flujo en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2000 y turbulento si el número de Reynolds es superior a 4000. Entre estos dos valores está la zona denominada “crítica” donde el régimen de flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición, dependiendo de muchas condiciones con posibilidad de variación.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.4)$$

Donde: Re = Número de Reynolds

V = Velocidad del fluido (m/s)

D = Diámetro de la tubería (m)

ν = Viscosidad cinemática del fluido (m²/s). [8]

2.2.7 Factor de fricción (f)

El factor de fricción para condiciones de flujo laminar es función solo del número de Reynolds (Ecuación 2.4); mientras que para el flujo turbulento es también función del tipo de pared de la tubería.

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.5)$$

Donde: f = factor de fricción.

Re = Número de Reynolds.

El factor de fricción en la zona crítica es indeterminado y tiene límites más bajos si el flujo es laminar y más altos si el flujo es turbulento. Para números de Reynolds superiores a 4000, las condiciones de flujo vuelven a ser más estables y pueden establecerse factores de fricción definitivos. Esto es importante, ya que permite al ingeniero determinar las características del flujo de cualquier fluido que se mueva por una tubería, suponiendo conocidas la viscosidad y la densidad en las condiciones de flujo. Por consiguiente se han establecido distintas ecuaciones y diagramas que permiten calcular el factor de fricción para flujos turbulentos, siendo el *Diagrama de Moddy* y la ecuación de *Colebrook* (Ecuación 2.6) los más utilizados.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \text{Log} \left(\frac{E/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (2.6)$$

Donde: f = factor de fricción.

E/D = Rugosidad relativa.

Re = Número de Reynolds.

2.2.8 Ecuación general de la energía. Teorema de Bernoulli

Es la ecuación que se utiliza con más frecuencia en aplicaciones de flujo de fluidos que cualquier otra ecuación. Es importante saber sus limitaciones para no mal utilizar dicha ecuación; una de ellas es que los efectos viscosos son omitidos, debido a que con frecuencia son muy pequeños comparados con las diferencias de presión en el campo del flujo.

Esta ecuación proviene de la segunda ley de Newton aplicada a una partícula de fluido, debe su nombre a Daniel Bernoulli (1700-1782) quien planteó las siguientes suposiciones para dicha ecuación: flujo inviscido (ningunos esfuerzos cortantes), flujo continuo, a lo largo de la línea de corriente y densidad constante.

El teorema de Bernoulli es una forma de expresión de la aplicación de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos en tuberías, y tiene una gran importancia en la mecánica de los fluidos ya que agrupa los tres tipos de energía que se consideran para un fluido en movimiento. Estas son:

$$\frac{V^2}{2g} = \text{Energía cinética.}$$

$$\frac{P}{\gamma} = \text{Energía de presión o piezométrica.}$$

$$Z = \text{Energía potencial}$$

Las tres vienen expresadas en metros o pies de columna de fluido y su suma permanece constante a lo largo de un sistema de tuberías. Para un fluido ideal, en el que se consideran las pérdidas de carga por efecto del roce igual a cero, se tiene:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \quad (2.7)$$

Donde: g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

P = Presión del fluido (Pa)

γ = Peso específico del fluido (N/m^3)

z = Distancia o altura de la toma (m).

2.2.9 Pérdidas en tuberías

Las pérdidas se dividen en dos categorías: (a) aquellas provocadas por esfuerzos cortantes del fluido en la pared de elementos de tubería, y (b) las provocadas por componentes de tuberías. Las primeras se distribuyen a lo largo de los elementos de tuberías, las segundas se tratan como discontinuidades discretas en la línea piezométrica y en la línea de energía y comúnmente se conocen como pérdidas menores; se deben principalmente a flujos separados o secundarios.

Para el caso (a), el flujo de los fluidos en tuberías está siempre acompañado de rozamiento de las partículas del fluido entre sí y, consecuentemente, por la pérdida de energía disponible; en otras palabras, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo. La ecuación general de dicha pérdida de presión, conocida como la fórmula de Darcy-Weisbach y que se expresa en metros de fluido, es:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.8)$$

Donde: hf = Pérdida por fricción (m)

f = Factor de fricción

L = Longitud de la tubería (m)

D = Diámetro de la tubería (m)

V = Velocidad del fluido (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Esta ecuación es válida tanto para flujo laminar como turbulento de cualquier líquido en una tubería. Sin embargo, puede suceder que debido a velocidades extremas, la presión corriente abajo disminuya de tal manera que llegue a igualar la presión de vapor del líquido, apareciendo el fenómeno conocido como cavitación y los caudales obtenidos por cálculo sean inexactos. Con las restricciones necesarias la ecuación de Darcy-Weisbach puede utilizarse con gases y vapores (fluidos compresibles).

Las variaciones de f dentro de un amplio intervalo de *número de Reynolds* y en un intervalo de asperezas relativa, puede observarse en el *diagrama de Moody*. Para analizar redes de tuberías, es conveniente expresar el comportamiento de f mediante fórmulas empíricas, aproximadas, equivalentes en las cuales el factor de fricción se obtiene directamente del número de Reynolds y la aspereza o rugosidad relativa.

En el segundo caso (b) las pérdidas provocadas por los componentes de tuberías son llamadas *pérdidas menores*, entre ellas se encuentran aquellas ocasionadas por los cambios de sección, curvaturas, codos, válvulas y accesorios de todos los tipos. Aunque en las tuberías largas, éstas son distintamente pérdidas “pequeñas” y con frecuencia se pueden despreciar sin incurrir en error serio, en las tuberías más cortas, se debe tener un conocimiento preciso para lograr cálculos de ingeniería correctos de sus efectos. [8]

Los aspectos generales de las pérdidas menores en tuberías, se pueden obtener a partir de un estudio del fenómeno de flujo alrededor de una obstrucción súbita colocada en una tubería, la que crea condiciones de flujo típicas de aquellas que disipan la energía y causan estas pérdidas menores. Por lo general este tipo de pérdidas resultan de cambios más bien abruptos (en magnitud y dirección) de la velocidad; un aumento de la velocidad (aceleración) se asocia con una pequeña pérdida de carga, pero una disminución de la velocidad (desaceleración) ocasiona una gran pérdida de carga debido a la producción de turbulencia de gran escala.

Los experimentos iniciales con agua (a un alto número de Reynolds) indicaron que las pérdidas menores varían aproximadamente con el cuadrado de la velocidad, y condujeron a la proposición de la ecuación básica mostrada a continuación:

$$hm = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.9)$$

Donde: hm = Pérdida por accesorio (m)

K = coeficiente de pérdida o de resistencia

V = Velocidad del fluido (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

El coeficiente de pérdida K , es, para una geometría dada de flujo, prácticamente constante a un número de Reynolds alto; este coeficiente tiende a aumentar al aumentar la rugosidad y decrecer el número de Reynolds (igual a la tendencia que sigue el factor de fricción f). La magnitud del coeficiente de pérdida de determina principalmente por la geometría del flujo, esto es, por la forma de la obstrucción o del accesorio para tubo [10]

2.2.10 Sistema de tuberías

Se denomina tubería industrial a todo sistema constituido por tubos, válvulas, conexiones y demás accesorios, con la finalidad de conducir fluidos, líquidos o gaseosos entre diversos puntos de una unidad industrial.

Toda tubería, consideradas las fijaciones en equipos y/o soportes, se comporta mecánicamente como una estructura, y como tal, está sujeta a diversos tipos de demandas tales como tracción, compresión, flexión, torsión, entre otras.

A continuación, se mencionan las principales causas de apareamiento de deformaciones estructurales en una tubería:

- ✓ El peso propio del tubo más el del fluido conducido.
- ✓ El peso propio del aislamiento térmico.
- ✓ El peso propio de accesorios.
- ✓ La expansión / contracción térmica restringida de los diversos tramos de la tubería.
- ✓ El rozamiento generado en los soportes convencionales.
- ✓ Reacciones de soportes de resorte y/o juntas de expansión.

Aunque menos frecuentes, otras causas de deformaciones estructurales pueden, en determinadas situaciones, ser consideradas de elevada importancia, tales como:

- ✓ La acción del viento (cargas de viento).
- ✓ Vibraciones transmitidas por equipos adyacentes.
- ✓ Movimientos sísmicos.

Existen entretanto demandas adicionales, particulares a las tuberías industriales, que tienden a deformar cada uno de sus elementos simultáneamente en todas las direcciones, independientemente de su comportamiento como viga: conjunción de la presión y del peso propio, variación de temperatura. Por lo tanto, deben ser consideradas todavía, las posibles situaciones anormales, de las cuales citaremos como más importantes:

- ✓ Sobre-presión debida a golpes de ariete.
- ✓ Sobre-presión debida a la expansión de un líquido bloqueado en la tubería por aumento de temperatura.
- ✓ Apareamiento de vacío como consecuencia del resfriamiento de gases en una tubería.

- ✓ Condiciones especiales de partida y/o parada temporaria.

Así una tubería puede ser encarada como una estructura tubular, y como tal, cada componente estará sujeta a tensiones resultantes de los diferentes estados de carga aliados a los efectos de la presión a que está sometida. Si consideramos un elemento de tubo, tendremos presentes cuatro tipos de tensiones, conforme a la figura 2.6 [11].

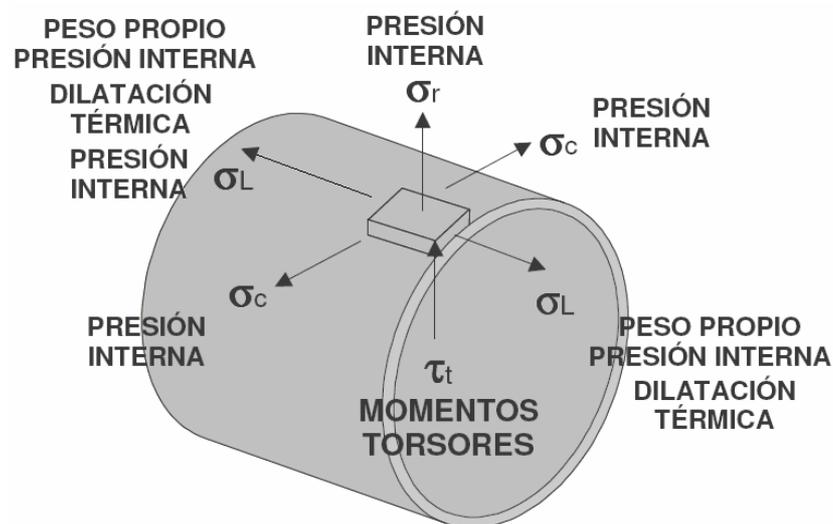


Figura 2.6: Tensiones presentes en un elemento de tubería.

Fuente: Flexilatina de Venezuela C.A., (2006) [11].

2.2.11 Procedimiento de diseño de tuberías

Según los manuales de procedimientos establecidos por el Centro de Investigación, Educación y Desarrollo de PDVSA (C.I.E.D), los pasos que deben completarse en el diseño mecánico de cualquier sistema de tuberías son:

1. Establecimiento de las condiciones de diseño incluyendo presión, temperaturas y otras condiciones, tales como la velocidad del viento, movimientos sísmicos, choques de fluido, gradientes térmicos y número de ciclos de varias cargas.

2. Determinación del diámetro de la tubería, el cual depende fundamentalmente de las condiciones del proceso, es decir, del caudal, la velocidad y la presión del fluido.
3. Selección de los materiales de la tubería con base en corrosión y resistencia.
4. Selección de las clases de "rating" de bridas y válvulas.
5. Cálculo del espesor mínimo de pared (Schedule) para las temperaturas y presiones de diseño, de manera que la tubería sea capaz de soportar los esfuerzos tangenciales producidos por la presión del fluido.
6. Establecimiento de una configuración aceptable de soportes para el sistema de tuberías.
7. Análisis de esfuerzos por flexibilidad para verificar que los esfuerzos producidos en la tubería por los distintos tipos de carga estén dentro de los valores admisibles, a objeto de comprobar que las cargas sobre los equipos no sobrepasen los valores límites, satisfaciendo así los criterios del código a emplear.
8. Si el sistema no posee suficiente flexibilidad y/o no es capaz de resistir las cargas sometidas (efectos de la gravedad) o las cargas ocasionales (sismos y vientos), se dispone de los siguientes recursos:
 - Reubicación de soportes.
 - Modificación del tipo de soporte en puntos específicos.
 - Utilización de soportes flexibles.
 - Modificación parcial del recorrido de la línea en zonas específicas.

- Utilización de lazos de expansión.
- Presentado en frío.

El análisis de flexibilidad tiene por objeto verificar que los esfuerzos en la tubería, los esfuerzos en componentes locales del sistema y las fuerzas y momentos en los puntos terminales, estén dentro de límites aceptables, en todas las fases de operación normal y anormal, durante toda la vida de la planta [12].

2.2.12 Válvulas y accesorios

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del flujo indicada por la distribución de la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería que cambie la dirección de la corriente en forma total o parcial, altera la configuración característica de flujo y ocasiona turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta. Esto es debido a que existen válvulas y accesorios en la tubería que alteran la configuración de flujo, y producen una pérdida de presión adicional.

2.2.12.1 Válvulas

La variedad en diseños de válvulas dificulta una clasificación completa. Si las válvulas se clasifican según su resistencia que ofrece al flujo, las que presentan un paso directo del flujo, como las válvulas de compuerta, bola, macho y de mariposa pertenecen al grupo de baja resistencia; las que tienen cambio en la dirección del flujo, como las válvulas de globo y angulares, están en el grupo de alta resistencia.

2.2.12.2 Accesorios

Los acoplamientos o accesorios para conexión se clasifican en: de derivación, reducción, ampliación y desviación. Los accesorios como tes, cruces, codos con salida lateral, pueden agruparse como accesorios de derivación. Los conectores de reducción o ampliación son aquellos que cambian la superficie de paso del fluido. En esta clase están las reducciones y los manguitos. Los accesorios de desvío, curvas, codos, curvas en U, entre otros, son los que cambian la dirección del flujo.

Se pueden combinar algunos de los accesorios de la clasificación general antes mencionada. Además, hay accesorios como conexiones y uniones que no son resistentes al flujo.

2.2.13 Soportes para tuberías

El diseño de estructuras de soportes se basa en todas las cargas que actúan concurrentemente en cada soporte. Estas cargas incluyen efectos de peso, cargas introducidas por presión de diseño y temperatura, vibración, vientos, terremotos, choques y esfuerzos de desplazamiento. La distribución y diseño de tuberías y sus elementos soportantes están dirigidos para prevenir lo siguiente:

- ✓ Esfuerzos excesivos en la tubería.
- ✓ Fuga en las juntas.
- ✓ Excesivo empuje y momentos en equipos conectados.
- ✓ Esfuerzo excesivo en los soportes (o restricciones).
- ✓ Resonancia o vibraciones inducidas por el fluido.
- ✓ Interferencia excesiva con expansión térmica o contracción en la tubería.
- ✓ Soltura de la tubería de sus soportes.
- ✓ Excesivo pandeo de la tubería.
- ✓ Excesivo flujo de calor, exposición de los elementos soportantes a temperaturas extremas fuera de sus límites de diseño [13].

2.2.14 Flexibilidad en tuberías

La flexibilidad es la capacidad de los sistemas de tuberías de expandirse y contraerse sin que se produzcan efectos perjudiciales en el conjunto, en los soportes, en las estructuras, y sobretodo en los equipos.

El comportamiento que presentan los componentes interconectados en un sistema de tuberías cuando están sometidos a un régimen particular de cargas (temperatura, presión, viento, sismo, entre otros) originan fuerzas, momentos, esfuerzos y deformaciones en el sistema.

El análisis de flexibilidad se realiza para garantizar que ese régimen particular de cargas esté dentro de un rango admisible de carga, evitando fallas en las tuberías, fallas en los equipos adyacentes y fallas en los soportes estructurales y/o daños en los durmientes. Se dice que garantiza seguridad, ya que se rige bajo códigos y normas internacionales y la misión del analista de flexibilidad es lograr que el diseño se realice bajo dichas normas. El análisis de flexibilidad se realiza sobre un sistema de tubería con el fin de evitar:

- ✓ Esfuerzos excesivos en las tuberías, en los equipos y en los soportes o sistemas cercanos a él.
- ✓ Fugas en sistemas donde su interconexión sea con bridas.
- ✓ Excesivas deformaciones en las carcasas de los equipos y recipientes.
- ✓ Resonancias en los sistemas de tuberías como resultado de excitaciones conocidas, tales como equipos reciprocantes [14].

2.2.15 Simulación de procesos

La simulación de procesos es el estudio de un sistema o sus partes mediante la manipulación de su representación matemática o de su modelo físico. El

análisis de procesos comprende un examen global del proceso, de otros procesos posibles, así como de sus aspectos económicos.

Existen ciertas características de los procesos industriales que las diferencia de otro tipo de industrias, debido esencialmente a que hay una compleja estructura de muchas etapas, cada una de las cuales consta a su vez de numerosos componentes. Teniendo en cuenta que interviene un elevado flujo de materiales con un valor económico relativamente alto, se comprende que pequeñas modificaciones en las características de diseño y operación pueden tener una importante repercusión económica.

El diseño de una planta de procesos incluye no sólo la resolución de las ecuaciones, de los balances de materia y energía para todas las unidades de proceso, sino también el dimensionamiento de los equipos, así como sus restricciones de diseño, optimización y control de costos.

La simulación de cada uno de los elementos que constituyen el proceso es una tarea relativamente sencilla en la que a partir de todas las consideraciones de diseño, se puede llegar a describir el funcionamiento del equipo.

Sin embargo, un proceso consta habitualmente de un buen número de estos equipos, para los cuales las corrientes de entrada y salida están interrelacionadas, constituyendo un problema de resolución mucho más compleja. Además, la mayor parte de los procesos contienen corrientes de recirculación y lazos de control, de modo que la resolución de todas estas interconexiones supone la aparición de cálculos iterativos. Este es el motivo por el que su solución requiere de métodos numéricos que garanticen la convergencia de los cálculos.

Para llevar a cabo estos cálculos, es necesario además y prioritariamente, disponer de datos de propiedades físicas, químicas y termodinámicas de todos los materiales y productos involucrados en el proceso.

Por último es necesario que exista un programa que interrelacione todos estos elementos: propiedades físicas, termodinámicas, cálculos de subproducto, diseño de los equipos, y además toda la información concerniente a los flujos establecidos entre ellos [15].

2.2.16 Pipephase versión 9.0

Es un programa de simulación que predice, en estado estacionario, presión, temperatura, perfiles de levantamiento en pozos, líneas de flujo, sistemas de recolección, y otras configuraciones o redes de tuberías, pozos, bombas, compresores, separadores, entre otras instalaciones. Los tipos de fluidos que PIPEPHASE puede manejar incluyen líquido, gas, vapor y mezclas multifásicas de gas y líquido.

Dentro de éste programa se han diseñado varias capacidades especiales incluyendo análisis de producción de pozos, análisis de levantamiento con gas, análisis de lanzamiento de cochino y análisis de sensibilidad (nodal). Estos cálculos adicionales extienden el rango de aplicación de PIPEPHASE de tal forma que se puedan resolver toda la gama de problemas de aplicación de tuberías y redes de tuberías [16].

2.2.17 CAESAR II versión 5.1

Es un software que permite realizar análisis de esfuerzos en tuberías, modelando de una manera sencilla, redes de tuberías sujetas a cargas dinámicas, peso, presión, temperatura, sísmicas y otras cargas estáticas. Este programa incluye la mayoría de los materiales utilizados y de los códigos de tuberías,

además el CAESAR II es el programa Líder en capacidades técnicas y opciones de análisis y provee las mejores capacidades para diseño o evaluación de sistemas de tuberías.

El programa permite la introducción de datos en una hoja en la que se encuentran las características de geometría, materiales, condiciones de operación y de borde. Los elementos ingresados son presentados de inmediato de forma gráfica, y permite realizar distintas actividades como:

- Gráficos interactivos.
- Insertar gran cantidad de tipos de restricciones.
- Modelado de estructuras de acero
- Edición por elementos o global.
- Modelado de tuberías de fibra de vidrio reforzada.
- Generación automática del modelo de juntas de expansión
- Generación automática del modelo de tuberías enterradas [17].

2.2.18 Normas para el diseño de tuberías

Existen distintas normativas que rigen el diseño de sistemas de tuberías, garantizan el uso seguro de estos sistemas, permiten seleccionar el material adecuado de cada componente, y proporcionan exigencias requeridas/mínimas/máximas para la selección, instalación, operación e inspección de los componentes y accesorios de las tuberías. El diseño a desarrollar en este proyecto se fundamentará en las siguientes normas para el diseño de tuberías:

- ✓ Norma PDVSA N° 90616.1.024, Dimensionamiento de tuberías de procesos.

- ✓ Norma PDVSA N° HG-251, Criterios de diseño de soportes para tuberías.
- ✓ Norma PDVSA N° L-TP 1.5, Cálculo hidráulico de tuberías.
- ✓ Norma PDVSA N° MDP-02-FF-02, Flujo de Fluidos. Principios Básicos.
- ✓ Norma PDVSA N° MDP-02-P-02, Bombas. Principios Básicos.

CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE UREA

3.1 Generalidades

En este capítulo se presenta la evaluación del sistema de transporte de urea, para el cual se describen los procedimientos de operación y mantenimiento y se presentan las alternativas existentes para diseñar el sistema de limpieza automático, a través de las cuales es posible plantear distintas propuestas que permitan el buen funcionamiento del mismo.

3.2 Descripción del sistema de transporte de urea del muelle petroquímico de Pequiven-Jose

Fue necesario realizar la descripción general del proceso de transporte y estibado de urea en los buques, debido a que en las instalaciones del Muelle Petroquímico de Jose no existe tal descripción escrita o estandarizada de la operación y el mantenimiento de dicho sistema, razón por la cual cada grupo de trabajadores realiza las operaciones de limpiezas con criterios diferentes, lo cual genera un mayor consumo de agua, mayores gastos energéticos, pérdidas de horas de trabajo y en algunos casos daños en la estructura por acumulación de agua en lugares no deseados.

Esta descripción se estableció considerando las características de los equipos, los componentes de dicho sistema y los procedimientos de chequeo descritos en el Manual de Operaciones del Muelle Petroquímico. Todo esto fue posible a través de visitas a las instalaciones y entrevistas no estructuradas hechas al personal que trabaja directamente en las operaciones de la plataforma de

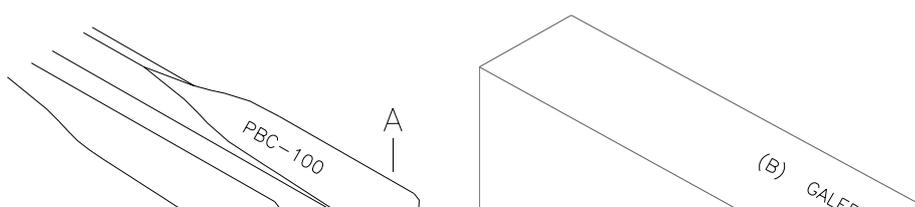
manejo de urea (Operadores, Supervisores de Operaciones y Supervisores de Mantenimiento).

Este sistema esta provisto de cuatro bandas o cintas transportadoras de caucho de 3 cm. de espesor con diferentes longitudes, las cuales están reforzadas internamente con una malla de nylon que permite mantener su estabilidad y aumentar su vida útil, disminuyendo la deformación producida por el contacto con los tambores y rodillos que impulsan y permiten su movimiento a lo largo de la estructura.

La función principal de este sistema es, transportar urea granular desde el almacén de maduración de la empresa FERTINITRO (ubicado en tierra firme), hasta las bodegas de los buques atracados en la Plataforma “A” del Muelle Petroquímico de Pequiven (ubicado a 2.250 m costa afuera), manteniendo sus propiedades físicas (humedad, densidad y temperatura) constantes a lo largo de todo el recorrido, para garantizar una calidad tanto del producto como en el servicio de carga de los buques de cada cliente. Todo el sistema de bandas esta diseñado para mantener una tasa de carga constante de 1.000 Toneladas por hora (ton/h). Es por ello que la velocidad se mantiene constante en todos los motores y equipos que impulsan los tambores y rodillos del sistema, pudiendo variar de manera automática cuando los sensores de nivel y sobrellenado del producto en las bandas, registran alguna variación fuera del rango para el cual han sido calibrados.

3.2.1 Funcionamiento

El sistema de transporte de urea como se muestra en la figura 3.1, esta provisto de una torre de transferencia N° 1 donde se recibe la urea proveniente del almacén de FERTINITRO y se deposita en la banda tubular PBC-100 (Pipe Conveyor), la cual cuenta con un mecanismo de rodillos que enrollan la cinta en



una forma tubular, garantizando la protección de la urea durante toda su trayectoria a lo largo del muelle (2.000 m).

Figura 3.1: Funcionamiento del Sistema de transporte de Urea [FP]

La PBC-100 es descargada en una tolva que transfiere el producto a la banda PBC-200 en la torre de transferencia 2 (A), esta segunda banda traslada el producto a lo largo de una galería (B) que se extiende en toda la longitud de la plataforma (250 m) y esta provista de un mecanismo móvil (Tripper Car) (C) que es el encargado de mover el punto de transferencia del producto, desde la galería hasta el brazo de carga móvil (Ship Lador) que es ubicado en cada una de las bodegas del buque. La banda PBC-200 también posee un contrapeso (D) que es

accionado de manera automática para aumentar o disminuir la tensión de la cinta, dependiendo del peso que le proporcione la tasa de carga que esté manejando el sistema.

El mecanismo móvil, está provisto de una tolva (E) que permite descargar el producto proveniente de la banda PBC-200 de la galería, en la banda PBC-300 (Link Conveyor) del brazo de carga. Esta última banda alimenta la banda PBC-400 (Boom Conveyor) a través de la tolva (F). A partir de este punto el brazo de carga puede girar 145° horizontalmente y 33° verticalmente según la necesidad del operador que realiza el llenado de la bodega. Por último, la banda PBC-400 transfiere el producto, a través de una tolva (G), al brazo tubular de acero inoxidable (Telescópico) (H), el cual puede contraerse o expandirse (16,9 m) dentro de las bodegas del buque.

3.2.2 Mantenimiento

En el estibado de urea en los buques intervienen tres actores: el cliente, el productor (FERTINITRO) y el estibador (Muelle de PEQUIVEN).

El cliente debe cancelar al muelle los servicios de seguridad, agua y escalera por cada hora que se encuentre atracado y cargando producto en sus instalaciones, el estibador o la empresa productora deben cancelar al buque por cada hora que se interrumpa la carga debido a cualquier causa bajo su responsabilidad, por eso es necesario que las actividades de mantenimiento del sistema de transporte sean realizadas al finalizar la carga del producto en cada buque, exceptuando aquellas que requiera de atención urgente (como cambio de rodillo o parada de algún equipo).

El mantenimiento es efectuado según los procedimientos establecidos en el Plan Anual de Mantenimiento de Instalaciones Portuarias de Pequiven, en el cual se inspeccionan cada subsistema, equipo, componente y estructura que lo

conforman, así como también las condiciones marítimas y ambientales en que se encuentran antes de atracar el siguiente buque y por ultimo se realiza una limpieza general del sistema.

La limpieza es llevada a cabo por los operadores del muelle, quienes se ubican con sus equipos (botas impermeables, escalera, mangueras, cepillos, palas y haraganes) en las torres de transferencia 1 y 2, en la galería y en el brazo de carga, conectan las mangueras a las distintas tomas de agua de servicio con lo cual proceden a direccionar el suministro de la misma a cada lugar de la cinta, de la estructura, los rodillos y los tambores que desean limpiar. Con ayuda de cepillos eliminan los excesos de urea retenidos en diversos lugares, los haraganes le permiten desplazar el agua hasta los lugares de desagües establecidos, para evitar depósito de aguas amoniacales en lugares no deseados que contaminan el ambiente y son penados por las leyes. En lugares poco accesibles y elevados de la estructura se debe utilizar la escalera para lograr la limpieza de dichas zonas. Una vez desplazados todos los residuos de urea en las instalaciones, se enciende el sistema para dejar fluir los excesos de agua existentes.

En el área de la torre 2 y en el punto de transferencia (Tripper Car) se procede a conectar las mangueras de aire de servicio en los compresores existentes en dichas áreas para secar la superficie de las instalaciones que aún contengan trazas de agua y residuos de humedad que pueden dañar el producto en la próxima carga.

Ventajas:

- ✓ Se puede observar los lugares donde es requerido mayor limpieza y se atacan con mayor profundidad de lavado.
- ✓ Fomenta el trabajo en equipo.

Desventajas:

- ✓ Elevados consumos de agua.
- ✓ Disminución de las horas-hombres efectivas.

- ✓ Aumento de las condiciones inseguras de trabajo.
- ✓ Cantidades considerables de agua quedan retenidas en las instalaciones.
- ✓ Contaminación ambiental.
- ✓ Disminución de la vida útil de los rodillos debido a una película de urea creada por la mala limpieza de los mismos.

Adicional a estos factores, la limpieza no puede realizarse en horas de la noche, debido a un accidente ocurrido por el contacto entre el agua y uno de los bombillos de la instalación, este motivo retrasa el atraque de buques en horario nocturno, aún cuando el muelle se encuentre operativo las 24 horas del día.

3.3 Alternativas de ruteo de tuberías propuestas, para el sistema de limpieza automático de urea

Considerando los problemas presentados por el sistema de limpieza de urea actual, fue planteada la necesidad del diseño de una red de tubería que realice la limpieza automática de la urea en las instalaciones del muelle. Por lo cual, dicho diseño debe satisfacer las siguientes necesidades exigidas por la empresa para la limpieza del sistema de transporte:

- ✓ Mantener (si es necesario) los equipos y tuberías existentes en las instalaciones de la plataforma de manejo de urea.
- ✓ Utilizar agua de servicio y aire de servicio como fluidos de operación del sistema.
- ✓ Las tuberías deben ser diseñadas en los tipos de aceros al carbono existentes en el almacén.
- ✓ La red de tuberías funcionar con los niveles de presión de aire y agua proporcionados a la plataforma en estudio.
- ✓ Se debe considerar la normativa existente para la regulación de contaminación por residuos amoniacales en el muelle petroquímico.

- ✓ El ruteo de la tubería debe guiarse por los lugares correspondientes para tuberías de servicios en la plataforma de manejo de urea.

Tomando en cuenta estos requerimientos, se deben proponer distintas configuraciones en el ruteo de las tuberías, con distintos funcionamiento y operación, para realizar una evaluación técnica que permita recomendar la distribución más adecuada para cumplir con las necesidades de mantenimiento del sistema de transporte. Antes de plantear dichas propuestas es necesario seleccionar las zonas críticas de limpieza a considerar en cada red de tuberías.

3.3.1 Selección de zonas críticas a considerar para el sistema de limpieza.

Las zonas o puntos críticos de limpieza, son todos aquellos lugares donde es necesario realizar el debido mantenimiento (con agua y aire) para evitar cualquier tipo de problemas en las instalaciones, por lo tanto se deben evaluar todas las zonas que requieren de dicha limpieza, para luego seleccionar los lugares donde serán ubicados los aspersores, garantizando de esta manera su correcto funcionamiento y menor gasto de agua y aire de servicio.

Para seleccionar las zonas o puntos críticos de limpieza del ruteo de la tubería, fue necesario utilizar una herramienta de valoración/evaluación que permita visualizar y estimar aspectos a mejorar, considerar o jerarquizar de un proceso y a través de criterios pertinentes, ofrecer una evaluación detallada del aspecto que se desea mejorar, esta técnica es llamada matriz de evaluación.

Esta matriz consta de tres partes: primero se deben establecer los parámetros que se desean evaluar en posición vertical u horizontal, luego se deben colocar los ítems que se desean valorar de acuerdo a los parámetros en la posición opuesta a los anteriores (horizontal o vertical), y por ultimo la intersección entre cada parámetro y cada ítem permitirá la evaluación en un rango de puntuación

establecido inicialmente por el autor, o de acuerdo a las respuestas acertadas a cada pregunta.

Los criterios o parámetros a evaluar en la matriz fueron establecidos por los Supervisores de Operaciones del muelle, mediante entrevistas no estructuradas realizadas a cada uno de ellos, las cuales proporcionaron los siguientes parámetros:

- ✓ *Concentración de urea durante la carga:* todos los residuos de urea retenidos en las instalaciones durante el proceso de carga de los buques, debe ser diluida en su totalidad durante la limpieza y evacuada hacia el tanque de aguas amoniacales destinado para tal fin.
- ✓ *Contacto con medios contaminantes:* El sistema de transporte de urea debe mantener la urea aislada de cualquier agente contaminante, por lo tanto los componentes del sistema de transporte que se encuentra en mayor contacto con medios contaminantes para la urea, deben ser considerados en la limpieza.
- ✓ *Formación de película de urea:* La urea tiene alto porcentaje de higroscopia, lo que hace que en lugares donde exista humedad pueda diluirse fácilmente y formar una película alrededor del componente donde se encuentre, causando mal funcionamiento, deterioro, entre otros daños. Estas películas de urea deben ser disueltas de cada equipo que las contenga.
- ✓ *Acceso por parte de los operadores:* En muchos lugares es imposible realizar la limpieza de las instalaciones por la falta de vías de acceso para los operadores.

- ✓ *Ubicación de las vías de desagüe:* Los desagües deben mantenerse dentro de las zonas establecidas para tal fin, cumpliendo con las normas de protección del medio ambiente, y evitando acumulaciones de aguas amoniacales en lugares no deseados, por lo cual los puntos de limpieza deben ubicarse en lugares donde puedan drenarse las aguas servidas.
- ✓ *Posibilidad de contacto con agua:* Al realizar la limpieza del sistema, el agua no debe tener contacto con equipos que puedan dañarse o dejar de funcionar por la presencia de esta sustancia, por lo tanto, la limpieza debe hacerse teniendo en cuenta los riesgos existentes.

Una vez establecidos los parámetros a evaluar, se realizaron encuestas a todo el personal de operaciones del muelle, donde se solicitó la indicación de las zonas donde se necesita la limpieza en el sistema de transporte de urea, y dichas zonas fueron evaluadas de acuerdo a los criterios establecidos anteriormente según la matriz respectiva.

En la matriz de valoración/evaluación, para cada parámetro a considerar, se planteó una pregunta que genere una toma de decisión (SI o NO) para realizar la limpieza; de manera que las zonas a estudiar que registren mayor número de respuestas positivas “SI” (≥ 4) deben considerarse en el ruteo de las tuberías, las que posean menos respuestas positivas “SI” (≤ 3) no se deben considerar como puntos críticos a limpiar. De esta manera se obtuvo el resultado mostrado en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Matriz de evaluación para la selección de zonas críticas de limpieza.

ZONAS PROPUESTAS PARA REALIZAR LIMPIEZA	¿Se observan concentraciones de urea al finalizar la carga?	¿Tiene contacto con medios contaminantes?	¿Se produce formación de película de urea?	¿Esta ubicado (a) en un lugar de difícil acceso?	¿Tiene facilidad de desagüe por los lugares establecidos?	¿Puede tener contacto con agua sin dañar ningún otro componente?	TOTAL DE RESPUESTAS POSITIVAS "SI"	¿ZONA CONSIDERABLE?
Brazo tubular (Telescópico)	N O	S I	S I	N O	N O	N O		N O
Torre de transferencia 1	N O	N O	N O	N O	N O	S I		N O
Torre de transferencia 2	S I	S I	S I	N O	S I	S I		S I
Mecanismo de Tripper Car	S I	N O	S I	N O	S I	S I		S I
Tolva de Torre 1	S I	N O	S I	N O	N O	N O		N O
Tolva de Torre 2	S I	S I	S I	N O	S I	S I		S I
Tolva de Tripper Car	S I	N O	S I	S I	S I	S I		S I
Tolva de PBC-	S I	S I	S I	S I	S I	S I		S I

300											
Tolva de PBC-400	O	N	I	S	I	S	O	N	O	N	O
Cinta PBC-100 (Lado en contacto con la urea)	O	N	I	S	I	S	O	N	I	S	I
Cinta PBC-100 (Lado exterior)	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I
Cinta PBC-200 (Lado en contacto con la urea)	I	S	I	S	O	N	O	N	I	S	I
Cinta PBC-200 (Lado exterior)	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I
Cinta PBC-300 (Lado en contacto con la urea)	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I
Cinta PBC-300 (Lado exterior)	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I

Tabla 3.1: Continuación

Cinta PBC-400 (Lado en contacto con la urea)	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I
Cinta PBC-400 (Lado exterior)	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I

exterior)								
Tambor impulsor 1 de la cinta PBC-100	I	S	O	N	I	S	O	N
Tambor impulsor 2 de la cinta PBC-100	I	S	I	S	I	S	I	S
Tambor impulsor 1 de la cinta PBC-200	I	S	I	S	O	N	I	S
Tambor impulsor 2 de la cinta PBC-200	I	S	I	S	O	N	I	S
Tambor impulsor de la cinta PBC-300	I	S	I	S	O	N	I	S
Tambor impulsor de la cinta PBC-400	I	S	I	S	O	N	I	S
Tambor de retorno 1 de la cinta PBC-100	O	N	I	S	I	S	I	S
Tambor de retorno 2 de la cinta PBC-100	O	N	I	S	O	N	I	S
Tambor de retorno 3 de la cinta	O	N	I	S	O	N	O	N

PBC-100															
Tambor de retorno 4 de la cinta PBC-100	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	S		O	N	
Tambor de retorno 1 de la cinta PBC-200	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S		I	S
Tambor de retorno 2 de la cinta PBC-200	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I	S		O	N
Tambor de retorno de la cinta PBC-300	O	N	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S		I	S
Tambor de retorno de la cinta PBC-400	O	N	I	S	I	S	I	S	O	N	I	S		I	S
Tensior	O	N	I	S	O	N	O	N	O	N	I	S		O	N
Contrapeso	O	N	I	S	O	N	I	S	O	N	O	N		O	N
Tambores del contrapeso	O	N	I	S	O	N	O	N	I	S	I	S		O	N

Todas las zonas consideradas según el criterio de evaluación establecido (3 o más respuestas positivas) de la matriz de evaluación (tabla 3.1) se tomaron en cuenta para el ruteo de la tubería. Además se hizo una excepción al incluir en la red, la limpieza de todas las cintas transportadoras (por ambos lados) por ser los componentes del sistema de transporte que posee mayor contacto con la urea.

3.4 Propuestas de ruteo de las tuberías para el sistema de limpieza

Para el diseño del sistema de limpieza deben plantearse distintas alternativas del ruteo de la tubería y de los equipos, que puedan ser comparados según sus características técnicas y de operación y también por sus ventajas y desventajas tanto para la empresa como para los trabajadores, y tomando en cuenta esta valoración podrá seleccionarse la mejor alternativa para el proyecto.

Se consideró que los ruteos deben cumplir con la limpieza de tres zonas específicas: a) Una zona que comprende las bandas transportadoras PBC-100 y PBC-200 y los rodillos que las componen, donde se utilizará flujo de agua y aire, alternativamente; b) Una zona compuesta por las bandas y rodillos del brazo de carga (PBC-300 y PBC-400), que también debe manejar flujo de agua y aire en forma alternativa; y c) La estructura interna de la galería, que debe ser limpiada por completo con agua para descontaminar los lugares donde la urea está en contacto con el medio ambiente.

Se presentaron tres propuestas para la limpieza de las zonas descritas anteriormente, las cuales son detalladas a continuación.

3.4.1 Propuesta N^{ro} 1

Esta propuesta se planteó con la premisa de utilizar las tuberías y equipos existentes en las instalaciones del sistema de transporte de urea, para el suministro de agua y aire de servicio, y de esta manera disminuir los costos del proyecto.

La configuración establecida para este diseño se muestra en el esquema de la figura 3.2, donde pueden observarse en color rojo los tramos de la tubería existente que se utilizarán en esta propuesta. Los planos de esta configuración son presentados en el anexo A.

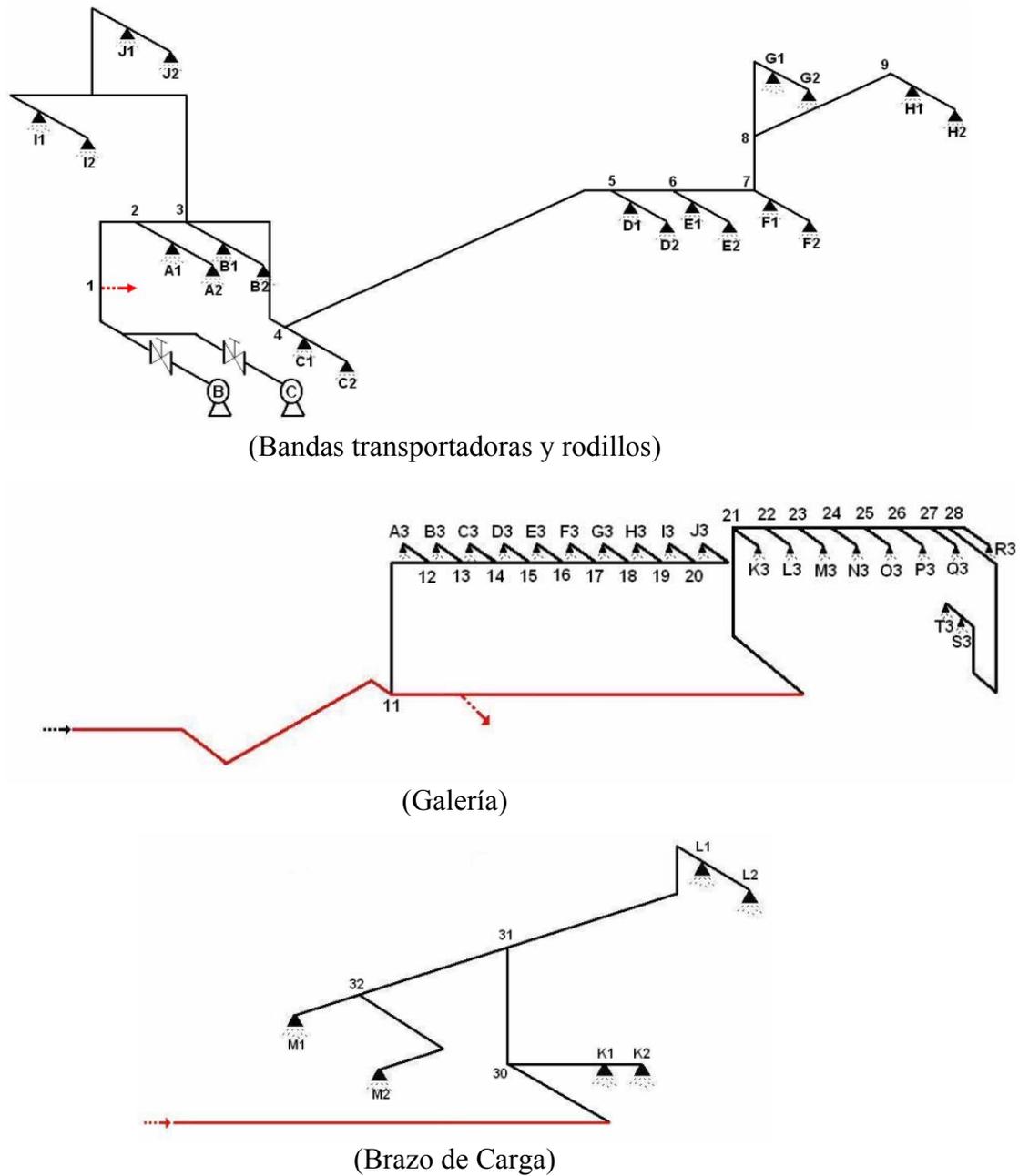


Figura 3.2: Esquema de la distribución de las tuberías de la Propuesta 1

Las características más importantes de esta propuesta son:

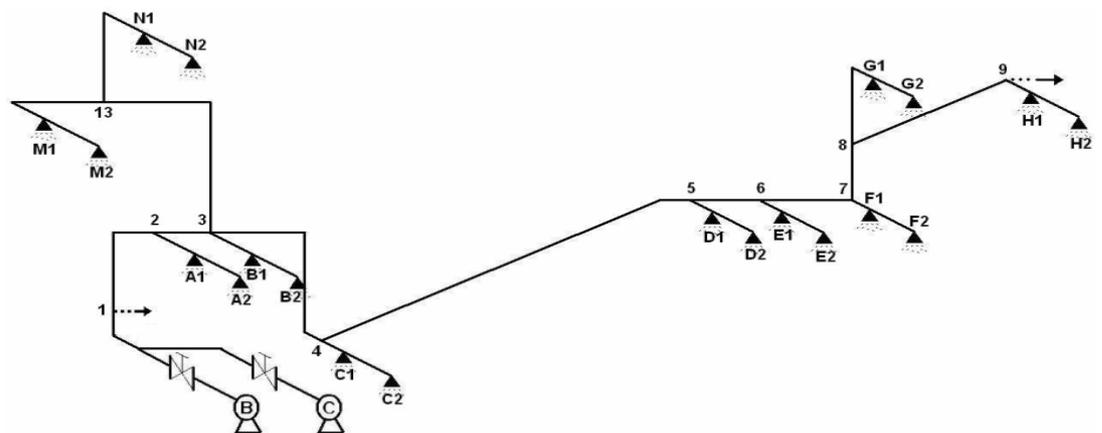
- ✓ La red de tubería operará para dos tipos de flujos (agua y aire) alternativamente.

- ✓ El sistema de compresión y el sistema de bombeo deben ser ubicados en la torre de transferencia 2.
- ✓ Los tramos de tuberías principales deben ser apoyados en el extremo inferior de la estructura que contiene las cintas transportadoras.
- ✓ Las redes de tuberías del carro móvil (Tripper Car) y del brazo de carga (Ship Loader), serán conectadas al inicio de la galería donde se ubican dichas instalaciones en posición de reposo.
- ✓ La red de tuberías de la Galería manejará agua como fluido de operación.

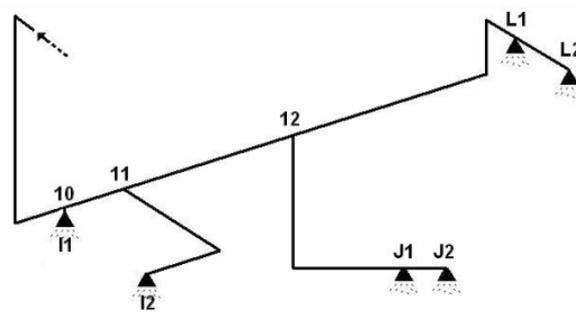
3.4.2 Propuesta N^{ro} 2

A diferencia de la anterior, esta propuesta se fundamenta en el diseño de una red de tuberías completamente nueva, basada en las exigencias hechas por la empresa y en los requerimientos de agua y aire de servicio en cada punto de operación. Los tramos de esta red de tuberías se esquematizan en la figura 3.3, los planos que describen detalladamente esta distribución se muestran en el anexo B y las sus características más importantes son:

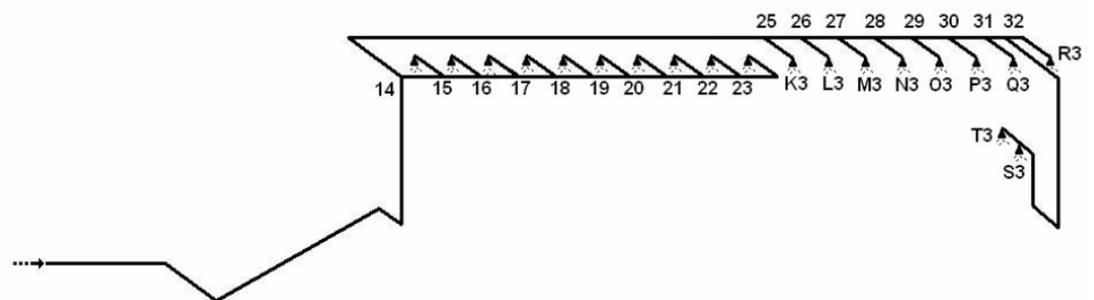
- ✓ La red de tuberías será diseñada para operar con flujo de agua y de aire, alternativamente (según la necesidad), con la flexibilidad de permitir bombeo de agua o compresión de aire para cada caso.
- ✓ El sistema de compresión y el sistema de bombeo deben ser ubicados en la torre de transferencia 2.
- ✓ Los tramos de tuberías principales deben ser apoyados en el extremo inferior de la estructura que contiene las cintas transportadoras.
- ✓ Las redes de tuberías del carro móvil (Tripper Car) y del brazo de carga (Ship Loader), serán conectadas al inicio de la galería donde se ubican dichas instalaciones en posición de reposo.
- ✓ La red de tuberías de la Galería manejará agua como fluido de operación.



(Bandas transportadoras y rodillos)



(Brazo de Carga)



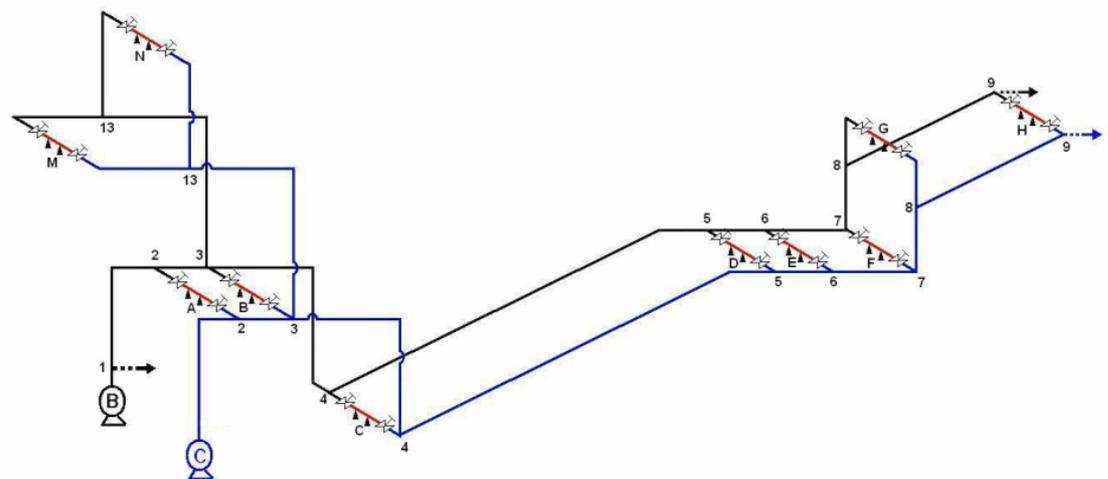
(Galería)

**Figura 3.3: Esquema de la distribución de las tuberías de la Propuesta 2
3.4.2 Propuesta N^{ro} 3**

En esta propuesta se diseñaron cabezales de suministro de agua y aire de servicio por separado, pero manteniendo en común un tramo entre ambas tuberías para instalar los dispositivos de aspersión (ver figuras 3.4 y 3.5). La descripción

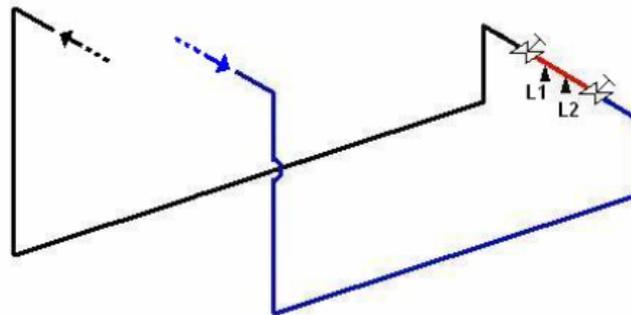
de este diseño se muestra en los planos del Anexo C y sus características son las siguientes:

- ✓ La red de tuberías operará para dos tipos de flujos (agua y aire) alternativamente, pero los cabezales de suministros serán diferentes para ambos tipos de flujos.
- ✓ El sistema de compresión y el sistema de bombeo deben ser ubicados en la torre de transferencia 2.
- ✓ Los tramos de tuberías principales deben ser apoyados en el extremo inferior de la estructura que contiene las cintas transportadoras.
- ✓ Las redes de tuberías del carro móvil (Tripper Car) y del brazo de carga (Ship Loader), serán conectadas al inicio de la galería donde se ubican dichas instalaciones en posición de reposo.
- ✓ La red de tuberías de la Galería manejará agua como fluido de operación.

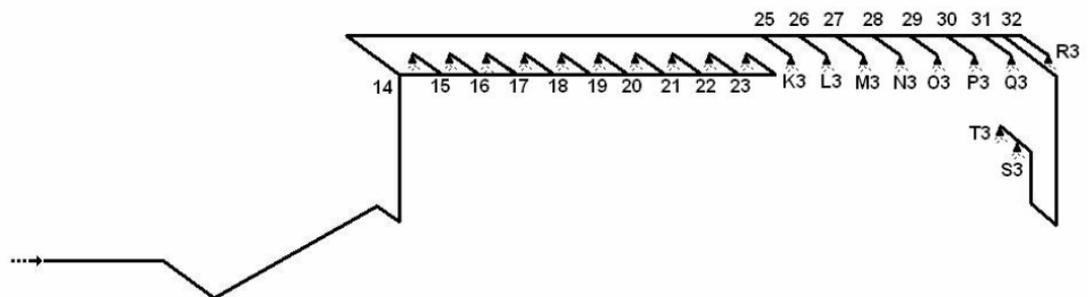


(Bandas transportadoras y rodillos)

Figura 3.4: Esquema de la distribución de las tuberías de la Propuesta 3



(Brazo de Carga)



(Galería)

**Figura 3.5: Esquema de la distribución de las tuberías de la Propuesta 3
(Continuación)**

3.5 Capacidades del sistema de limpieza

3.5.1 Selección de las boquillas o aspersores

Los aspersores son dispositivos que permiten esparcir sobre una superficie, una cantidad de un fluido que produce una forma particular de rociado, que es producida por la presión y cantidad del fluido que maneja y por el diseño de la abertura por la cual es esparcido. El sistema de limpieza requiere de un total de 46 boquillas, de las cuales solo 22 de ellas manejarán flujo de agua y aire alternativamente, y en su totalidad funcionaran para servicio de limpieza con agua.

Estos dispositivos se seleccionaron de acuerdo a las necesidades de limpieza requeridas en cada punto, por lo tanto, utilizando catálogos de la marca PNR (marca comercial con las cuales trabaja la empresa, ver anexo I), se estimaron distintos tipos de aspersores que operan dentro de un rango de presión y flujo, pueden operar con ambos tipos de fluidos (agua y aire) y cubren una longitud y un radio de mojado mayor al especificado en cada zona.

Fueron escogidos 3 tipos de boquillas las cuales son descritas en la tabla 3.2, estos aspersores serán utilizados para todos los diseños planteados.

Tabla 3.2: Modelos de aspersores seleccionados.

MODELO	CÓDIGO	LONGITUD EFECTIVA (m)	RADIO MOJADO (m)	ZONA A LIMPIAR	PUNTOS DE LIMPIEZA
U BC 	2630- B31BG	3	2.7	BANDAS Y TAMBORES	B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, F1, F2, G1, G2, J1, J2, M1, M2, N1, N2, S3 y T3
E CW 	2640 xx	3,5	2	TOLVAS Y TORRETES	A1, A2, H1, H2, I1, I2, L1 y L2
E DW 	3128 xx	7,5	6,3	GALEERÍA	A3, B3, C3, D3, E3, F3, G3, H3, I3, J3, K3, L3, M3, N3, O3, P3, Q3 y R3

El modelo UBC posee pequeñas ranuras que causan un efecto de abanico en el flujo a la salida del mismo, por esta razón fueron seleccionados para la limpieza de las bandas transportadoras y de los tambores que las impulsan. Por otra parte, el modelo ECW realiza el rociado en forma de cono y alcanza mayor área de limpieza, este efecto es el mismo que hace el modelo EDW, con la diferencia que este ultimo alcanza mayores longitudes de limpieza, por lo cual se ajusta a las condiciones de limpieza de la galería.

Las longitudes efectivas y los radios de mojados descritos fueron los resultados experimentales hechos por el fabricante a una presión de operación de 2 bar para el modelo UBC, y de 3 bar para los modelos ECW y EDW, es por ello el punto de operación preliminar seleccionado para nuestro sistema será a dichas presiones para garantizar las condiciones requeridas de limpieza.

3.5.2 Caudal total de agua y aire manejado por las propuestas

Para realizar el cálculo del flujo total fue necesario considerar dos factores: el tiempo de operación del sistema de limpieza y la cantidad de agua necesaria para el mismo.

La cantidad de agua esta limitada por la capacidad del tanque de aguas amoniacales que recibe todas las aguas provenientes de la limpieza. Este tanque tiene una capacidad de 100.000 L., y en la actualidad se utiliza solo el 80 % de su capacidad para garantizar su utilidad durante la existencia de alguna novedad que requiera de su uso.

Por otra parte los operadores realizan la limpieza desde 4 zonas específicas, 3 de ellas en las distintas tomas de agua de la galería (norte, centro y sur), en donde la limpieza tarda aproximadamente 10 minutos en cada una y luego se desplazan a la torre dos, donde disuelven la urea retenida durante 10 a 15

minutos aproximadamente. Tomando en cuenta que el diseño de la red de tubería para la limpieza realizará dicha labor en todas las zonas al mismo tiempo se selecciono 10 minutos como el tiempo de operación del sistema diseñado en este proyecto.

Como el diseño planteado es un estudio cualitativo, se recomendó el doble del tiempo de operación (20min.), tomando en cuenta que al momento de la instalación y operación del sistema de tuberías, los aspersores puedan cumplir con los requerimientos de limpieza exigidos y puedan operar durante un mayor tiempo. En base a este tiempo y a la capacidad máxima del tanque (80.000 L.), se determinó el flujo máximo que debe manejar la red de tuberías obteniendo el siguiente resultado:

$$\frac{80000L}{20 \text{ min}} = 4000L / \text{min}.$$

Para calcular el flujo total de agua en cada una de las propuestas se contabilizaron el número de aspersores seleccionados y se multiplicaron por el caudal requerido por cada uno de ellos, tomando en cuenta que la suma total de dichos flujos debe mantenerse por debajo del flujo máximo calculado para garantizar que el tiempo de operación no baje de 20 minutos.

Por su parte el flujo total de aire dependerá de las boquillas seleccionadas para el manejo de agua, debido a que el fabricante garantiza el funcionamiento de sus aspersores para ambos tipos de flujo. Una muestra del cálculo realizado para cada propuesta se presenta en la tabla 3.2.

El número de aspersores seleccionado es igual para las propuestas N° 2 y 3, debido a que la variación existente entre ellas es en la distribución de las tuberías. Por lo tanto el flujo manejado preliminarmente por la propuesta N° 1 es

igual a 3848,8 L/min. de agua y 3848,8 L/min. de aire, mientras que, las propuestas N° 2 y 3 manejan 3848,8 L/min. de agua y 1442 L/min. de aire.

Tabla 3.2: Flujo de agua y aire manejado por las propuesta N° 1

FLU IDO	ASPERSORES			FL UJO MANEJA DO (L/ min.)	CAU DAL TOTAL (L/mi n.)
	MOD ELO	CANTI DAD	CAU DAL POR UNIDAD (L/min.)		
AG UA	UBC	20	51,4	102 8	3848 ,8
	ECW	8	64,6	516 ,8	
	EDW	18	128	230 4	
AIR E	UBC	20	51,4	102 8	3848 ,8
	ECW	8	64,6	516 ,8	
	EDW	18	128	230 4	

CAPITULO IV: DISEÑO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE UREA.

4.1 Generalidades

En este capítulo se presenta el diseño hidráulico y mecánico de cada una de las propuestas planteadas en el capítulo anterior, la selección de la mejor alternativa realizada de acuerdo a los datos determinados mediante un análisis hidráulico de cada propuesta, la selección del material y los accesorios del diseño seleccionado y los resultados del análisis de esfuerzos que posee dicha red de tuberías en condiciones de operación crítica.

4.2 Dimensionamiento preliminar de las redes de tuberías

4.2.1 Diseño Hidráulico

Para determinar las dimensiones preliminares de las tuberías de las distintas propuestas, se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.2.11, en la cual se define como primer paso: establecer las condiciones de diseño (presión, velocidad y temperatura), por lo tanto los criterios par el diseño son:

- ✓ **Temperatura:** La temperatura de diseño será la promedio anual del muelle (28°C).
- ✓ **Presión:** La máxima presión de diseño estará determinada por las presiones sugeridas por el fabricante de las boquillas en cada salida de agua del sistema.
- ✓ **Caudal:** El caudal que circula por la red de tuberías obedece al caudal requerido por cada aspersor.

La metodología para el cálculo del dimensionamiento preliminar del sistema consiste en determinar los diámetros de cada tramo, de acuerdo con el flujo manejado y la velocidad máxima recomendada en la norma PDVSA 90616.1.024 (Dimensionamiento de tuberías de procesos, ver Anexo K) para el menor diámetro de tuberías, luego de obtener los valores estimados de diámetros se deben ajustar las velocidades recomendadas por la norma y determinar el diámetro nominal de cada tramo de tubería. Posteriormente aplicando la ecuación de Bernoulli y calculando el número de Reynolds y el factor de fricción, se verifica que la caída de presión en todo el sistema se ajuste a la norma PDVSA MDP-02-FF-03 (Flujo en fase líquida, ver Anexo L).

4.2.1.1 Diseño de la red de tuberías de transporte de agua.

✓ Cálculo del diámetro preliminar de las tuberías

Con los flujos manejados en cada tramo, se realizó una primera estimación de los diámetros de las tuberías considerando la velocidad máxima sugerida por la norma PDVSA 90616.1.024 para las tuberías de menor diámetro (<2 pulg.). Posteriormente se fijaron nuevos valores de velocidad ajustadas a la norma de acuerdo a los diámetros estimados, para determinar las dimensiones reales del sistema

Para el tramo 01-14 de la red de distribución de agua de la propuesta N^{ro} 2 (ver anexo B):

- ✓ Flujo manejado: 0,0345 m³/s.
- ✓ Velocidad según norma PDVSA 90616.1.024 para tuberías menor o igual a 2 pulg: 0.9144 m/s.

Para tuberías de sección transversal circular el flujo es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot A = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4.1)$$

Donde: Q= Caudal (m³/s)

V= Velocidad del fluido (m/s)

A= Área de la sección transversal (m²)

D= Diámetro (m)

Despejando “D” de la Ecuación 4.1, y sustituyendo los valores para el tramo considerado 01-14 se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0345}{3.1416 \cdot 0,9144}} = 0,219m = 8,625in$$

Como el valor del diámetro aumentó con respecto al seleccionado inicialmente en la norma (2 pulg.), es necesario fijar la velocidad para tuberías entre 3 y 10 pulg. (1.524 m/s), y calcular el nuevo diámetro

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0345}{3.1416 \cdot 1,524}} = 0,169m = 6,68 \text{ pulg.}$$

Con el diámetro calculado se debe estimar el diámetro inmediato superior de tuberías comerciales utilizadas en la empresa y de esta manera, junto a la selección del calibre estándar de la tubería (que será comprobado posteriormente), obtener los valores de espesores y diámetro interno según la tabla mostrada en el Anexo D.

Calibre 40 Diámetro = 8pulg.

Espesor = 8,18 mm.

Diámetro interior = 202,7 mm.

✓ **Cálculo del número de Reynolds (Re)**

Según la ecuación 2.4, y utilizando el valor de diámetro interno de las tuberías y la velocidad estimada según la norma, se calculó el número de Reynolds (con $\nu = 8,94 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para agua a 28°C tomado del Anexo E):

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{1.524 \cdot 0.2027}{8,94 \cdot 10^{-6}} = 34.554,23$$

Según el resultado obtenido para cada número de Reynolds se determino el tipo de flujo considerando: flujo laminar para $\text{Re} < 2000$, flujo transitorio para $2000 < \text{Re} < 4000$ y flujo turbulento para $\text{Re} > 4000$.

✓ **Cálculo del factor de fricción (f)**

Con la rugosidad relativa del material de la tuberías ($E = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$. para acero comercial de la tabla del Anexo F), se determino el factor de fricción “f” mediante la ecuación correspondiente para cada caso (Ver sección 2.2.7).

El tramo en estudio por ser flujo turbulento se utiliza la ecuación (2.6)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \text{Log} \left(\frac{0,000046 / 0,2027}{3,7} + \frac{2,51}{34.554,23 \cdot \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0,0233$$

✓ **Cálculo de la caída de presión por fricción en cada metro de tubería**

$$\frac{\Delta P}{m} = f \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2 \cdot D} \quad (4.2)$$

Donde: $\Delta P / m$ = Caída de presión por cada metro de tubería (Pa/m)

f = Factor de fricción

ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3) = 995.5 Kg/m^3 agua a 28°C (ver anexo G)

$$\frac{\Delta P}{m} = 0,0233 \cdot \frac{995,5 \cdot (1,524)^2}{2 \cdot 0,2027} = 133,07 \text{ Pa/m}$$

La caída de presión máxima para líneas de descarga de bombas según la norma (PDVSA MDP-02-FF-03, ver Anexo L) es 450 Pa/m, por lo tanto la caída de presión en el tramo estudiado, se encuentra dentro del rango permisible para una operación normal de la red de tuberías.

Este procedimiento se aplicó en las propuestas 1, 2 y 3, para cada tramo de tubería de transporte de agua.

3.4.4.1.2 Diseño de la red de tuberías de transporte de aire.

✓ Verificación de la velocidad de erosión

En el caso del diseño con aire, por ser un flujo compresible, el valor de la densidad y de la viscosidad se estimaron inicialmente para las condiciones de presión y temperatura conocidas en el sistema, es decir, las manejadas por los aspersores (3.5 Kg/m^3), y con las nuevas presiones calculadas se verificó que dicho valor no tuviese una variación considerable con respecto al seleccionado.

Debido al manejo de aire en tuberías que poseen residuos o depósitos de agua, fue necesario verificar que la velocidad del aire no excediera la velocidad de erosión para evitar fallas en las tuberías o en los accesorios causadas por este factor. La velocidad de erosión se calculó mediante la ecuación 4.3.

$$Ve = \frac{c}{\sqrt{\rho}} \quad (3.3)$$

Donde: Ve = velocidad de erosión (ft/s).

ρ = densidad del fluido (Lb/ft³)

c = Factor de servicio, 100 para servicio continuo, 125 para servicio intermitente y 160 para velocidad de erosión máxima.

Para el diseño propuesto el servicio es intermitente y la densidad estimada inicialmente es 0,2185 Lb/ft³, sustituyendo en la ecuación 4.3 se tiene:

$$Ve = \frac{125}{\sqrt{0,2185}} = 267,41 \text{ ft} / \text{s} = 81.51 \text{ m} / \text{s}$$

✓ *Cálculo del diámetro preliminar de las tuberías*

Con los flujos manejados en cada tramo, se realizó una primera estimación de los diámetros de las tuberías considerando la velocidad máxima sugerida por la norma para las tuberías de menor diámetro (<2 pulg.). Posteriormente se fijaron nuevos valores de velocidad ajustadas a la norma de acuerdo a los diámetros estimados, para determinar las dimensiones reales del sistema. Todas las velocidades para líneas de gases de la norma PDVSA 90616.1.024, se encuentran por debajo del límite máximo de erosión calculado en el paso anterior.

Para el tramo 01-02 de la red de distribución de aire de la propuesta N^{ro} 2 (ver anexo B):

- ✓ Flujo manejado: 0,024 m³/s.
- ✓ Velocidad según norma para tuberías menor o igual a 2 pulg: 24,384 m/s.

Despejando “D” de la Ecuación 4.1, y sustituyendo los valores para el tramo considerado se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,024}{\pi \cdot 24,384}} = 0,035m = 1,395in$$

Como el valor del diámetro se mantuvo por debajo de 2 pulgadas (diámetro seleccionado inicialmente), no es necesario fijar una nueva velocidad, por lo tanto, con el diámetro calculado se debe estimar el diámetro inmediato superior de tuberías comerciales utilizadas en la empresa y de esta manera, junto a la selección del calibre estándar de la tubería (que será comprobado posteriormente), obtener los valores de espesores y diámetro interno según la tabla mostrada en el Anexo D.

Calibre 40 Diámetro = 2 pulg.

Espesor = 3,91 mm.

Diámetro interior = 52,5 mm.

✓ *Cálculo del número de Reynolds (Re)*

Según la ecuación 2.4, y utilizando el valor de diámetro interno de las tuberías y la velocidad estimada según la norma, se calculó el número de Reynolds (con $\nu = 5,4314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para agua a 28°C tomado del Anexo E):

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{24,384 \cdot 0,0525}{5,4314 \cdot 10^{-5}} = 23.569,61$$

Según el resultado obtenido para cada número de Reynolds se determino el tipo de flujo considerando: flujo laminar para $Re < 2000$, flujo transitorio para $2000 < Re < 4000$ y flujo turbulento para $Re > 4000$.

✓ **Cálculo del factor de fricción (f)**

El tramo en estudio por ser flujo turbulento se utiliza la ecuación 2.6.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \text{Log} \left(\frac{0,000046 / 0,0525}{3,7} + \frac{2,51}{23569,61 \cdot \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0,0270$$

✓ **Cálculo de la caída de presión por fricción en cada metro de tubería**

$$\frac{\Delta P}{m} = 93650 f \cdot \frac{Q^2}{\rho \cdot D^5} \quad (4.4)$$

Donde: $\Delta P/m$ = Caída de presión por cada metro de tubería (KPa/m)

f = Factor de fricción

ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3) = $3,5 \text{ Kg/m}^3$ aire a 28°C (ver anexo G)

Q = Caudal manejado por el tramo (m^3/h)

D = Diámetro interno de la sección (m)

$$\frac{\Delta P}{m} = 93650 \cdot 0,0270 \cdot \frac{(86,4)^2}{3,5 \cdot 0,0525^5} = 100,07 \text{ KPa/m}$$

La caída de presión máxima para líneas de descarga de compresores según la norma (PDVSA MDP-02-FF-03) es 110 KPa/m, por lo tanto la caída de presión en el tramo estudiado, se encuentra dentro del rango permisible para una operación normal de la red de tuberías.

Este procedimiento se aplicó en las propuestas 1, 2 y 3, para cada tramo de tubería de transporte de aire.

Los resultados preliminares del dimensionamiento de las tuberías que se presentan a continuación, fueron calculados considerando las siguientes propiedades de los fluidos utilizados:

$$\text{Agua} \quad \rho (28^{\circ}\text{C}) = 995,5 \text{ Kg/m}^3$$

$$\nu (28^{\circ}\text{C}) = 8,94 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Aire} \quad \rho (28^{\circ}\text{C}) = 3,5 \text{ Kg/m}^3$$

$$\nu (28^{\circ}\text{C}) = 5,43 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

4.2.1.1 Propuesta N^{ro} 1

Para la configuración de este diseño se llevo a cabo el procedimiento de cálculo mostrado anteriormente, obteniendo para la velocidad máxima recomendada en la norma PDVSA 90616.1.024 (Dimensionamiento de tuberías de procesos, ver Anexo K) en tuberías de 2 pulg., los diámetros mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Diámetro nominal estimado para la red de tuberías caso agua de la propuesta N^{ro} 1 con $V=0.9144 \text{ m/s}$ (2 pulg.).

TRAMO DE TUBERÍA	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)	TRAMO DE TUBERÍA	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)
H1-H2	1,08E-03	1,524	23-24	1,24E-02	5,169
08-09	2,15E-03	2,156	23-M3	2,13E-03	2,146
08-G1	1,71E-03	1,923	22-23	1,45E-02	5,597

Tabla 4.1: Continuación.

G1-G2	8,57E-04	1,360	22-L3	2,13E-03	2,146
07-08	3,87E-03	2,889	21-22	1,66E-02	5,994
07-F1	1,71E-03	1,923	21-K3	2,13E-03	2,146
F1-F2	8,57E-04	1,360	29-21	1,88E-02	6,367
06-07	5,58E-03	3,470	32-M2	1,08E-03	1,524
06-E1	1,71E-03	1,923	32-M1	1,08E-03	1,524
E1-E2	8,57E-04	1,360	31-32	2,15E-03	2,156
05-06	7,29E-03	3,967	L1-L2	1,08E-03	1,524
05-D1	1,71E-03	1,923	31-L1	2,15E-03	2,156
D1-D2	8,57E-04	1,360	30-31	4,31E-03	3,049
04-05	9,01E-03	4,409	K1-K2	8,57E-04	1,360
04-C1	1,71E-03	1,923	30-K1	1,71E-03	1,923
C1-C2	8,57E-04	1,360	29-30	6,02E-03	3,605
03-04	1,07E-02	4,810	11-29	2,48E-02	7,316
03-B1	1,71E-03	1,923	20-J3	2,13E-03	2,146
B1-B2	8,57E-04	1,360	20-I3	2,13E-03	2,146
10-J1	1,71E-03	1,923	19-20	4,27E-03	3,035
J1-J2	8,57E-04	1,360	19-H3	2,13E-03	2,146
10-I1	1,71E-03	1,923	18-19	6,40E-03	3,717
I1-I2	8,57E-04	1,360	18-G3	2,13E-03	2,146
03-10	3,43E-03	2,720	17-18	8,53E-03	4,292
02-03	1,59E-02	5,851	17-F3	2,13E-03	2,146
02-A1	2,15E-03	2,156	16-17	1,07E-02	4,798
A1-A2	1,08E-03	1,524	16-E3	2,13E-03	2,146
01-02	1,80E-02	6,235	15-16	1,28E-02	5,256
28-T3	8,57E-04	1,360	15-D3	2,13E-03	2,146
28-S3	1,71E-03	1,923	14-15	1,49E-02	5,677
28-R3	2,13E-03	2,146	14-C3	2,13E-03	2,146
27-28	3,85E-03	2,881	13-14	1,71E-02	6,069
27-Q3	2,13E-03	2,146	13-B3	2,13E-03	2,146
26-27	5,98E-03	3,593	12-13	1,92E-02	6,437
26-P3	2,13E-03	2,146	12-A3	2,13E-03	2,146
25-26	8,11E-03	4,185	11-12	2,13E-02	6,786

Tabla 4.1: Continuación.

25-O3	2,13E-03	2,146	01-11	4,61E-02	9,978
24-25	1,02E-02	4,703	00-01	6,41E-02	11,766
24-N3	2,13E-03	2,146			

Luego se ajustaron los valores de la velocidad recomendada por la norma PDVSA 90616.1.024, asignado a cada tramo la velocidad correspondiente según el diámetro calculado previamente.

Los nuevos diámetros calculados se ajustaron a un tamaño de tubería comercial y según el calibre estándar (40), se obtuvieron los valores de diámetros internos que permitieron el cálculo de la caída de presión en cada tramo de tubería. Los resultados alcanzados se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Dimensionamiento, número de Reynolds, factor de fricción y gradiente de presión por fricción para la red de tuberías caso agua de la propuesta N^{ro} 1.

TRAMO DE TUBERÍA	VELOCIDAD (m/s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)	DIÁMETRO COMERCIAL (Pulg.)	DIÁMETRO INTERNO PARA CEDULA 40 (mm.)	REYNOLD (Re)	FACTOR DE FRICCIÓN (f)	ΔP TUBERÍA RECTA (Pa/m)
H1-H2	1,08E-03	1,524	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
08-09	2,15E-03	2,156	6	154,1	15761,64	0,0281	75,81
08-G1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
G1-G2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
07-08	3,87E-03	2,238	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
07-F1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
F1-F2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51

Tabla 4.2: Continuación

06-07	5,58E-03	2,688	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
06-E1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
E1-E2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
05-06	7,29E-03	3,073	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
05-D1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
D1-D2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
04-05	9,01E-03	3,415	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
04-C1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
C1-C2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
03-04	1,07E-02	3,726	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
03-B1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
B1-B2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
10-J1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
J1-J2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
10-I1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
I1-I2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
03-10	3,43E-03	2,107	4	102,3	17439,06	0,0277	313,39
02-03	1,59E-02	4,532	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
02-A1	2,15E-03	2,156	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
A1-A2	1,08E-03	1,524	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
01-02	1,80E-02	4,830	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
28-T3	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
28-S3	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
28-R3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
27-28	3,85E-03	2,232	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
27-Q3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
26-27	5,98E-03	2,783	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
26-P3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
25-26	8,11E-03	3,241	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
25-O3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
24-25	1,02E-02	3,643	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
24-N3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
23-24	1,24E-02	4,004	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
23-M3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64

Tabla 4.2: Continuación

22-23	1,45E-02	4,335	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
22-L3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
21-22	1,66E-02	4,643	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
21-K3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
29-21	1,88E-02	4,931	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
32-M2	1,08E-03	1,524	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
32-M1	1,08E-03	1,524	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
31-32	2,15E-03	2,156	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
L1-L2	1,08E-03	1,524	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
31-L1	2,15E-03	2,156	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
30-31	4,31E-03	2,362	4	102,3	17439,06	0,0277	313,39
K1-K2	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
30-K1	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
29-30	6,02E-03	2,792	4	102,3	17439,06	0,0277	313,39
11-29	2,48E-02	5,667	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
20-J3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
20-I3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
19-20	4,27E-03	2,351	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
19-H3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
18-19	6,40E-03	2,879	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
18-G3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
17-18	8,53E-03	3,324	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
17-F3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
16-17	1,07E-02	3,717	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
16-E3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
15-16	1,28E-02	4,071	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
15-D3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
14-15	1,49E-02	4,398	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
14-C3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
13-14	1,71E-02	4,701	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
13-B3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
12-13	1,92E-02	4,986	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
12-A3	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64

Tabla 4.2: Continuación

11-12	2,13E-02	5,256	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
01-11	4,61E-02	7,729	8	202,7	34554,23	0,0233	133,07
00-01	6,41E-02	9,114	10	254,5	43384,56	0,0221	100,39

Los diámetros calculados para los tramos 01-11, 11-29, 21-22 y 29-30 (que corresponden a los tramos de tuberías que posee el sistema de limpieza actual) mostrados en la tabla 4.2, son mayores a los diámetros de la tubería existente en las instalaciones, por lo tanto esta propuesta no puede ser aprobada para el diseño del sistema de limpieza, debido a que las capacidades limitantes de la tubería existente son mucho menores a las requeridas por el flujo manejado en los aspersores seleccionados.

4.2.1.2 Propuesta N^{ro} 2

Los cálculos preliminares que se hicieron con agua como fluido de operación y manteniendo la velocidad máxima recomendada para tuberías de 2 pulg. (Norma PDVSA 90616.1.024), arrojaron los resultados mostrados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Diámetro nominal estimado para la red de tuberías caso agua de la propuesta N^{ro} 2 con $V=0.9144$ m/s (2 pulg.)

TRAMO DE TUBERÍA	CAUDAL (m³/s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)	TRAMO DE TUBERÍA	CAUDAL (m³/s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)
J1-J2	8,57E-04	1,360	32-S3	1,71E-03	1,923
12-J1	1,71E-03	1,923	32-R3	2,13E-03	2,146
12-L1	2,15E-03	2,156	31-32	3,85E-03	2,881
L1-L2	1,08E-03	1,524	31-Q3	2,13E-03	2,146

Tabla 4.3: Continuación

11-12	3,87E-03	2,889	30-31	5,98E-03	3,593
11-I	1,08E-03	1,524	30-P3	2,13E-03	2,146
10-11	4,94E-03	3,266	29-30	8,11E-03	4,185
09-10	6,02E-03	3,605	29-O3	2,13E-03	2,146
09-H1	2,15E-03	2,156	28-29	1,02E-02	4,703
H1-H2	1,08E-03	1,524	28-N3	2,13E-03	2,146
08-09	8,17E-03	4,200	27-28	1,24E-02	5,169
08-G1	1,71E-03	1,923	27-M3	2,13E-03	2,146
G1-G2	8,57E-04	1,360	26-27	1,45E-02	5,597
07-08	9,89E-03	4,619	26-L3	2,13E-03	2,146
07-F1	1,71E-03	1,923	25-26	1,66E-02	5,994
F1-F2	8,57E-04	1,360	25-K3	2,13E-03	2,146
06-07	1,16E-02	5,004	14-25	1,88E-02	6,367
06-E1	1,71E-03	1,923	23-24	2,13E-03	2,146
E1-E2	8,57E-04	1,360	23-I3	2,13E-03	2,146
05-06	1,33E-02	5,360	22-23	4,27E-03	3,035
05-D1	1,71E-03	1,923	22-H3	2,13E-03	2,146
D1-D2	8,57E-04	1,360	21-22	6,40E-03	3,717
04-05	1,50E-02	5,695	21-G3	2,13E-03	2,146
04-C1	1,71E-03	1,923	20-21	8,53E-03	4,292
C1-C2	8,57E-04	1,360	20-F3	2,13E-03	2,146
03-04	1,67E-02	6,011	19-20	1,07E-02	4,798
03-B1	1,71E-03	1,923	19-E3	2,13E-03	2,146
B1-B2	8,57E-04	1,360	18-19	1,28E-02	5,256
13-N1	1,71E-03	1,923	18-D3	2,13E-03	2,146
N1-N2	8,57E-04	1,360	17-18	1,49E-02	5,677
13-M1	1,71E-03	1,923	17-C3	2,13E-03	2,146
M1-M2	8,57E-04	1,360	16-17	1,71E-02	6,069
03-13	3,43E-03	2,720	16-B3	2,13E-03	2,146
02-03	2,19E-02	6,872	15-16	1,92E-02	6,437
02-A1	2,15E-03	2,156	15-A3	2,13E-03	2,146
A1-A2	1,08E-03	1,524	14-15	2,13E-02	6,786
01-02	2,40E-02	7,202	01-14	4,01E-02	9,305
S3-T3	8,57E-04	1,360	00-01	6,41E-02	11,766

En los tramos de tuberías cuyos diámetros excedieron la condición fijada inicialmente para estimar la velocidad (2 pulg.), fue estimado el nuevo valor de la velocidad según la norma y con dicho valor fueron calculados los nuevos diámetros y las caídas de presión para cada tramo de tubería (ver tabla 4.4).

Tabla 4.4: Dimensionamiento, número de Reynolds, factor de fricción y gradiente de presión por fricción para la red tuberías caso agua de la propuesta N° 2.

TRAMO DE TUBERÍA	VELOCIDAD (m/s)	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)	DIÁMETRO COMERCIAL (Pulg.)	DIÁMETRO INTERNO PARA CEDULA 40 (mm.)	REYNOLD (Re)	FACTOR DE FRICCIÓN (f)	ΔP TUBERÍA RECTA (Pa/m)
J1-J2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
12-J1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
12-L1	0,9144	2,15E-03	2,156	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
L1-L2	0,9144	1,08E-03	1,524	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
11-12	0,9144	3,87E-03	2,889	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
11-I	0,9144	1,08E-03	1,524	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
10-11	1,524	4,94E-03	2,530	4	102,3	17439,06	0,0277	313,39
09-10	1,524	6,02E-03	2,792	4	102,3	17439,06	0,0277	313,39
09-H1	0,9144	2,15E-03	2,156	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
H1-H2	0,9144	1,08E-03	1,524	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
08-09	1,524	8,17E-03	3,253	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
08-G1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
G1-G2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
07-08	1,524	9,89E-03	3,578	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
07-F1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
F1-F2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
06-07	1,524	1,16E-02	3,876	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26

Tabla 4.4: Continuación

06-E1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
E1-E2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
05-06	1,524	1,33E-02	4,152	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
05-D1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
D1-D2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
04-05	1,524	1,50E-02	4,411	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
04-C1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
C1-C2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
03-04	1,524	1,67E-02	4,656	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
03-B1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
B1-B2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
13-N1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
N1-N2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
13-M1	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
M1-M2	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
03-13	1,524	3,43E-03	2,107	4	102,3	17439,06	0,0277	313,39
02-03	1,524	2,19E-02	5,323	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
02-A1	0,9144	2,15E-03	2,156	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
A1-A2	0,9144	1,08E-03	1,524	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
01-02	1,524	2,40E-02	5,579	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
S3-T3	0,9144	8,57E-04	1,360	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
32-S3	0,9144	1,71E-03	1,923	2	52,5	5369,80	0,0382	302,51
32-R3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
31-32	1,524	3,85E-03	2,232	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
31-Q3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
30-31	1,524	5,98E-03	2,783	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
30-P3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
29-30	1,524	8,11E-03	3,241	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
29-O3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
28-29	1,524	1,02E-02	3,643	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
28-N3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
27-28	1,524	1,24E-02	4,004	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
27-M3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
26-27	1,524	1,45E-02	4,335	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
26-L3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64

Tabla 4.4: Continuación

25-26	1,524	1,66E-02	4,643	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
25-K3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
14-25	1,524	1,88E-02	4,931	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
23-24	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
23-I3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
22-23	1,524	4,27E-03	2,351	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
22-H3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
21-22	1,524	6,40E-03	2,879	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
21-G3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
20-21	1,524	8,53E-03	3,324	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
20-F3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
19-20	1,524	1,07E-02	3,717	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
19-E3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
18-19	1,524	1,28E-02	4,071	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
18-D3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
17-18	1,524	1,49E-02	4,398	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
17-C3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
16-17	1,524	1,71E-02	4,701	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
16-B3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
15-16	1,524	1,92E-02	4,986	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
15-A3	0,9144	2,13E-03	2,146	4	102,3	10463,44	0,0314	127,64
14-15	1,524	2,13E-02	5,256	6	154,1	26269,40	0,0250	187,26
01-14	1,524	4,01E-02	7,207	8	202,7	34554,23	0,0233	133,07
00-01	1,524	6,41E-02	9,114	10	254,5	43384,56	0,0221	100,39

En todos los tramos la caída de presión producida por efectos de fricción en cada metro lineal de tubería, se encuentran por debajo de la caída de presión máxima estimada en la norma PDVSA MDP-02-FF-03 (450 Pa/m), por lo tanto la presión de operación del sistema en condiciones normales, no ocasionará fallas considerables en la tubería.

Antes de hacer los cálculos respectivos considerando aire como fluido de operación, se debió verificar que las velocidades recomendadas en la norma

PDVSA 90616.1.024 para líneas de gas, no excedieran la velocidad de erosión calculada (81,51 m/s) para evitar fenómenos erosivos que ocasionen fallas en la tubería. Se comprobó que para todos los diámetros estudiados en la norma, las velocidades recomendadas por dicha norma se encontraban por debajo del valor de la velocidad de erosión.

En consecuencia la velocidad que se utilizó para la primera estimación de los diámetros de las tuberías de aire fue la sugerida en la norma para el menor diámetro en tuberías de gas (diámetros menores de 2 pulg., $V = 24,384$ m/s, ver anexo I), obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Dimensionamiento, número de Reynolds, factor de fricción y gradiente de presión por fricción para la red tuberías caso aire de la propuesta N^o 2.

TRAMO DE TUBERÍA	VELOCIDAD (m/s)	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)	DIÁMETRO COMERCIAL (Pulg.)	DIÁMETRO INTERNO PARA CEDULA 40 (mm.)	REYNOLD (Re)	FACTOR DE FRICCIÓN (f)	ΔP TUBERÍA RECTA (KPa/m)
J1-J2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
12-J1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
12-L1	24,384	2,15E-03	0,417	1	26,6	11941,94	0,0326	3,93E-05
L1-L2	24,384	1,08E-03	0,295	1	26,6	11941,94	0,0326	9,83E-06
11-12	24,384	3,87E-03	0,559	1	26,6	11941,94	0,0326	1,27E-04
11-I	24,384	1,08E-03	0,295	1	26,6	11941,94	0,0326	9,83E-06
10-11	24,384	4,94E-03	0,633	1	26,6	11941,94	0,0326	2,07E-04
09-10	24,384	6,02E-03	0,698	1	26,6	11941,94	0,0326	3,07E-04
09-H1	24,384	2,15E-03	0,417	1	26,6	11941,94	0,0326	3,93E-05
H1-H2	24,384	1,08E-03	0,295	1	26,6	11941,94	0,0326	9,83E-06
08-09	24,384	8,17E-03	0,813	2	52,5	23569,61	0,0270	1,57E-05
08-G1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05

Tabla 4.5: Continuación

G1-G2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
07-08	24,384	9,89E-03	0,895	2	52,5	23569,61	0,0270	2,29E-05
07-F1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
F1-F2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
06-07	24,384	1,16E-02	0,969	2	52,5	23569,61	0,0270	3,16E-05
06-E1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
E1-E2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
05-06	24,384	1,33E-02	1,038	2	52,5	23569,61	0,0270	4,16E-05
05-D1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
D1-D2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
04-05	24,384	1,50E-02	1,103	2	26,6	11941,94	0,0326	1,91E-03
04-C1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
C1-C2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
03-04	24,384	1,67E-02	1,164	2	52,5	23569,61	0,0270	6,57E-05
03-B1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
B1-B2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
13-N1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
N1-N2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
13-M1	24,384	1,71E-03	0,372	1	26,6	11941,94	0,0326	2,49E-05
M1-M2	24,384	8,57E-04	0,263	1	26,6	11941,94	0,0326	6,22E-06
03-13	24,384	3,43E-03	0,527	1	26,6	11941,94	0,0326	9,96E-05
02-03	24,384	2,19E-02	1,331	2	52,5	23569,61	0,0270	1,12E-04
02-A1	24,384	2,15E-03	0,417	1	26,6	11941,94	0,0326	3,93E-05
A1-A2	24,384	1,08E-03	0,295	1	26,6	11941,94	0,0326	9,83E-06
01-02	24,384	2,40E-02	1,395	2	52,5	23569,61	0,0270	1,35E-04

Para este caso los diámetros calculados se encuentran dentro del rango fijado inicialmente para estimar la velocidad (menor o igual a 2 pulg.), por lo tanto no fue necesario estimar nuevos valores de velocidades y se determinaron los diámetros reales de la red de tuberías, con los cuales se obtuvieron los valores de diámetros internos que se consideran para la determinación de la caída en las tuberías.

La caída de presión por fricción en todos los tramos es menor al valor máximo estimado en la norma (PDVSA MDP-02-FF-03) para caídas de presión por fricción en líneas de gas (0,11 KPa/m), lo cual comprueba que el dimensionamiento establecido, permitirá que el sistema pueda operar dentro de los niveles máximos de presión a los cuales puede estar sometido.

El dimensionamiento que se utilizó en las simulaciones hechas en pipephase para esta propuesta, fue el de la red de tuberías que proporcionó valores de diámetros mayores (tubería con agua), para asegurar que las condiciones para el otro fluido (aire) se encuentran sobre diseñadas y el sistema podrá operar normalmente.

4.2.1.3 Propuesta N^{ro} 3

Para esta propuesta se aplicó el mismo procedimiento de cálculo hecho a la propuesta anterior. En el caso de las tuberías de agua, el diseño de la red de tuberías es igual al de la red para agua de la propuesta 2, por lo tanto, los resultados estimados para diámetros y caídas de presión por fricción serán iguales a los mostrados en la tabla 4.4

Para realizar los cálculos de la tubería de aire, en los tramos comunes para ambos cabezales se mantuvieron los diámetros calculados para agua, debido a que éstos serán mayores a los calculados con las propiedades del aire. Además para este último se conocía de los cálculos hechos en la propuesta 2, que las velocidades sugeridas en la norma no excedían la velocidad de erosión, por lo tanto se obtuvieron como resultado los valores mostrados en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Dimensionamiento, número de Reynolds, factor de fricción y gradiente de presión por fricción para la red de tuberías caso aire de la propuesta N^{ro} 3.

TRAMO DE TUBERÍA	VELOCIDAD (m/s)	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO CALCULADO (Pulg.)	DIÁMETRO COMERCIAL (Pulg.)	DIÁMETRO INTERNO PARA CEDULA 40 (mm.)	REYNOLD (Re)	FACTOR DE FRICCIÓN (f)	ΔP TUBERÍA RECTA (KPa/m)
L2-L1	24,384	6,92E-04	0,237	2	52,5	23569,61	0,0270	1,12E-07
09-L2	24,384	1,38E-03	0,335	1	26,6	11941,94	0,0326	1,62E-05
09-H2	24,384	1,38E-03	0,335	2	52,5	23569,61	0,0270	4,49E-07
H1-H2	24,384	6,92E-04	0,237	2	52,5	23569,61	0,0270	1,12E-07
08-09	24,384	2,77E-03	0,473	2	52,5	23569,61	0,0270	1,79E-06
08-G2	24,384	2,36E-03	0,437	4	102,3	45927,08	0,0228	3,92E-08
G1-G2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09
07-08	24,384	5,13E-03	0,644	2	52,5	23569,61	0,0270	6,16E-06
07-F2	24,384	2,36E-03	0,437	4	102,3	45927,08	0,0228	3,92E-08
F1-F2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09
06-07	24,384	7,48E-03	0,778	2	52,5	23569,61	0,0270	1,31E-05
06-E2	24,384	2,36E-03	0,437	4	102,3	45927,08	0,0228	3,92E-08
E1-E2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09
05-06	24,384	9,84E-03	0,893	2	52,5	23569,61	0,0270	2,27E-05
05-D2	24,384	2,36E-03	0,437	4	102,3	45927,08	0,0228	3,92E-08
D1-D2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09
04-05	24,384	1,22E-02	0,994	2	52,5	23569,61	0,0270	3,49E-05
04-C2	24,384	2,36E-03	0,437	4	102,3	45927,08	0,0228	3,92E-08
C1-C2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09
03-04	24,384	1,46E-02	1,086	2	52,5	23569,61	0,0270	4,97E-05
03-B2	24,384	2,36E-03	0,437	4	102,3	45927,08	0,0228	3,92E-08
B1-B2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09
13-N2	24,384	2,36E-03	0,437	1	26,6	11941,94	0,0326	4,72E-05
N1-N2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09

Tabla 4.6: Continuación.

13-M2	24,384	2,36E-03	0,437	1	26,6	11941,94	0,0326	4,72E-05
M1-M2	24,384	1,18E-03	0,309	4	102,3	45927,08	0,0228	9,81E-09
03-13	24,384	4,72E-03	0,618	1	26,6	11941,94	0,0326	1,89E-04
02-03	24,384	2,16E-02	1,323	2	52,5	23569,61	0,0270	1,10E-04
02-A2	24,384	1,38E-03	0,335	2	52,5	23569,61	0,0270	4,49E-07
A1-A2	24,384	6,92E-04	0,237	2	52,5	23569,61	0,0270	1,12E-07
01-02	24,384	2,30E-02	1,365	2	52,5	23569,61	0,0270	1,24E-04

Para este caso las caídas de presión por fricción también se encuentran por debajo del nivel máximo establecido, permitiendo mantener el diseño dentro de los niveles de operación permisibles.

4.2.2 Diseño Mecánico

El diseño mecánico se realizó con el fin de comprobar si los espesores de pared obtenidos a través del diseño hidráulico, se encuentran dentro de los límites requeridos por el material al estar sometido a presión interna.

Para ello fue necesaria la aplicación del código ASME B31.3 [18], que especifica los requisitos para los materiales, diseño, fabricación, ensamble, construcción y prueba de los sistemas de tuberías sujetos a presión o vacío. Dicha norma es aplicable para sistemas de tubería que manejan tanto agua como aire, y define el espesor de pared de una tubería como:

$$t = \frac{P \cdot d}{2[S \cdot E - P(1 - Y)]} \quad (4.5)$$

Donde: t = Espesor de tubo requerido por presión (pulg.).

P = Presión máxima permitida de trabajo (PSI).

d = Diámetro interior del tubo (pulg.).

S = Esfuerzo máximo permitido por el material por presión interna (PSI).

E = Factor de eficiencia de la junta soldada del tubo. Para tubos sin costura

$E=1$.

Y = Coeficiente de temperatura (ver Anexo H).

Este código debió aplicarse para cada diámetro de tubería calculado y manteniendo constantes los siguientes factores:

$P = 73$ PSI

$S = 35.000$ PSI Para aceros al carbono.

$E = 1$ Para tubos sin costura.

$Y = 0,4$ Para aceros ferríticos a menos de 900°F.

En el caso del diámetro nominal 2 pulg, $d = 2.07$ pulg y se tiene que:

$$t = \frac{73 \cdot 2.07}{2[35.000 \cdot 1 - 73(1 - 0.4)]}$$

$$t = 0,0022 \text{ pulg.} = 0,0558 \text{ mm}$$

Mediante el diseño hidráulico se determinaron los espesores de las tuberías seleccionando el tipo de calibre 40, por ser el valor estándar utilizado en la empresa. Estos espesores son mostrados en la tabla 4.7, al igual que los espesores mínimos requeridos para la operación normal del sistema de tuberías de acuerdo al código ASME B31.3, los cuales fueron calculados según el procedimiento anterior.

Tabla 4.7: Espesores calculados según los diseños hidráulico y mecánico

DIÁMETRO DE LA TUBERÍA	ESPESOR DETERMINADO MEDIANTE CALIBRE 40 (mm)	ESPESOR CALCULADO SEGÚN CÓDIGO ASME B31.3 (mm)
1	3,38	0,028
2	3,91	0,055
4	6,02	0,107
6	7,11	0,161
8	8,18	0,212
10	9,27	0,266

Según la tabla 4.7 se puede observar que los espesores determinados mediante el diseño hidráulico, superan considerablemente a los espesores calculados mediante el diseño mecánico, por lo cual se pudo constatar que tanto los diámetros de tuberías como sus respectivos espesores (calculados hidráulicamente), podrán soportar la ocurrencia de cualquier tipo de falla mecánica producida por la presión interna o por el comportamiento del fluido a través de la red de tuberías, debido a que dichas dimensiones no sobrepasan los límites permisibles que limitan la ocurrencia de fallas en la estructura del material de la tubería.

Esta comprobación permitió verificar que las dimensiones mostradas en la sección 4.2.1 para las distintas propuestas, serán las utilizadas para introducir los datos en el programa Pipephase, y posteriormente realizar los respectivos análisis hidráulicos.

4.3 Análisis hidráulico mediante el programa PIPEPHSE ® versión 9.0.

Estos análisis se hicieron mediante simulaciones de los procesos en el programa computarizado Pipephase ® version 9.0. Fue necesario utilizar los planos isométricos de las propuestas, los valores de las propiedades de los fluidos en estudio y los datos técnicos proporcionados por los catálogos de los aspersores, para introducir los valores requeridos por el modelado de la red de tuberías en el programa.

De esta manera, Pipephase a través del modelo de simulación previamente seleccionado, mostró los perfiles de presión, velocidad y temperatura de los procesos que permitieron hacer el análisis hidráulico de las propuestas, indicando sus condiciones de operación bajo las características definidas por el usuario.

Según los resultados de dicho análisis se procedió, según sea el caso, a ajustar los valores de dimensionamiento de las tuberías y a una nueva selección de los dispositivos de aspersión.

4.3.1 Introducción de datos en el programa

El primer paso para la creación de una simulación es definir el tipo de simulación y el tipo de fluido. El tipo de simulación utilizado fue “modelo de redes”, por ser el que se ajusta al sistema; que es una distribución o conjunto de flujos con una o más uniones. También se utilizó el modelo de fluidos “composicional” debido a que los componentes de los fluidos utilizados (agua y aire) son conocidos.

Posteriormente se ajustaron las unidades de medida según la data manejada y fue el sistema internacional el escogido tanto para introducir, como para mostrar los resultados del programa.

El siguiente paso fue hacer el esquema representativo de la red de tubería ubicando las fuentes, los sumideros, los tramos de tuberías y cada uno de los nodos, de la manera más representativa del diseño a estudiar.

En cada sumidero se fijó el flujo requerido por el aspersor, en la fuente se fijó la temperatura y presión de operación y se estableció el tipo de fluido a manejar (agua o aire en cada caso). Luego en cada sección de tubería se introdujeron las longitudes de cada tramo de tubo, su diámetro, su elevación y las dimensiones y características de los accesorios, todo esto a través de una ventana de dialogo que permite la caracterización de cada tramo de la tubería (ver figura 4.1)

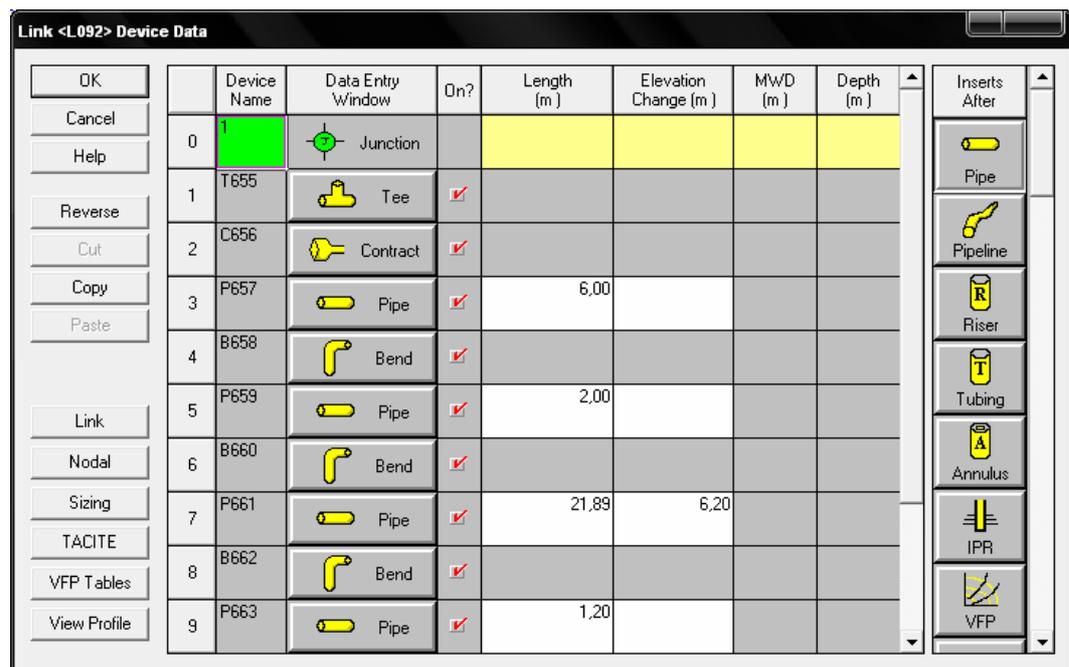


Figura 4.1: Ventana que permite la introducción de las características de los accesorios en cada tramo de tuberías representado en Pipephase.

El programa computarizado Pipephase permitió obtener los perfiles de presión, temperatura y velocidad de operación de todo el sistema de tuberías. Para

ello fue necesario crear una red para el estudio con agua y otra para aire, especificando en el simulador el tipo de compuesto a utilizar.

Un ejemplo de la esquematización en el simulador de las redes de tuberías para agua y aire, puede ser observada en las figuras 4.2 y 4.3 respectivamente.

En cada sumidero se fijó el valor de flujo indicado por los catálogos para la presión de operación de las boquillas indicadas en la sección 3.5.1, en todas las líneas fueron definidos los componentes que cada una posee (tuberías, accesorios, entre otros) y en la fuente se fijó una presión preliminar, que representa la presión de descarga de la bomba para observar el comportamiento presentado en las tuberías y ajustar dicho valor de presión al que permita alcanzar un perfil de presión que se adapte a las condiciones del diseño.

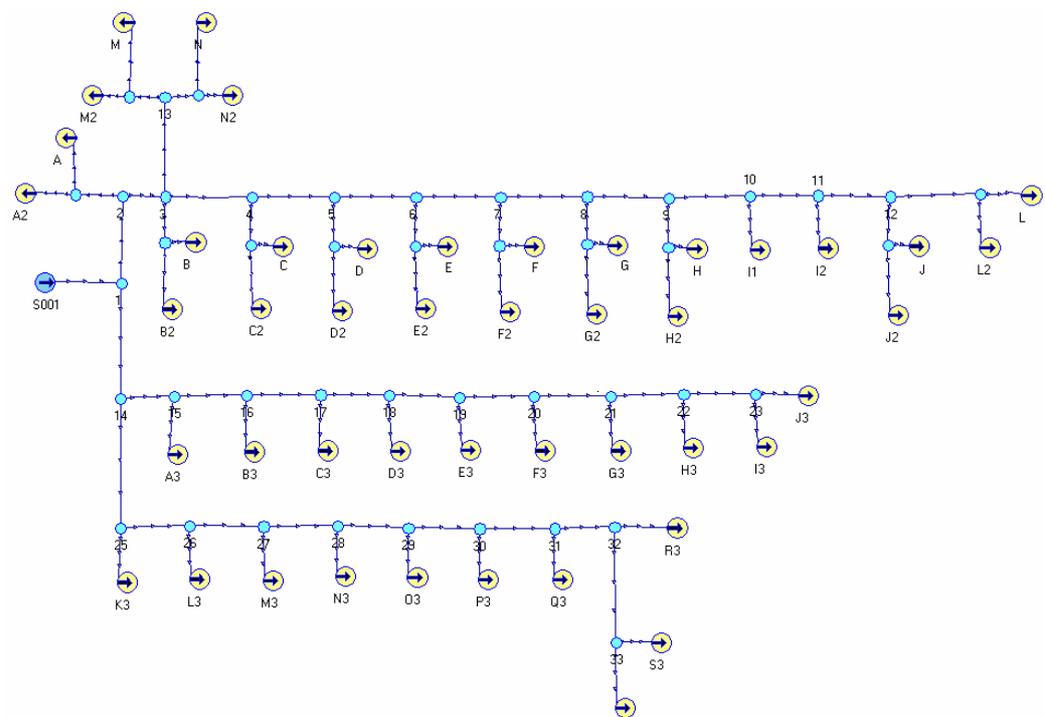


Figura 4.2: Representación de la red de tuberías para agua de la propuesta 3 en el programa Pipephase.

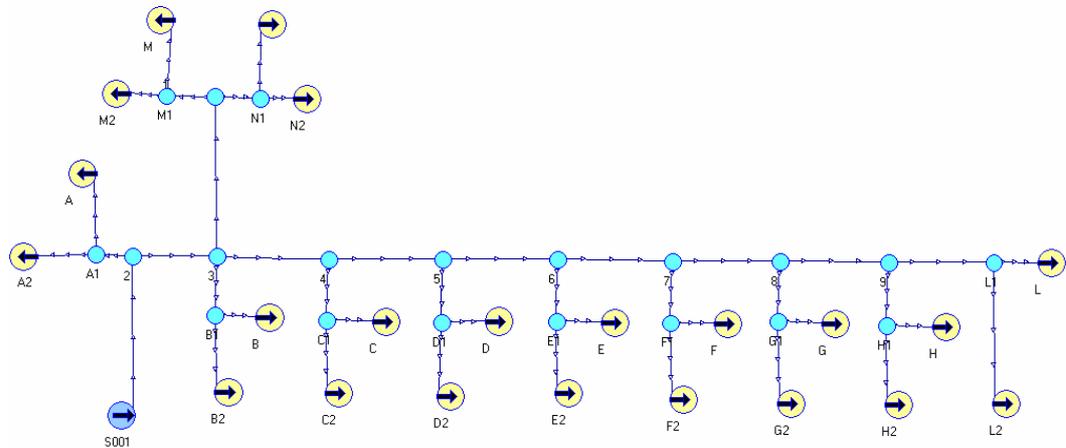


Figura 4.3: Representación de la red de tuberías para aire de la propuesta 3 en el programa Pipephase.

4.3.2 Propuesta N° 2

Para la primera corrida en el simulador de la red de tuberías con agua se fijó 500 KPa en la presión de la fuente. Se observó que la presión máxima del sistema fue de 492 KPa en el punto C1 y la presión mínima (en el punto R3) fue de 253 KPa y los aspersores ubicados en dichos puntos requerían como mínimo 200 KPa y 300 KPa respectivamente. Por lo tanto se aumentó la presión en la fuente a 547 KPa para garantizar que todos los aspersores se encuentren sobre los niveles de operación mínima que requieren y asegurar de esta manera, las longitudes y radios mojados que se necesitan en cada zona.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 4.8 y 4.9.

Tabla 4.8: Perfiles de velocidad y caída de presión para la red de tuberías caso agua de la propuesta N^{ro} 2.

TRAMO DE TUBERÍAS	VELOCIDAD (m/s)	GRADIENTE DE PRESIÓN (KPa/m)	CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN POR ELEVACIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL (KPa)
00-01	1,26	0,049	-0,097	0	-0,097
01-02	1,29	0,093	-11,000	-10	-21,000
02-A1	0,29	0,008	-0,056	0	-0,056
A1-A2	0,13	0,002	-57,000	0	-57,000
02-03	1,17	0,078	-0,357	0	-0,357
03-B1	0,79	0,141	-0,592	0	-0,592
B1-B2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
03-13	0,42	0,019	-15,000	-16	-31,000
13-M1	0,79	0,141	-1,000	0	-1,000
M1-M2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
13-N1	0,79	0,141	-13,000	-11	-24,000
N1-N2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
03-04	0,90	0,047	9,000	10	19,000
04-C1	0,79	0,141	-0,531	0	-0,531
C1-C2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
04-05	0,81	0,038	-34,000	-33	-67,000
05-D1	0,79	0,141	-0,536	0	-0,536
D1-D2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
05-06	0,71	0,031	-0,187	0	-0,187
06-E1	0,79	0,141	-0,536	0	-0,536
E1-E2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
06-07	0,62	0,024	-0,171	0	-0,171
07-F1	0,79	0,141	-0,536	0	-0,536
F1-F2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
07-08	0,53	0,018	-11,000	-10	-21,000

Tabla 4.8: Continuación

08-G1	0,79	0,141	-9,000	-8	-17,000
G1-G2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
08-09	0,44	0,012	-13,000	-12	-25,000
09-H1	0,26	0,008	-0,055	0	-0,055
H1-H2	0,13	0,002	-57,000	0	-57,000
09-10	0,73	0,053	14,000	19	33,000
10-11	0,60	0,037	-2,000	-1	-3,000
11-I2	0,50	0,060	-57,000	0	-57,000
11-12	0,47	0,024	-5,000	-5	-10,000
12-L1	0,26	0,008	-12,000	-11	-23,000
L1-L2	0,13	0,002	-57,000	0	-57,000
12-J1	0,79	0,141	9,000	11	20,000
J1-J2	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000
01-14	1,24	0,062	-100,000	-35	-135,000
14-15	1,14	0,074	-1,000	0	-1,000
15-A3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
15-16	1,03	0,061	-0,918	0	-0,918
16-B3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
16-17	0,91	0,049	-0,736	0	-0,736
17-C3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
17-18	0,80	0,038	-0,574	0	-0,574
18-D3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
18-19	0,69	0,029	-0,431	0	-0,431
19-E3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
19-20	0,57	0,020	-0,307	0	-0,307
20-F3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
20-21	0,46	0,014	-0,204	0	-0,204
21-G3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
21-22	0,34	0,008	-0,120	0	-0,120
22-H3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
22-23	0,23	0,004	-0,058	0	-0,058
23-I3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
23-J3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
14-25	1,01	0,058	-14,000	-4	-18,000

Tabla 4.8: Continuación

25-K3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
25-26	0,89	0,047	-0,703	0	-0,703
26-L3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
26-27	0,78	0,036	-0,544	0	-0,544
27-M3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
27-28	0,66	0,027	-0,405	0	-0,405
28-N3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
28-29	0,55	0,019	-0,285	0	-0,285
29-O3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
29-30	0,43	0,012	-0,186	0	-0,186
30-P3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
30-31	0,32	0,007	-0,085	0	-0,085
31-Q3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
31-32	0,21	0,003	-0,023	0	-0,023
32-R3	0,26	0,008	-90,000	-2	-92,000
32-S3	0,79	0,141	18,000	35	53,000
S3-T3	0,40	0,039	-4,000	0	-4,000

Tabla 4.9: Presiones en las boquillas de la red de tuberías caso agua de la propuesta N^o 2.

SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)
A1	468,4	I1	407,2	F3	316,1
A2	468,4	I2	404,5	G3	315,9
B1	520,2	J1	467,1	H3	315,7
B2	520,2	J2	467,1	I3	315,7
C1	539	L1	371,6	J3	315,6

Tabla 4.9: Continuación

C2	539	L2	371,6	K3	302,7
D1	472	M1	488,3	L3	302
D2	472	M2	488,3	M3	301,5
E1	471,8	N1	465,8	N3	301,1
E2	471,8	N2	465,8	O3	300,8
F1	471,6	A3	319	P3	300,6
F2	471,6	B3	318,1	Q3	300,5
G1	434,8	C3	317,4	R3	300,4
G2	434,8	D3	316,8	S3	441,3
H1	373,9	E3	316,4	T3	441,3
H2	373,9				

Se observa que todas las presiones están sobre los valores mínimos requeridos por los aspersores y en algunos casos estas se duplican, pero cabe destacar que este no es el comportamiento real del sistema cuando alcanza el equilibrio hidráulico, estos valores obedecen a las condiciones iniciales al encender la bomba que impulsa dicho flujo, por esta razón, con los valores de presión arrojados por la primera simulación se determinaron los flujos que manejan las distintas boquillas a dichas presiones, y se realizó la siguiente simulación fijando los nuevos valores de flujo, esto permitió observar como se estabiliza el sistema hasta llegar al equilibrio hidráulico de acuerdo al comportamiento de operación de las boquillas.

Para determinar el flujo manejado por las boquillas a distintas presiones fue necesario graficar el comportamiento de los flujos con respecto a las presiones de cada modelo de boquilla (suministrado por el fabricante) y estimar, por medio de las gráficas, los valores de flujos requeridos a distintas presiones. Estas gráficas se muestran en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

Presión (bar)	Flujo (L/min.)
0,7	31,2
1	37,3
2	52,7
3	64,6
5	83,4
7	98,7
10	118

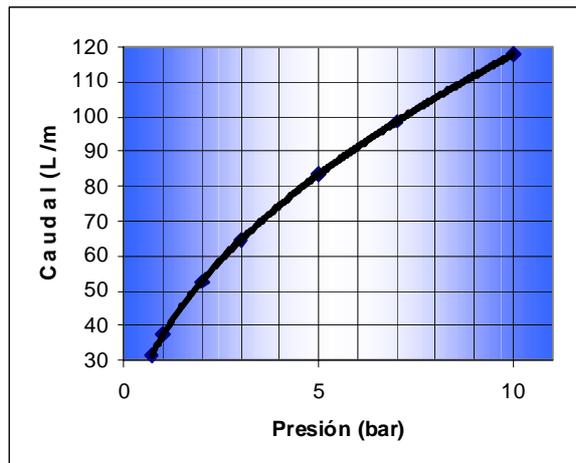


Figura 4.4: Comportamiento del caudal con respecto a la presión del modelo de aspersor ECW

Presión (bar)	Flujo (L/min.)
0,7	61,8
1	73,9
2	105
3	128
5	165
7	196
10	234

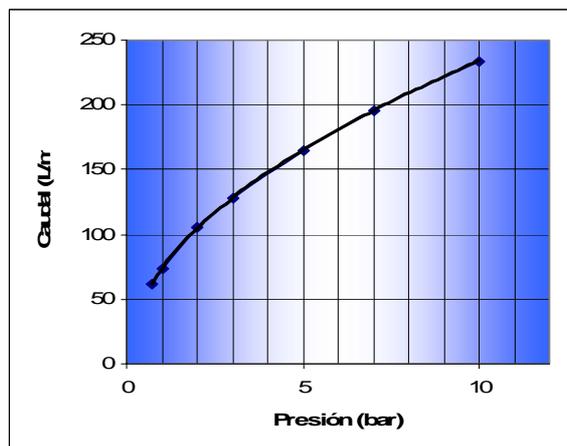


Figura 4.5: Comportamiento del caudal con respecto a la presión del modelo de aspersor EDW.

Presión (bar)	Flujo (L/min.)
0,7	61,8
1	73,9
2	105
3	128
5	165
7	196
10	234

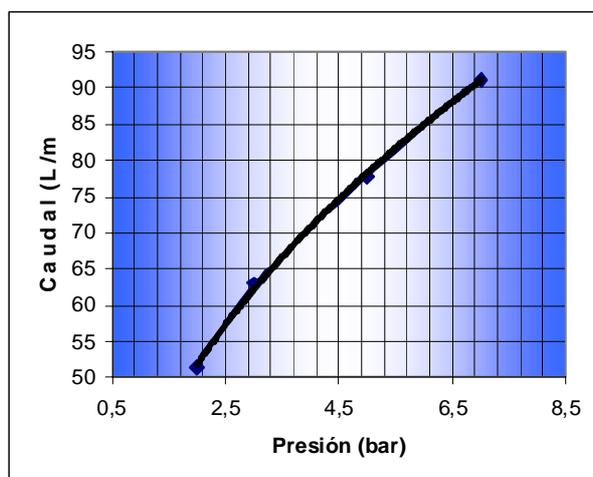


Figura 4.6: Comportamiento del caudal con respecto a la presión del modelo de aspersor UBC.

Para lograr la estabilización del sistema se ajustaron los valores del flujo en varias simulaciones, hasta observar que las presiones en cada sumidero se mantenía constante en mas de dos iteraciones, obteniendo para la última de ellas los resultados mostrados en las tablas 4.10y 4.11.

Tabla 4.10: Perfiles de velocidad y caída de presión para la red de tuberías caso agua de la propuesta N^{ro} 2 (sistema estabilizado).

TRAMO DE TUBERÍAS	VELOCIDAD (m/s)	GRADIENTE DE PRESIÓN (KPa/m)	CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN POR ELEVACIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL (KPa)
00-01	1,45	0,064	-0,128	0	-0,128
01-02	1,75	0,167	-13	-10	-23
02-A1	0,32	0,012	-0,084	0	-0,084
A1-A2	0,16	0,003	-88	0	-88
02-03	1,61	0,142	-0,651	0	-0,651
03-B1	1,22	0,314	-1	0	-1
B1-B2	0,61	0,087	-10	0	-10
03-13	0,62	0,039	-16	-16	-32
13-M1	1,18	0,298	-2	0	-2
M1-M2	0,59	0,082	-10	0	-10
13-N1	1,16	0,286	-14	-11	-25
N1-N2	0,58	0,079	-9	0	-9
03-04	1,2	0,081	8	10	18
04-C1	1,24	0,324	-1	0	-1
C1-C2	0,62	0,089	-11	0	-11
04-05	1,03	0,064	-35	-33	-68
05-D1	1,16	0,289	-1	0	-1
D1-D2	0,58	0,08	-9	0	-9
05-06	0,92	0,049	-0,3	0	-0,3
06-E1	1,16	0,289	-1	0	-1

Tabla 4.10: Continuación

E1-E2	0,58	0,08	-9	0	-9
06-07	0,78	0,037	-0,263	0	-0,263
07-F1	1,16	0,288	-1	0	-1
F1-F2	0,58	0,08	-9	0	-9
07-08	0,65	0,026	-11	-10	-21
08-G1	1,12	0,269	-9	-8	-17
G1-G2	0,56	0,074	-9	0	-9
08-09	0,52	0,017	-13	-12	-25
09-H1	0,29	0,01	-0,0653	0	-0,0653
H1-H2	0,14	0,003	-68	0	68
09-10	0,89	0,077	14	19	33
10-11	0,74	0,055	-2	-1	-3
11-I2	0,56	0,075	-73	0	-73
11-12	0,59	0,036	-5	-5	-10
12-L1	0,29	0,01	-17	-6	-23
L1-L2	0,14	0,003	-69	0	-69
12-J1	1,16	0,286	8	11	19
J1-J2	0,58	0,079	-9	0	-9
01-14	1,28	0,066	-70	-65	-135
14-15	1,17	0,077	-1	0	-1
15-A3	0,27	0,008	-95	-2	-97
15-16	1,05	0,063	-0,956	0	-0,956
16-B3	0,27	0,008	-94	-2	-96
16-17	0,93	0,051	-0,766	0	-0,766
17-C3	0,27	0,008	-94	-2	-96
17-18	0,82	0,04	-0,597	0	-0,597
18-D3	0,27	0,008	-94	-2	-96
18-19	0,7	0,03	-0,448	0	-0,448
19-E3	0,27	0,008	-94	-2	-96
19-20	0,58	0,021	-0,319	0	-0,319
20-F3	0,26	0,008	-94	-2	-96
20-21	0,47	0,014	-0,212	0	-0,212
21-G3	0,26	0,008	-94	-2	-96
21-22	0,35	0,008	-0,125	0	-0,125
22-H3	0,26	0,008	-94	-2	-96

Tabla 4.10: Continuación

22-23	0,23	0,004	-0,0599	0	-0,0599
23-I3	0,26	0,008	-94	-2	-96
23-J3	0,26	0,008	-94	-2	-96
14-25	1,05	0,063	-14	-4	-18
25-K3	0,26	0,008	-91	-2	-93
25-26	0,93	0,051	-0,763	0	-0,763
26-L3	0,26	0,008	-90	-2	-92
26-27	0,82	0,04	-0,597	0	-0,597
27-M3	0,26	0,008	-90	-2	-92
27-28	0,7	0,03	-0,451	0	-0,451
28-N3	0,26	0,008	-90	-2	-92
28-29	0,59	0,021	-0,324	0	-0,324
29-O3	0,26	0,008	-90	-2	-92
29-30	0,47	0,014	-0,218	0	-0,218
30-P3	0,26	0,008	-90	-2	-92
30-31	0,36	0,009	-0,105	0	-0,105
31-Q3	0,26	0,008	-90	-2	-92
31-32	2,25	0,004	-0,0308	0	-0,0308
32-R3	0,26	0,008	-90	-2	-92
32-S3	1,13	0,273	16	35	51
S3-T3	0,53	0,075	-9	0	-9

Tabla 4.11: Presiones en las boquillas de la red de tuberías caso agua de la propuesta N^o 2 (sistema estabilizado).

SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa.)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa.)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa.)
A1	436,3	I1	386,1	F3	311,8
A2	436,3	I2	383,9	G3	311,6
B1	511,7	J1	456,1	H3	311,5

Tabla 4.11: Continuación

B2	511,7	J2	456,1	I3	311,5
C1	529,6	L1	355,1	J3	311,4
C2	529,6	L2	355,1	K3	301,1
D1	462,8	M1	479,5	L3	300,6
D2	462,8	M2	479,5	M3	300,1
E1	462,5	N1	457,5	N3	299,8
E2	462,5	N2	457,5	O3	299,5
F1	462,2	A3	314,2	P3	299,4
F2	462,2	B3	313,4	Q3	299,3
G1	425,7	C3	312,9	R3	299,2
G2	425,7	D3	312,4	S3	433,2
H1	358,6	E3	312	T3	433,2
H2	658,6				

Se puede observar que las presiones aumentaron considerablemente en todos los sumideros, alcanzando en el punto C1 la mayor de ellas (529,6 KPa) a 329,6 KPa sobre el valor mínimo requerido por la boquilla en dicho punto. También se observa que los tramos 01-14 y 14-25, la caída de presión es muy elevada debido a la columna de líquido presente en dichos tramos, por lo tanto es necesario una elevada presión en la fuente (a la descarga de la bomba) para vencer la presión por diferencia de alturas presente en dichas tuberías.

Comparando las caídas de presión por fricción y por diferencia de altura en el sistema, se evidencia que son estas últimas las que determinan el perfil de presión del ramal que distribuye el flujo hacia los aspersores que se encuentran a mayor altura (desde el tramo 01-14 hasta el tramo S3-T3), por lo tanto, una disminución del flujo o un aumento del diámetro de dicho ramal, no será relevante en la variación de las caídas de presión y no se logrará una reducción significativa de la presión a la descarga de la bomba.

Aunado a esto, el flujo total manejado por el sistema es igual a 4439,6 L/min, este valor sobrepasa el valor de flujo mínimo fijado inicialmente y proporciona un tiempo menor (18 minutos) al mínimo establecido para la operación del sistema durante la limpieza (20 minutos).

Por esta razón, fue necesario disminuir el flujo manejado por la red de tuberías, manteniendo la presión de operación de los aspersores ubicados a mayor altura (modelo EDW) a su presión de operación mínima requerida.

El modelo de boquillas UBC inicialmente fue seleccionado en las condiciones de flujo mínimas recomendadas por el fabricante, pero de acuerdo a la simulación estas operaran a un promedio de 400 KPa, por lo tanto, debe seleccionarse otra boquilla que pueda operar a dicha presión y a un menor flujo.

Se seleccionaron nuevos modelos de aspersores mostrados en la tabla 4.12 y el flujo total manejado se muestra en la tabla 4.13.

Tabla 4.12: Modelos de aspersores seleccionados.

MODELO	CÓDIGO	PRESIÓN DE OPERACIÓN (KPa.)	LONGITUD EFECTIVA (m)	RADIO MOJADO (m)	ZONA A LIMPIAR	PUNTOS DE LIMPIEZA
UBC 	2630-B31BG	400	2.5	2	BANDAS Y TAMBORES	B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, F1, F2, G1, G2, J1, J2, M1, M2, N1, N2, S3 y T3
ECW 	2640 xx	300	3,5	2	TOLVAS Y TORRE 2	A1,A2, H1, H2, I1, I2, L1 y L2

Tabla 4.12: Continuación

	EDW	3128 xx	300	7,5	6,3	GALERÍA	A3, B3, C3, D3, E3, F3, G3, H3, I3, J3, K3, L3, M3, N3, O3, P3, Q3 y R3
---	-----	---------	-----	-----	-----	---------	--

Tabla 4.13: Flujo de agua y aire manejado por las propuestas de diseño planteadas.

FLUIDO	ASPERSORES			FLUJO MANEJADO (L/min)	CAUDAL TOTAL (L/min)
	MODELO	CANTIDAD	CAUDAL POR UNIDAD (L/min)		
AGUA	UBC	20	70,77	1415,4	3446,6
	ECW	8	41,5	332	
	EDW	18	94,4	1699,2	
AIRE	UBC	16	70,77	1132,32	1381,32
	ECW	6	41,5	249	

Con los nuevos valores de flujo fijados en cada sumidero se realizó la simulación en Pipephase, fijando esta vez 502 KPa en la fuente, para garantizar que todos los puntos de aspersión se encuentren sobre los valores de presión mínima requerida por las boquillas, los resultados se observan en las tablas 4.14 y 4.15.

Tabla 4.14: Perfiles de velocidad y caída de presión para la red de tuberías caso agua de la propuesta N^{ro} 2 con las nuevas boquillas.

TRAMO DE TUBERÍAS	VELOCIDAD (m/s)	GRADIENTE DE PRESIÓN (KPa/m)	CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN POR ELEVACIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL (KPa)
00-01	1,13	0,039	-0,079	0	-0,079
01-02	1,43	0,144	-12	-10	-22
02-A1	0,64	0,095	-0,389	0	-0,389
A1-A2	0,32	0,027	-23	0	-23
02-03	1,36	0,103	-0,473	0	-0,473
03-B1	0,29	0,01	-0,066	0	-0,066
B1-B2	0,17	0,003	-9	0	-9
03-13	0,57	0,034	-16	-16	-32
13-M1	0,29	0,01	-0,08	0	-0,08
M1-M2	0,14	0,003	-9	0	-9
13-N1	0,29	0,01	-12	-11	-23
N1-N2	0,14	0,003	-9	0	-9
03-04	0,98	0,056	9	10	19
04-C1	0,29	0,01	-0,054	0	-0,054
C1-C2	0,14	0,003	-9	0	-9
04-05	0,85	0,043	-4	-63	-67
05-D1	0,29	0,01	-0,062	0	-0,062
D1-D2	0,14	0,003	-9	0	-9
05-06	0,73	0,032	-0,194	0	-0,194
06-E1	0,29	0,01	-0,062	0	-0,062
E1-E2	0,14	0,003	-9	0	-9
06-07	0,6	0,022	-0,161	0	-0,161
07-F1	0,29	0,01	-0,062	0	-0,062
F1-F2	0,14	0,003	-9	0	-9
07-08	0,48	0,014	-20	-1	-21
08-G1	0,29	0,01	-16	0	-16

Tabla 4.14: Continuación.

G1-G2	0,14	0,003	-9	0	-9
08-09	0,35	0,008	-13	-12	-25
09-H1	0,64	0,095	-0,38	0	-0,38
H1-H2	0,32	0,027	-23	0	-23
09-10	0,62	0,04	13	20	33
10-11	0,54	0,03	-2	-1	-3
11-I2	0,32	0,027	-23	0	-23
11-12	0,46	0,022	-5	-5	-10
12-L1	0,17	0,095	-12	-11	-23
L1-L2	0,32	0,027	-23	0	-23
12-J1	0,29	0,01	21	0	21
J1-J2	0,14	0,003	-9	0	-9
01-14	0,95	0,038	-68	-65	-133
14-15	0,84	0,042	-0,694	0	-0,694
15-A3	0,73	0,12	-50	-2	-52
15-16	0,76	0,034	-0,52	0	-0,52
16-B3	0,73	0,12	-50	-2	-52
16-17	0,67	0,028	-0,417	0	-0,417
17-C3	0,73	0,12	-50	-2	-52
17-18	0,59	0,022	-0,326	0	-0,326
18-D3	0,73	0,12	-50	-2	-52
18-19	0,51	0,016	-0,241	0	-0,241
19-E3	0,73	0,12	-50	-2	-52
19-20	0,42	0,012	-0,176	0	-0,176
20-F3	0,73	0,12	-50	-2	-52
20-21	0,34	0,008	-0,117	0	-0,117
21-G3	0,73	0,12	-50	-2	-52
21-22	0,25	0,005	-0,069	0	-0,069
22-H3	0,73	0,12	-50	-2	-52
22-23	0,17	0,002	-0,033	0	-0,033
23-I3	0,73	0,12	-50	-2	-52
23-J3	0,73	0,12	-51	-2	-53
14-25	0,8	0,038	-10	-4	-14
25-K3	0,73	0,12	-50	-2	-52

Tabla 4.14: Continuación.

25-26	0,72	0,031	-0,467	0	-0,467
26-L3	0,73	0,12	-50	-2	-52
26-27	0,63	0,025	-0,37	0	-0,37
27-M3	0,73	0,12	-50	-2	-52
27-28	0,55	0,019	-0,284	0	-0,284
28-N3	0,73	0,12	-50	-2	-52
28-29	0,46	0,014	-0,209	0	-0,209
29-O3	0,73	0,12	-50	-2	-52
29-30	0,38	0,01	-0,145	0	-0,145
30-P3	0,73	0,12	-50	-2	-52
30-31	0,3	0,006	-0,073	0	-0,073
31-Q3	0,73	0,12	-50	-2	-52
31-32	0,21	0,003	-0,023	0	-0,023
32-R3	0,73	0,12	-50	-2	-52
32-S3	0,29	0,01	13	42	55
S3-T3	0,14	0,003	-9	0	-9

Tabla 4.15: Presiones de las boquillas de aspersión

SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)
A1	456,5	I1	395,2	F3	315,2
A2	456,5	I2	392,3	G3	315,1
B1	471,1	J1	418,7	H3	315,1
B2	471,1	J2	418,7	I3	315
C1	489,7	L1	359,5	J3	313,4
C2	489,7	L2	359,5	K3	303,1
D1	422,4	M1	439,4	L3	302,7

Tabla 4.15: Continuación.

D2	422,4	M2	439,4	M3	302,3
E1	422,2	N1	416,9	N3	302
E2	422,2	N2	416,9	O3	301,8
F1	422,1	A3	316,9	P3	301,7
F2	422,1	B3	316,4	Q3	301,6
G1	385,8	C3	316	R3	300,8
G2	385,8	D3	315,7	S3	400,1
H1	361,7	E3	315,4	T3	400,1
H2	361,7				

Al igual que en el procedimiento anterior fue necesario estabilizar el sistema hasta observar que las presiones se mantengan constantes en la mayoría de los sumideros, en esta oportunidad las graficas de los aspersores utilizadas se muestran en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 y los resultados de la simulación en pipephase luego de la estabilización están representados en las tablas 4.16 y 4.17.

Presión (bar)	Flujo (L/min.)
0,7	20
1	24
2	33,9
3	41,5
5	53,6
7	63,4
10	75,8

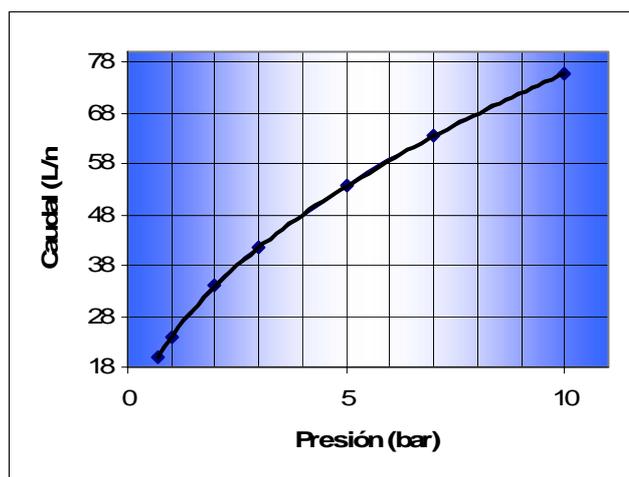


Figura 4.7: Comportamiento del caudal con respecto a la presión del modelo de aspersor ECW.

Presión (bar)	Flujo (L/min.)
0,7	45,6
1	54,5
2	77,1
3	94,4
5	122
7	144
10	172

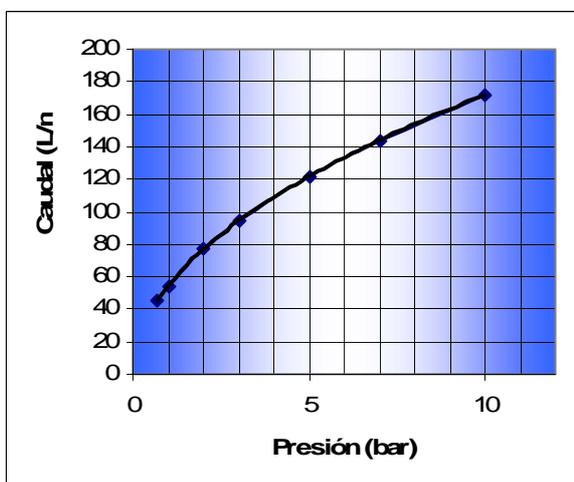


Figura 4.8: Comportamiento del caudal con respecto a la presión del modelo de aspersor EDW.

Presión (bar)	Flujo (L/min.)
2	57,4
3	63
4	70,77
5	77,7
7	91,2

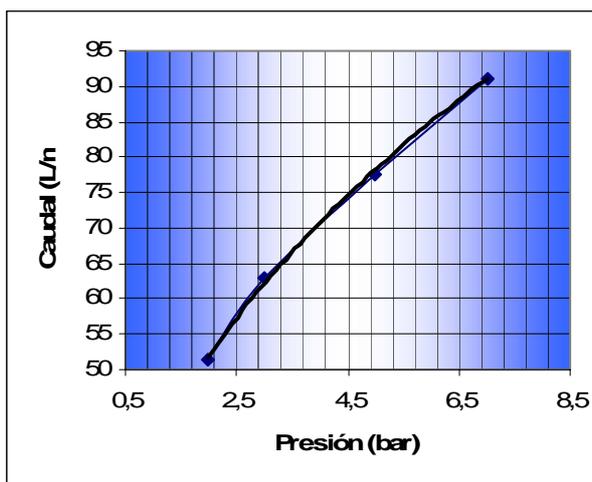


Figura 4.9: Comportamiento del caudal con respecto a la presión del modelo de aspersor UBC.

Tabla 4.16: Perfiles de velocidad y caída de presión para la red de tuberías caso agua de la propuesta N^{ro} 2 con las nuevas boquillas (sistema estabilizado).

TRAMO DE TUBERÍAS	VELOCIDAD (m/s)	GRADIENTE DE PRESIÓN (KPa/m)	CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN POR ELEVACIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL (KPa)
00-01	1,16	0,042	-0,084	0	-0,084
01-02	0,51	0,126	-12	-10	-22
02-A1	0,78	0,136	-0,572	0	-0,572
A1-A2	0,39	0,038	-34	0	-34
02-03	0,42	0,112	-0,514	0	-0,514
03-B1	0,31	0,011	-0,076	0	-0,076
B1-B2	0,15	0,003	-10	0	-10
03-13	0,59	0,016	-16	-16	-32
13-M1	0,3	0,01	-0,087	0	-0,087
M1-M2	0,15	0,003	-9	0	-9
13-N1	0,29	0,01	-12	-11	-23
N1-N2	0,15	0,003	-9	0	-9
03-04	1,02	0,06	8	10	18
04-C1	0,31	0,011	-0,064	0	-0,064
C1-C2	0,15	0,003	-10	0	-10
04-05	0,89	0,046	-34	-33	-67
05-D1	0,29	0,01	-12	-11	-23
D1-D2	0,15	0,003	-9	0	-9
05-06	0,76	0,034	-0,174	0	-0,174
06-E1	0,29	0,01	-0,065	0	-0,065
E1-E2	0,15	0,003	-9	0	-9
06-07	0,63	0,024	-0,174	0	-0,174
07-F1	0,29	0,01	-0,065	0	-0,065
F1-F2	0,15	0,003	-9	0	-9

Tabla 4.16: Continuación

07-08	0,5	0,016	-11	-10	-21
08-G1	0,28	0,009	-8	-8	-16
G1-G2	0,14	0,003	-8	0	-8
08-09	0,37	0,009	-13	-12	-25
09-H1	0,7	0,111	-0,45	0	-0,45
H1-H2	0,35	0,031	-28	0	-28
09-10	0,67	0,045	13	20	33
10-11	0,57	0,034	-2	-1	-3
11-I2	0,36	0,033	-30	0	-30
11-12	0,48	0,024	-5	-5	-10
12-L1	0,69	0,11	-22	-11	-33
L1-L2	0,35	0,031	-27	0	-27
12-J1	0,29	0,01	10	11	21
J1-J2	0,15	0,003	-9	0	-9
01-14	0,96	0,038	-68	-65	-133
14-15	0,86	0,044	-0,722	0	-0,722
15-A3	0,74	0,125	-52	-2	-54
15-16	0,77	0,036	-0,54	0	-0,54
16-B3	0,74	0,125	-52	-2	-54
16-17	0,69	0,029	-0,433	0	-0,433
17-C3	0,74	0,125	-52	-2	-54
17-18	0,6	0,022	-0,338	0	-0,338
18-D3	0,74	0,125	-52	-2	-54
18-19	0,58	0,017	-0,254	0	-0,254
19-E3	0,74	0,125	-52	-2	-54
19-20	0,43	0,012	-0,182	0	-0,182
20-F3	0,74	0,125	-52	-2	-54
20-21	0,34	0,008	-0,121	0	-0,121
21-G3	0,74	0,125	-52	-2	-54
21-22	0,26	0,005	-0,072	0	-0,072
22-H3	0,74	0,125	-52	-2	-54
22-23	0,17	0,002	-0,035	0	-0,035
23-I3	0,74	0,125	-52	-2	-54
23-J3	0,74	0,124	-53	-2	-55

Tabla 4.16: Continuación.

14-25	0,8	0,038	-11	-4	-15
25-K3	0,73	0,121	-50	-2	-52
25-26	0,72	0,031	-0,469	0	-0,469
26-L3	0,73	0,121	-50	-2	-52
26-27	0,63	0,025	-0,371	0	-0,371
27-M3	0,73	0,121	-50	-2	-52
27-28	0,55	0,019	-0,285	0	-0,285
28-N3	0,73	0,12	-50	-2	-52
28-29	0,46	0,014	-0,209	0	-0,209
29-O3	0,73	0,12	-50	-2	-52
29-30	0,38	0,01	-0,145	0	-0,145
30-P3	0,73	0,12	-50	-2	-52
30-31	0,3	0,006	-0,073	0	-0,073
31-Q3	0,73	0,12	-50	-2	-52
31-32	0,21	0,003	-0,023	0	-0,023
32-R3	0,73	0,12	-50	-2	-52
32-S3	0,29	0,01	27	28	55
S3-T3	0,14	0,003	-9	0	-9

Tabla 4.17: Presiones en las boquillas de la red de tuberías caso agua de la propuesta N^o 2 con las nuevas boquillas (sistema estabilizado).

SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)
A1	444,9	I1	387,7	F3	313,1
A2	444,9	I2	385,1	G3	313
B1	469,4	J1	417,7	H3	313
B2	469,4	J2	417,7	I3	312,9

Tabla 4.17: Continuación

C1	487,6	L1	344,8	J3	311,5
C2	487,6	L2	344,8	K3	302,7
D1	421,5	M1	438,3	L3	302,3
D2	421,5	M2	438,3	M3	302
E1	421,3	N1	416,2	N3	301,7
E2	421,3	N2	416,2	O3	301,5
F1	421,1	A3	314,6	P3	301,4
F2	421,1	B3	314,2	Q3	301,3
G1	385,5	C3	313,8	R3	300,6
G2	385,5	D3	313,5	S3	400
H1	356,7	E3	313,3	T3	400
H2	356,7				

El flujo total manejado por el sistema estabilizado es de 3554,36 L/min lo cual indica que el tiempo de operación hasta lograr el 80% del llenado del tanque es de 22,5 minutos, tiempo mayor al estipulado inicialmente.

Todas las presiones mostradas en la tabla 4.17 se encuentran sobre los niveles requeridos en las boquillas y la mínima presión presente en el sistema es en el punto R3 (300.6 KPa), por lo tanto se considera que las boquillas seleccionadas podrán operar bajo niveles permisibles y logrando la limpieza en el tiempo necesario y con una cantidad de fluido menor a la disponible.

En el caso de la simulación para la red de tuberías con aire, fueron fijados en cada sumidero los valores de flujo requeridos por los modelos de boquillas seleccionados (tabla 4.12) y se seleccionó aire como fluido de operación de la red. Luego de realizar la simulación para varias presiones en el sumidero se considero 401 KPa como la menor presión que garantiza el cumplimiento de las presiones requeridas en todos los aspersores, los resultados se observan en las tablas 4.18 y 4.9.

Tabla 4.18: Perfiles de velocidad y caída de presión para la red e tuberías caso aire de la propuesta N^{ro} 2.

TRAMO DE TUBERÍAS	VELOCIDAD (m/s)	GRADIENTE DE PRESIÓN (KPa/m)	CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN POR ELEVACIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL (KPa)
00-02	1,08	4,01E-04	-5,15E-02	-4,55E-02	-9,70E-02
02-A1	0,13	1,57E-05	-6,92E-05	0	-6,92E-05
A1-A2	0,06	3,62E-06	-6,23E-02	0	-6,23E-02
02-03	1,03	3,64E-04	-1,67E-03	0	-1,67E-03
03-B1	0,82	9,45E-04	-3,23E-03	0	-3,23E-03
B1-B2	0,41	2,81E-04	-2,23E-02	0	-2,23E-02
03-13	0,43	1,31E-04	-7,43E-02	-7,27E-02	-1,47E-01
13-M1	0,82	9,43E-04	-6,71E-03	0	-6,71E-03
M1-M2	0,41	2,80E-04	-2,23E-02	0	-2,23E-02
13-N1	0,82	9,43E-04	-5,96E-02	-5,24E-02	-1,12E-01
N1-N2	0,41	2,80E-04	-2,23E-02	0	-2,23E-02
03-04	0,74	2,02E-04	4,24E-02	4,56E-02	8,80E-02
04-C1	0,82	9,44E-04	-2,82E-03	0	-2,82E-03
C1-C2	0,41	2,81E-04	-2,22E-02	0	-2,22E-02
04-05	0,64	1,58E-04	-1,59E-01	-1,53E-01	-3,12E-01
05-D1	0,82	9,43E-04	-2,85E-03	0	-2,85E-03
D1-D2	0,41	2,80E-04	-2,22E-02	0	-2,22E-02
05-06	0,55	1,19E-04	-7,23E-04	0	-7,23E-04
06-E1	0,82	9,42E-04	-2,85E-03	0	-2,85E-03
E1-E2	0,41	2,80E-04	-2,22E-02	0	-2,22E-02
06-07	0,45	8,47E-05	-6,09E-04	0	-6,09E-04
07-F1	0,82	9,42E-04	-2,85E-03	0	-2,85E-03
F1-F2	0,41	2,80E-04	-2,22E-02	0	-2,22E-02
07-08	0,36	5,59E-05	-4,89E-02	-4,79E-02	-9,68E-02
08-G1	0,82	9,42E-04	-4,23E-02	-3,63E-02	-7,86E-02
G1-G2	0,41	2,80E-04	-2,23E-02	0	-2,23E-02
08-09	0,26	3,25E-05	-5,79E-02	-5,71E-02	-1,15E-01

Tabla 4.18: Continuación.

09-H1	0,13	1,56E-05	-6,74E-05	0	-6,74E-05
H1-H2	0,06	3,61E-06	-6,23E-02	0	-6,23E-02
09-10	0,47	1,51E-04	8,02E-02	7,98E-02	1,60E-01
10-11	0,41	1,17E-04	-7,20E-03	-6,90E-03	-1,41E-02
11-I2	0,24	1,12E-04	-6,22E-02	0	-6,22E-02
11-12	0,34	8,70E-05	-2,34E-02	-2,28E-02	-4,62E-02
12-L1	0,13	1,56E-05	-5,25E-02	-5,25E-02	-1,05E-01
L1-L2	0,06	3,61E-06	-6,23E-02	0	-6,23E-02
12-J1	0,82	9,42E-04	4,18E-02	5,02E-02	9,20E-02
J1-J2	0,41	2,80E-04	-2,22E-02	0	-2,22E-02

Tabla 4.19: Presiones en las boquillas de la red de tuberías caso aire de la propuesta N^o 2.

SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)	SUMIDERO O PUNTO DE ASPERSIÓN	PRESIÓN REGISTRADA (KPa)
A1	400,9	E2	400,7	J1	400,7
A2	400,9	F1	400,7	J2	400,7
B1	400,9	F2	400,7	L1	400,4
B2	400,9	G1	400,5	L2	400,4
C1	400,9	G2	400,5	M1	400,8
C2	400,9	H1	400,4	M2	400,8
D1	400,7	H2	400,4	N1	400,6
D2	400,7	I1	400,6	N2	400,6
E1	400,7	I2	400,6		

Los gradientes de presión por fricción que se muestran en la tabla 4.18, se encuentran en su totalidad por debajo del límite máximo establecido en la norma

PDVSA MDP-02-FF-03 para líneas de gases. De la misma manera ocurre con las velocidades en cada tramo, no sobrepasan el valor fijado en la norma PDVSA 90616.1.024, esto indica que el diseño de la red de tuberías podrá operar con flujo de aire de servicio sin estar expuestas a fallas por presión dentro de su operación normal.

4.3.3 Propuesta N° 3

Para la red de tuberías de agua los resultados son iguales a la red de agua de la propuesta 2, debido a que los arreglos de ambas redes de tuberías son iguales, por lo tanto los resultados de la simulación en Pipephase para esta red se pueden observar en las tablas 4.16 y 4.17.

La red de tuberías de aire se represento en el simulador, asignando a los tramos comunes las dimensiones establecidas en la red de agua, y de esta manera luego de verificar distintas presiones en el sumidero se obtuvieron los siguientes resultados para una presión de descarga del compresor igual a 403 KPa.

Tabla 4.20: Perfiles de velocidad y caída de presión para la red e tuberías caso aire de la propuesta N° 3.

TRAMO DE TUBERÍAS	VELOCIDAD (m/s)	GRADIENTE DE PRESIÓN (KPa/m)	CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN POR ELEVACIÓN (KPa)	CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL (KPa)
00-02	7,98	6,10E-02	-5,75E-01	-4,57E-02	-6,21E-01
02-A2	0,48	3,69E-04	-1,53E-03	0	-1,53E-03
A2-A1	0,24	1,12E-04	-6,15E-02	0	-6,15E-02
02-03	7,51	5,40E-02	-1,39E-01	0	-1,39E-01
03-B2	0,22	3,91E-05	-2,40E-03	0	-2,40E-03

Tabla 4.20: Continuación.

B2-B1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
03-13	0,38	9,40E-02	-8,64E-01	-7,28E-02	-9,37E-01
13-M2	0,22	3,91E-05	-1,10E-02	0	-1,10E-02
M2-M1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
13-N2	0,22	3,91E-05	-9,15E-02	-5,25E-02	-1,44E-01
N2-N1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
03-04	5,05	2,60E-02	-1,82E-01	4,57E-02	-1,36E-01
04-C2	0,22	3,91E-05	-4,08E-04	0	-4,08E-04
C2-C1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
04-05	4,24	1,90E-02	1,70E-02	-1,53E-01	-1,36E-01
05-D2	0,22	3,91E-05	-2,39E-03	0	-2,39E-03
D2-D1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
05-06	3,42	1,20E-02	-5,04E-02	0	-5,04E-02
06-E2	0,22	3,91E-05	-2,39E-03	0	-2,39E-03
E2-E1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
06-07	2,6	8,00E-03	-3,87E-02	0	-3,87E-02
07-F2	0,22	3,91E-05	-2,39E-03	0	-2,39E-03
F2-F1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
07-08	1,78	4,00E-03	-7,51E-02	-4,79E-02	-1,23E-01
08-G2	0,22	3,91E-05	-3,89E-02	-3,63E-02	-7,52E-02
G2-G1	0,11	6,16E-06	-2,25E-02	0	-2,25E-02
08-09	0,96	1,00E-03	-7,39E-02	-5,71E-02	-1,31E-01
09-H2	0,48	3,69E-04	-1,50E-03	0	-1,50E-03
H2-H1	0,24	1,12E-04	-6,16E-02	0	-6,16E-02
09-L2	1,87	1,00E-02	-5,82E-02	-2,32E-03	-6,05E-02
L2-L1	0,24	1,12E-04	-6,23E-02	-4,47E-05	-6,23E-02

En esta propuesta tanto los gradientes de presión por fricción como las velocidades se encuentran por debajo de los límites establecidos en normas, mientras que las caídas de presión en general aumentan en relación a la red con aire de la propuesta 2, esto debido al menor dimensionamiento que posee esta propuesta.

4.4 Selección de la mejor alternativa para el diseño de la red de tuberías.

Luego de la simulación en Pipephase, los resultados indicaron los perfiles de presión, velocidad y temperatura en cada fuente, sumidero, tramo y nodos de la red de tubos. Toda esta data permitió hacer un estudio técnico, basado en los requerimientos planteados en la sección 3.3, que sirviera como soporte para seleccionar la mejor propuesta del diseño de la red de tuberías que conforma el sistema de limpieza.

En la sección 4.2.1.1 se pudo constatar en la tabla 4.2 que los diámetros calculados para 4 tramos de tuberías que posee el sistema de limpieza actual, son mayores a los diámetros de la tubería existente en las instalaciones, por lo tanto esta propuesta fue descartada debido a que las capacidades limitantes de la tubería existente son mucho menores a las requeridas por el flujo manejado en los aspersores seleccionados.

Según los análisis hidráulicos realizados en las secciones 4.3.2 y 4.3.3, a las propuestas 2 y 3 respectivamente, se observa que para la propuesta 2, debido a que la misma red manejara ambos tipos de fluidos alternativamente, la presión que debe vencer el compresor (al iniciar su operación) para poder desplazar toda la columna de agua dentro de las tuberías es de 502 KPa, y luego de desplazar toda el agua retenida dentro de las tuberías operará a una presión de 350 KPa, lo cual amerita seleccionar un compresor que maneje un mayor nivel de presión que la necesaria para su operación normal, esto implicaría un mayor costo por equipo y operación. Además el hecho de manejar ambos tipos de fluidos podría traer consecuencias por efectos de la erosión dentro de la tubería.

Por su parte en la propuesta 3 se disminuyen los efectos de la erosión en la tubería y los costos por equipos y operación de los mismos, pero son mayores los costo por los metros adicionales de tuberías que deben ser instalados para el servicio de ambos tipos de fluidos.

Desde el punto de vista de consumo energético la propuesta 2, por tener equipos de mayor capacidad de compresión, tendrá un mayor consumo de energía en comparación con la propuesta 3, esto a su vez se traduce en mayores costos por operación del sistema para la empresa.

De acuerdo a esto se selecciona la propuesta 3 como la que más se adapta a las necesidades del proyecto, debido a que podrá operar con ambos tipos de fluidos, bajo los niveles permisibles; pero, a pesar de que implica un costo adicional por tuberías, estos son menores al costo por instalación, uso y mantenimiento del equipo de compresión de la propuesta 2.

4.5 Selección del material de la tubería y selección de los distintos accesorios de la red de tuberías.

La selección del material de las tuberías y de sus componentes se realizó mediante las especificaciones recomendadas en la norma “PDVSA H-221 MATERIALES DE TUBERÍAS”, a través de ella se escogió una clase de material de acuerdo al tipo de servicio de las tuberías. Estas clases proporcionan además del tipo de material, el tipo de conexión de cada ramal, los tipos de válvulas, bridas, nicles, empaquetaduras y las limitaciones presentes en cada accesorio de la tubería. Las clases seleccionadas fueron las siguientes:

CLASE	SERVICIO
✓ AA1- Acero al carbono, clasificación 150RF	(Agua de lavado)
✓ HA2- Acero al carbono, clasificación 150FF/125FF	(Aire de servicio y Agua de lavado)

Luego se verificó en cada clase, si la mayor presión y temperatura de la red de tuberías se encuentran dentro de los límites establecidos para cada tipo de material.

- ✓ Límites de presión / temperatura para clase AA1
14 kg/cm² a 204°C.
6,67 kg/cm² a 399°C.
- ✓ Límite de presión / temperatura para clase HA2
10,5 kg/cm² a 100°C.

La red de tuberías maneja las siguientes presiones y temperaturas máximas: 5,11 Kg/cm² a 28°C para agua y 4,12 Kg/cm² a 28°C para aire, por lo tanto, se encuentran dentro del rango permisible de ambas clases. De esta manera la red de tubería que opera con agua como fluido de trabajo debe ser fabricada de acuerdo a las especificaciones de la clase AA1, mientras que, la red que opera con aire se debe fabricar con las características proporcionadas por la especificación HA2, así como los ramales comunes que operan con ambos tipos de fluidos, debido a que esta última especificación además que aplica para ambos tipos de servicios, tiene límites de presión y temperatura menores a los establecidos en la clase AA1, garantizando de esta manera su buen funcionamiento durante la operación normal del sistema de limpieza.

La descripción de cada clase se puede observar en el Anexo J, y bajo sus especificaciones se diseñaron los planos isométricos del diseño planteado (ver anexo M).

Como fue explicado en el capítulo anterior, la red de tuberías diseñada realiza la limpieza del sistema de transporte de urea en tres áreas de operación del mismo, las cuales tienen movimientos independientes dependiendo de la maniobra realizada durante la carga de un buque. Por esta razón se diseñaron 3 puntos de acople a lo largo de la red de tuberías que permitirá conectar la red para su operación de limpieza, y posteriormente desconectarla durante la operación normal del mismo.

Estos acoples serán conectados a la tubería mediante mangueras de caucho con o sin reesfuerzos, dependiendo de los niveles de presión y temperatura y el material a transportar. De acuerdo a las presión máxima del sistema y teniendo agua y aire como fluidos de trabajo, el tipo de mangueras requerida será de tipo HKL (fabricada en caucho sin reesfuerzo y de 8 mm. De espesor) según las recomendaciones del fabricante.

Los acoples recomendados y las mangueras seleccionadas son mostradas en las figuras 4.10 y 4.11 respectivamente.



Figura 4.10: Acople rápido seleccionado



Figura 4.11: Mangueras de caucho: a) 5 mm. de espesor, b) 8 mm. de espesor, c) 8 mm. de espesor reforzado con nylon, d) 8 mm. de espesor reforzado con PVC y e) 8 mm. de espesor reforzado con fibra de vidrio y carbono.

Posteriormente fueron seleccionadas las áreas donde se apoyará la tubería a lo largo de toda la estructura del sistema de transporte de urea. Esta selección

fue hecha según los lugares existentes para tal fin, y de acuerdo a la condición física de la estructura más cercana a los lugares por donde debe ser colocada la red de tuberías. Para la tubería de limpieza de las cintas, los rodillos y tambores los soportes debieron ser ubicados en las estructuras que sostienen dichos dispositivos, por ser el lugar mas cercano y accesible para su operación y mantenimiento. Por otra parte, las tuberías que limpian la estructura de la galería fueron apoyadas en distintos puntos de las paredes y techo de la misma.

El tipo de soportes seleccionados para apoyar la red a las distintas estructuras es de tipo abrazaderas, debido a que son los apoyos que mas se adaptan a las condiciones donde será instalada la tubería y además están diseñados para soportar hasta 200 PSI de presión interna, son construidas en acero zincado de 20 x 2,5 mm, con tuerca electrosoldada y ajustadas a distintos diámetros (entre 2 y 12 pulgadas) con tornillos fabricados en acero rápido. La figura 4.12 muestra el tipo de abrazadera antes expuestas para tuberías entre 2 y 4 pulgadas de diámetro y la figura 4.13, muestra el modelo fabricado para tuberías de 6 a 12 pulgadas de diámetro.



Figura 4.12: Abrazadera para tubos entre 2” y 4” de diámetro. (FP)



Figura 4.13: Abrazaera para tubos entre 6” y 12” de diámetro.

Todos los soportes y demás accesorios de la red de tuberías seleccionada son esquematizados en el plano del Anexo M. En otro orden de ideas, para verificar que los puntos de apoyos asignados no ocasionaran algún tipo de deformación a la tubería, fue necesario analizar los esfuerzos a los que ésta está sujeta la red de tuberías en condiciones de operación normal, este procedimiento se realizó utilizando el software Caesar II versión 9.0 y es descrito a continuación.

Las características de la bomba y el compresor requeridos por el sistema se muestran en la tabla 4.21, estos equipos deben ser seleccionados y adquiridos de acuerdo a dichas especificaciones, para garantizar un óptimo funcionamiento y una elevada eficiencia en el funcionamiento de los aspersores.

Tabla 4.21: Características del compresor y la bomba requeridos para garantizar el correcto funcionamiento de los dispositivos de aspersión.

EQUIPO	SUCCIÓN		DESCARGA	
	Diámetro (pulg.)	Presión (PSI)	Diámetro (pulg.)	Presión (PSI)
COMPRESOR	1	27	2	58
BOMBA	4	30	10	73

4.6 Análisis de esfuerzos mediante el programa CAESAR II versión 5.1

El análisis de esfuerzos de la red de tubería seleccionada se realizó mediante el software Caesar II versión 5.1, el cual permitió realizar un análisis estático de las condiciones de operación de dicha tubería para identificar los puntos críticos debidos a deformaciones del material y de esta manera, comprobar la ubicación de la soportería de la red de tubos.

3.4.7.1 Introducción de los datos en el programa

El primer paso para realizar una simulación en Caesar II, es definir el sistema de unidades que se desea manejar para introducir los datos y para obtener los resultados, se seleccionó el Sistema Internacional por ser el más comúnmente utilizado.

Posteriormente a través de la ventana de “entrada de tuberías” (piping input) fue necesario definir cada tramo de tubería con sus respectivos accesorios, soportes, tipo de material, fluido de operación y sus respectivas cargas estáticas a la que se encuentran sometidas (presión, temperatura, fuerzas, momentos y cargas uniformes). Fue necesario definir en esta ventana el código o norma bajo el cual Caesar II relajará los cálculos respectivos de la simulación, en esta ocasión es el código ASME B31.3 el recomendado por el software por ser el más completo en

cuanto a su base de datos de materiales para tuberías, por lo tanto fue seleccionado para la simulación. La figura 4.14 muestra la ventana de dialogo descrita.

A través de los datos arrojados por esta simulación, se procedió a comprobar los valores de esfuerzos y deformaciones de la red de tuberías en operación, para rediseñar, fijar o modificar, según sea el caso, la soportería estimada inicialmente.

Para realizar la simulación en Caesar II se introdujeron los datos de las tuberías mostradas en los planos del Anexo M, y además se especifico en el programa la presión y la temperatura máximas de operación de la red de tuberías y la densidad del fluido a estudiar. Posteriormente se selecciono el código ASME B31.3 como código de referencia a través del cual el programa compara los valores de esfuerzos resultantes según los casos de carga estudiados

Figura 4.14: Ventana de entrada de tuberías “piping input” del software Caesar II versión 5.1.

En el caso de la densidad del fluido, se utilizó la del agua por ser la red de tubería que presenta mayor criticidad en cuanto a las fuerzas generadas por peso y por la dinámica del fluido a través de las tuberías.

Otro dato proporcionado al programa fue la condición del viento presente en la plataforma de manejo de urea, así como su dirección y perfil de velocidades y alturas. Todos estos factores influyen directamente sobre el sistema estudiado. La red de tuberías quedó esquematizada como se muestra en las figuras 4.15 y 4.16.

El programa Caesar II permite elegir los casos de carga que el usuario desea estudiar, teniendo como primero de ellos el caso operacional que suma las cargas producidas por la presión, la temperatura, los desplazamientos y el viento, pero además permite estudiar casos ocasionales y especiales considerando algunas de las cargas en específico o la suma de dos o más de ellas. Para nuestro estudio se tomó como caso de carga ocasional el producido por los desplazamientos y como caso especial el producido por el viento.

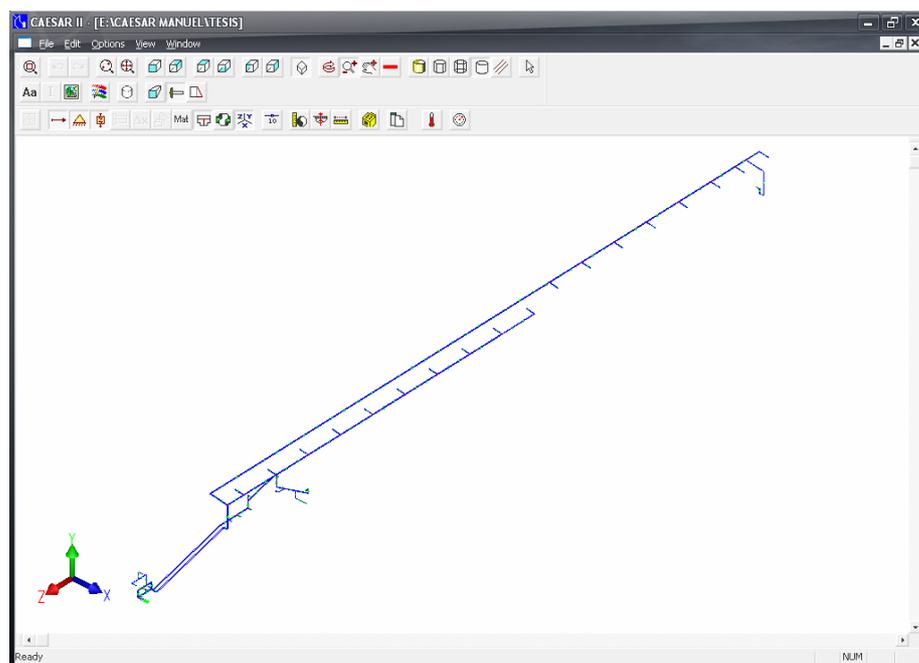


Figura 4.15: esquema de la red de tuberías en el programa Caesar II

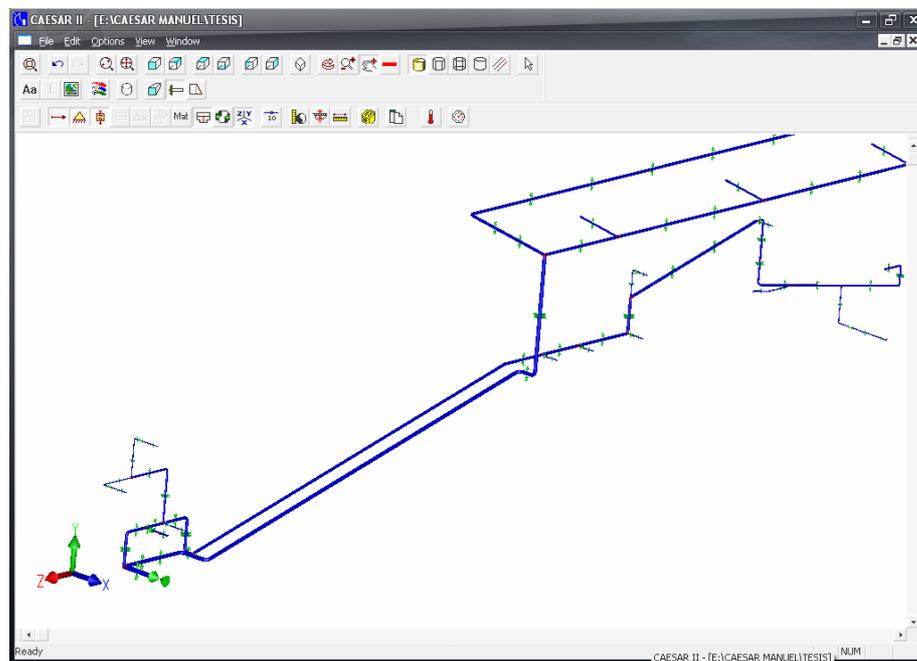


Figura 4.16: Vista detallada de una sección de la red de tuberías en Caesar II

Posterior a la verificación de los datos y corrección de las no conformidades presentadas por el programa se procedió a la corrida de la simulación, obteniendo como resultados mas críticos los del caso de carga operacional, teniendo un resumen de ellos mostrado en la tabla 4.22.

Tabla 4.22: Resumen de resultados obtenidos mediante la simulación en Caesar II

ESFUERZOS MÁXIMOS (KPa)		NODO
FLEXIÓN	150.876,2	5530
TORSIÓN	49049,7	410
AXIAL	2454,1	380
TANGENCIAL	1806,7	510
ADMISIBLE SEGÚN CÓDIGO ASME B31.3	241.316,5	TODOS

Según la tabla 4.22 se observa que para todos los casos, los esfuerzos máximos están por debajo del valor límite permisible, lo cual indica que los niveles de esfuerzos a los cuales estará sometida la red no ocasionarán ningún tipo de fallas, durante la operación normal del sistema.

Específicamente se observa que el esfuerzo por flexión es el de mayor incidencia sobre la tubería debido a que ese punto, es la primera salida de flujo o ramificación presente en el cabezal de suministro de agua al brazo de carga (Shiploder), y la elevada caída de presión hacia dicho ramal hace que el flujo ejerza una fuerza considerable sobre la tubería, que origina las deformaciones producidas por los efectos de momentos flectores. (Ver figura 4.17).

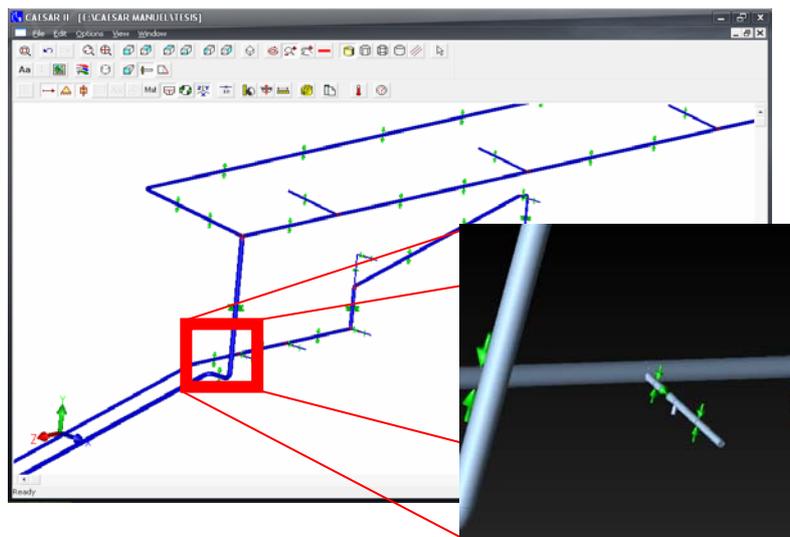


Figura 4.17: Sección que presenta mayor esfuerzo por flexión en la red de tuberías.

En cuanto a los esfuerzos por torsión, que es el siguiente en orden de incidencia o criticidad en la red de tuberías, es producido en dicho punto por un cambio brusco en la dirección del fluido lo cual genera fuerzas en sentido contrario dentro de la tubería que producen dichos efectos de torsión (ver figura 4.18).

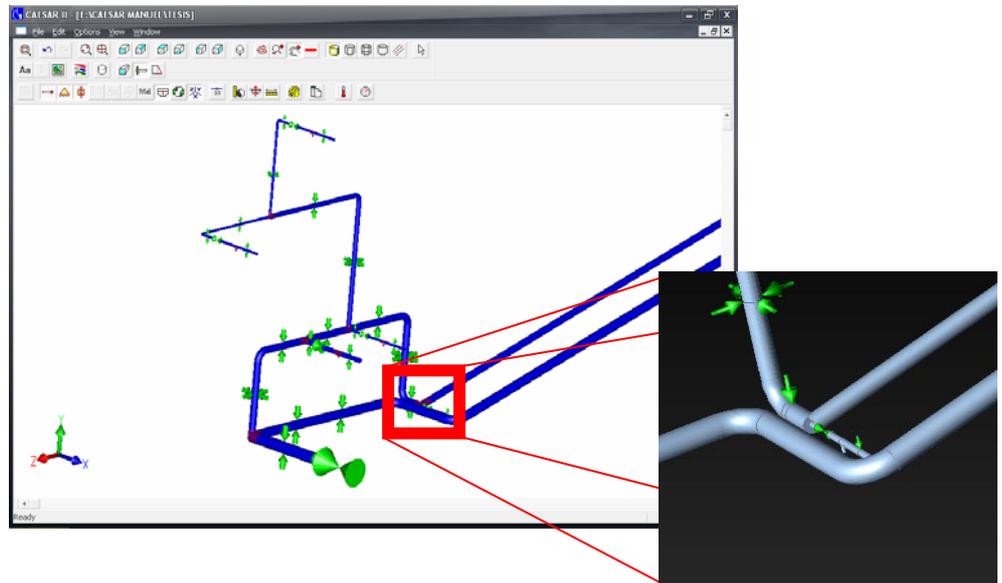


Figura 4.18: Sección que presenta mayor esfuerzo por torsión en la red de tuberías.

En cuanto a los esfuerzos axiales y tangenciales, ambos se presentan en las zonas de menor diámetro en la red de tuberías. El primero en un área de salida del fluido hacia los dispositivos de aspersión, y el segundo en una zona donde un doble cambio en la dirección del flujo pudiera ocasionar la falla de la tubería en sentido tangencial (ver figura 4.19).

Debido a los resultados obtenidos mediante la simulación en Caesar II se determinó, que la red de tubería que conformará en sistema de limpieza para el sistema de transporte de urea, se muestra en el plano del anexo M. Las condiciones bajo las cuales fue diseñada dicha red de tuberías consideran diversos factores de seguridad de acuerdo a los tipos de fluidos de operación del sistema, su comportamiento dentro de la tubería, las especificaciones del material de las tuberías y los niveles de esfuerzos que éstos representan, por lo tanto existe un bajo porcentaje de ocurrencia de alguna falla o novedad durante la operación normal del sistema.

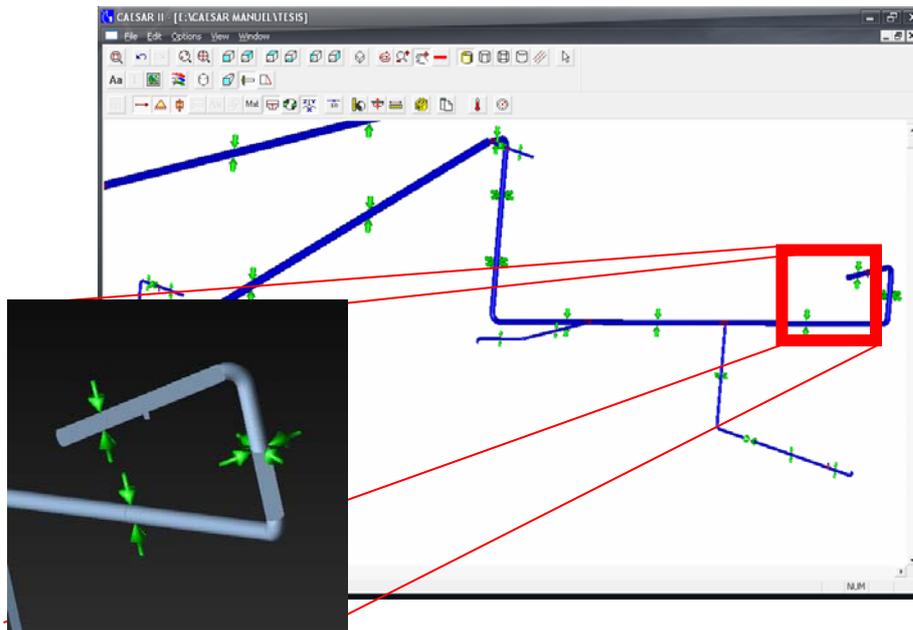


Figura 4.19: Sección que presenta mayor esfuerzo tangencial en la red de tuberías.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. Actualmente, los procedimientos de limpieza utilizados en el sistema de transporte de urea, en su mayoría no cumplen con las exigencias requeridas para tal fin, debido a la mala utilización de los recursos y a la no estandarización de los procedimientos.
2. Se plantearon tres (3) alternativas para el ruteo de la red de tuberías que realizará la limpieza automática del sistema de transporte de urea y en cada una de ellas, se consideraron las zonas críticas de limpieza establecidas.
3. Los aspersores seleccionados fueron los modelos: UBC-2630-B31BG para la limpieza de las bandas transportadoras y de los tambores que las impulsan, debido a que posee pequeñas ranuras que causan un efecto de abanico en el flujo a la salida del mismo, logrando la limpieza de las cintas en movimiento; el modelo ECW-2640 para la limpieza de las tolvas y contrapeso, por realizar el rociado en forma de cono y alcanza mayor área de limpieza y el modelo EDW-3128, que realiza el mismo efecto que el ECW pero alcanzando mayor longitud de rociado por lo cual se ajusta a las condiciones de limpieza de la galería.
4. La propuesta N° 1 para la red de tuberías, fue descartada debido a que las dimensiones de los tramos de tuberías existentes 01-11, 11-21, 21-22 y 21-33, están por debajo de las dimensiones que requieren dichas tuberías para su operación en condiciones normales.

5. Los perfiles de presión y temperatura bajo los cuales operan las propuestas 2 y 3 para ambos tipos de fluidos, aseguran el funcionamiento del sistema bajo las condiciones mínimas requeridas por el mismo.
6. La propuesta seleccionada para el sistema de limpieza fue la número tres (3) debido a que la misma conlleva menor consumo de agua, menores gastos de construcción, instalación, operación y mantenimiento del sistema, así como también disminuye los efectos de erosión y corrosión de las tuberías con respecto a la propuesta N° 2.
7. Mediante la aplicación de la propuesta seleccionada el llenado del 80% del tanque de recolección de aguas servidas y amoniacales se lograra en 22,5 min., esto permite garantizar un margen de ajuste del flujo al momento de comprobar la operación real de la red de tuberías en el momento de su instalación y además, representa un 75% del tiempo en que se realiza actualmente la operación de limpieza del sistema de transporte (30 min.)
8. Los esfuerzos máximos a los cuales esta sometida la red de tuberías, representan aproximadamente el 63 % del valor de esfuerzo máximo permisible de acuerdo al código aplicable para dicha red (ASME B31.3). Esto garantiza menor ocurrencia de fallas mecánicas en las tuberías durante la operación normal del sistema.
9. La red de tuberías diseñada garantiza la operación del sistema de limpieza, bajo los límites permisibles establecidos en los códigos y normas respectivas y cumpliendo con los requerimientos mínimos exigidos por la empresa para su misión.

5.2 Recomendaciones

1. Durante la instalación del sistema de limpieza propuesto, realizar las pruebas respectivas en cuanto a presión y alcance de rociado de cada uno de los aspersores seleccionados para cada zona y de esta manera, establecer el flujo total de aire y agua que debe ser manejado por el compresor y la bomba respectivamente.
2. Diseñar un sistema de control automatizado que permita manipular la apertura de todas las válvulas de la red de tuberías y que pueda ser operado desde la sala de control del muelle.
3. Evaluar la factibilidad de construir la red de tuberías en acero al carbono (propuesto en este proyecto) o en un material anticorrosivo que soporte los niveles máximos de presión y temperatura a los cuales está sometido el sistema y que a su vez, contrarreste el efecto corrosivo causado por la urea.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA CITADA

1. Vidalón J., (2003), Diseño y Cálculo de Tuberías de Servicio de la Línea # 5 de Envasado Para la Empresa Cervecería Regional, Trabajo de grado publicado, Universidad Metropolitana, Caracas.
2. Sánchez A., (2007), Estudio de Flexibilidad del Sistema de Tuberías de Descarga de Suspensión de Bauxita Molida del Área 32 a 31 de CVG Bauxilum, Trabajo de grado publicado, Universidad de Oriente, Barcelona.
3. Aguado B., (2007), Rediseño del Sistema de Tuberías del Tanque 80x5 Perteneciente a la Refinería Puerto La Cruz para su Adecuación en el Manejo de Diesel del Mercado Local, Trabajo de grado publicado, Universidad de Oriente, Barcelona.
4. Petroquímica de Venezuela S.A., ¿Quiénes somos? [Publicación en línea], Consultado en: <http://www.pequiven.com>.
5. Superintendencia Pequiven – Complejo Petroquímico Morón, (2007), Urea, Súper Nitrógeno [Catalogo de productos].
6. Pequiven – Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, (2005), Manual de Operaciones del Muelle Petroquímico de Jose, Barcelona.
7. Saldarriaga J., (1998), Hidráulica de Tuberías, Colombia, Mc. Graw Hill.
8. Potter M. y Wiggert D., (2002), Mecánica de Fluidos, Tercera Edición, México, International Thomson Editores S.A.
9. División de Ingeniería de CRANE y Reza C., Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías, México, Mc. Graw Hill.
10. Vernnard J. y Street R. (1985), Elementos de Mecánica de Fluidos, México, CECSA.
11. Flexilatina de Venezuela C.A., (2006), Análisis Estático de Tensiones en Tuberías – Flexibilidad, Caracas, PDVSA.

12. Centro de Investigación, Educación y Desarrollo, C.I.E.D., (1995), Diseño de tuberías – Modulo II, Caracas, PDVSA.
13. Mitchell L. y Shigley J., (1990), Manual de Diseño Mecánico, México, Mc Graw Hill.
14. Inelectra, (1998), Manual de Flexibilidad y Soportaría, Caracas, Inelectra.
15. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Zaragoza, (2000), Introducción a las Técnicas de Simulación, España.
16. SIMSCI-ESSCOR, (2005), Guía de Usuario – PIPEPHASE 9.0, USA, Invensys Systems, Inc.
17. COADE, Engineering software, (2007), CAESAR II [Publicación en línea], Consultado en: <http://www.software-gg.com>.
18. Megyesy E. (1995), Manual de Recipientes a Presión, Mexico, Limusa S.A.

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

- ✓ Arias F., (2006), El Proyecto de Investigación, Introducción a la metodología científica, Quinta Edición, Caracas, Episteme C.A.
- ✓ Gotera E., Una Guía para el Diseño de Tuberías [Documento en línea], Consultado en: <http://www.monografias.com>
- ✓ Norma PDVSA N° 90616.1.024, Dimensionamiento de tuberías de procesos.
- ✓ Norma PDVSA N° H-221, Materiales de tuberías.
- ✓ Norma PDVSA N° HG-251, Criterios de diseño de soportes para tuberías.
- ✓ Norma PDVSA N° L-TP 1.5, Cálculo hidráulico de tuberías.
- ✓ Norma PDVSA N° MDP-02-FF-02, Flujo de Fluidos. Principios Básicos.
- ✓ Rosales R., (1998), Manual del Ingeniero de Planta, Segunda Edición, México, Mc Graw Hill.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	DISEÑO DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE UREA EN EL MUELLE PETROQUÍMICO DE PEQUIVEN JOSE
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
HERNÁNDEZ S. MANUEL E.	CVLAC: 17.734.851 E MAIL: manuelehernandezs@gamil.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

RED DE TUBERÍAS
UREA
MUELLE PETROQUÍMICO
PIPEPHASE
CAESAR II
DISEÑO HIDRÁULICO
DISEÑO MECÁNICO

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS	DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

RESUMEN (ABSTRACT):

En el siguiente trabajo se desarrolla el diseño de un sistema de limpieza para el sistema de transporte de urea del muelle petroquímico de Jose, el cual esta formado por una red de tuberías que opera con agua y aire alternativamente, que garantiza el cumplimiento de los requerimientos básicos para la limpieza de dicho sistema y una mejor calidad en el servicio de estibado de urea en los buques. En primer lugar se describe el contexto operacional del sistema de transporte en estudio, para plantear distintas alternativas del ruteo de tuberías del sistema de limpieza. Posteriormente se dimensionan cada una de las propuestas, y se realiza un análisis hidráulico de cada una que permitió seleccionar como mejor alternativa a la propuesta N° 3, la cual operara a razón de 3554,36 L/min de agua y 1381,32 L/min de aire. Seguidamente se estudian los niveles de esfuerzos permisibles en la red de tuberías a través del simulador Caesar II 5.1, los cuales permitieron constatar que el esfuerzo máximo se encuentra 37% por debajo del valor máximo permisible. Esta verificación dio cabida a la realización de los planos y redacción del presente trabajo donde se incluye la documentación referente al tema, los elementos seleccionados para la red de tuberías, diagramas, manuales y cálculos necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
GONZÁLEZ YORDY	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
SÁNCHEZ ROBIN	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
BITTAR SIMÓN	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
RODRÍGUEZ EDGAR	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	06	10
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.DISEÑO DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE UREA DEL MUELLE DE PEQUIVEN-JOSE. doc	application/ ms word

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P
Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5
6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Muelle Petroquímico de Pequiven - Jose (OPCIONAL)

TEMPORAL: 8 meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO MECÁNICO

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PREGRADO

ÁREA DE ESTUDIO:

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE. NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

DE ACUERDO CON EL ARTICULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE: "LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD Y SOLO PODRÁN SER UTILIZADOS POR OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO".

Hernández S. Manuel E.

AUTOR

González Yordy

TUTOR

Bittar Simón

JURADO

Rodríguez Edgar

JURADO

Delia Villarroel

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS