

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO**



**“EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE FLUJO,
PARA EL DISEÑO DE LAS TUBERÍAS DE RECOLECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE
LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN, PARA SU INCORPORACIÓN EN EL NUEVO
SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE PDVSA EYP ORIENTE”**

**Realizado por:
Carmeli Carolina García Serrano**

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial
para optar al Título de **INGENIERO DE PETRÓLEO****

Puerto La Cruz, marzo de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO**



**“EVALUCIÓN DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE FLUJO,
PARA EL DISEÑO DE LAS TUBERÍAS DE RECOLECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE
LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN, PARA SU INCORPORACIÓN EN EL NUEVO
SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE PDVSA EYP ORIENTE”**

ASESORES

Ing. Petróleo Lorenzo Arditi
Asesor Académico

Ing. Mtto. Mecánico Wilmer Moreno
Asesor Industrial

Puerto La Cruz, marzo de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO**



**“EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE FLUJO,
PARA EL DISEÑO DE LAS TUBERÍAS DE RECOLECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE
LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN, PARA SU INCORPORACIÓN EN EL NUEVO
SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE PDVSA EYP ORIENTE”**

JURADO CALIFICADOR

Ing. Petróleo Lorenzo Arditi
Asesor Académico

Ing. Mecánico Rafael Barrueta
Jurado Principal

Ing. Petróleo José Rodríguez
Jurado Principal

Puerto La Cruz, marzo de 2011

RESOLUCIÓN

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO:

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE LA EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, EL CUAL LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”

DEDICATORIA

- ✚ A mi madre, Sulay Serrano, por todo el esfuerzo y apoyo en pro del logro de mis metas, gracias por estar allí cuando más la necesité. ¡te amo Mamina!
- ✚ A mi padre, Carmelo García, por apoyarme y demostrarme lo importante que soy para él, ¡te amo pa!
- ✚ A mi abuela, Nora Almería, gracias por brindarme toda tu alegría y todo tu apoyo.
- ✚ A mi hermana, Zulay García, por tus consejos y todo su amor, ¡te amo zupu!
- ✚ A mis tíos, por creer en mí y apoyarme en todo momento.
- ✚ A mis primos, sigan adelante y cumplan todas sus metas, cuentan conmigo.
- ✚ A mi novio, Ridel López, gracias por ser mi respaldo incondicional y brindarme todo tu amor.. ¡te amo prin!
- ✚ A mi amigo Miguel Ramírez, porque sé que en el cielo debes estar contento por este logro.

AGRADECIMIENTOS

- ✚ A Jehová Dios por estar siempre a mi lado y por hacer posible este logro. Gracias por escucharme mi Dios.

- ✚ A mis padres y hermana por todo su apoyo a lo largo de mi carrera. ¡Los amo!.
- ✚ A mi abuela por su amor y su atención, gracias abuelita linda.
- ✚ A mi novio, Ridel López, por tu apoyo en el logro de esta meta, estaré siempre agradecida. Gracias prin. ¡Te amo!.
- ✚ A la **Universidad de Oriente** y todos los profesores que a lo largo de mi carrera me ayudaron a formarme como una profesional. Muchas gracias.
- ✚ A la Empresa **"Petróleos de Venezuela S.A"** por contribuir en la culminación de mi carrera permitiéndome realizar mi tesis de grado en sus instalaciones.
- ✚ A mi asesor Industrial, Ing. Wilmer Moreno, por su valiosa colaboración y por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo de grado en las instalaciones de PDVSA EYP Oriente.
- ✚ Al profesor Daniel Suarez, por su valiosa colaboración. Muchas gracias Profesor.
- ✚ A mi Asesor Académico, Lorenzo Arditi, por dedicar parte su valioso tiempo en orientarme en el desarrollo de este trabajo de grado. Muchas gracias Profesor.
- ✚ Al ingeniero Juan Roque, por su incondicional disposición en ayudarme.
- ✚ A la Ingeniera Zuney Chivico, por todo su apoyo y por prestarme toda su colaboración cuando la necesite. Muchas Gracias.
- ✚ A la Ingeniera Wandina Marín, gracias por sus buenos consejos y por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo de grado en la Gerencia de PPYG.
- ✚ A la Ingeniera Aneida Ortiz, por todo lo que me enseñó, ayudándome a crecer profesionalmente, se lo agradezco mucho.
- ✚ Al ingeniero Joe Romero, por toda su atención y tiempo que me dedico enseñándome la simulación de redes de fluidos.
- ✚ A mi amiga Ana Oliveros, por brindarme su amistad y confianza. Te quiero manis.
- ✚ A todo el equipo de PPYG porque de ustedes he aprendido mucho y me ayudaron a crecer como profesional.
- ✚ A Mis amigos: Johana Aparicio, Ricardo Vásquez, Maricruz Bastardo, Kimberly Digiannatalle, Rene Morao, Luis Carlos Rattia, Carlos Arraiz, Corelis Mundarain, Malena Noriega, Andreina Vegas, Alejandro Lárez, Eliemar Morillo. Muchas gracias.
- ✚ Gracias a todas aquellas personas que de una u otra forma forman parte de este logro. Muchas Gracias.

RESUMEN

Este trabajo de grado consiste en brindar un aporte en cuanto al estudio de metodologías que ayudan a conocer las condiciones operacionales que se presentan en los sistemas de flujo de fluidos, con el objeto de su evaluación para su incorporación como base de cálculo en el nuevo sistema de planificación. Con la aplicación de la ecuación general de la energía en la Estación de Flujo Orocual 1 se pudo determinar que para transportar 50 MBD de petróleo por una línea de succión de 12 pulgadas y 30 metros de largo y una línea de descarga de 8 pulgadas y 200 metros de largo se requiere una bomba con una potencia de 36,4724 HP, dicha potencia resultó ser menor a la requerida en caso de usar un diámetro de descarga de 6 pulgadas. También se establecen procedimientos para calcular el caudal máximo permitido en una tubería de dicha estación, en donde se obtuvo un caudal máximo de 81,8420 MBD para una tubería de descarga de 8 pulgadas y 200 metros de largo, comprobándolo luego con el método computacional, el cual arroja un caudal máximo permitido muy cercano. Se estudia también el método iterativo para calcular el tamaño mínimo de tubería en la Estación de Flujo Orocual 1 para transportar 81,6246 MBD de petróleo en 200 metros de tubería, obteniendo una tubería de 8 pulgadas, este resultado fue corroborado por un método computacional. Se aplica la metodología de Hardy-Cross para una red de flujo de fluidos del Patio de Tanques Orocual en la que, a partir de un algoritmo de cálculo basado en sustituciones sucesivas de niveles de energía, logra alcanzar la solución. Con la determinación del nivel de energía en cada nodo se conocen las presiones en los nodos. Los resultados obtenidos mediante el método de Hardy-Cross fueron comparados con los arrojados mediante la aplicación de la ecuación general de la energía y con el simulador PIPEPHASE, obteniendo resultados similares. Con esto se puede afirmar que la técnica Hardy-Cross sirve como herramienta para la representación de cualquier estructura de una red de una manera sencilla en la memoria del computador.

| | CONTENIDO |
|--|------------------|
| | pág. |
| Página de título | I |
| RESOLUCIÓN | IV |
| DEDICATORIA | V |
| RESUMEN | VII |
| LISTA DE TABLAS | XI |
| LISTA DE FIGURAS | XIII |
| CAPÍTULO I | XV |
| INTRODUCCIÓN | XV |
| 1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA EMPRESA | XV |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 16 |
| 1.3 OBJETIVOS | 18 |
| CAPÍTULO II | 19 |
| MARCO TEÓRICO | 19 |
| 2.1 Antecedentes | 19 |
| 2.2 Producción de Hidrocarburos | 20 |
| 2.3 Disposición del Crudo | 20 |
| 2.4 Disposición del Gas | 20 |
| 2.5 Disposición del Agua | 20 |
| 2.6 Facilidades de Superficie | 21 |
| 2.7 Fluidos | 21 |
| 2.8 Rapidez de Flujo de Fluido | 24 |
| 2.9 Variables de Flujo | 25 |
| 2.10 Ecuación de Continuidad | 25 |
| 2.11 Conservación de la Energía- Ecuación de Bernoulli | 26 |
| 2.11.1 Restricciones a la Ecuación de Bernoulli | 30 |
| 2.11.2 Simplificación de la Ecuación de Energía | 31 |
| 2.12 Dispositivo Mecánico | 31 |
| 2.13 Fricción de Fluido | 31 |
| 2.14 Ecuación General de la Energía | 31 |
| 2.14.1 Pérdidas de Energía Debido a la Fricción | 33 |
| 2.15 Número de Reynolds | 33 |
| 2.16 Perfiles de Velocidad | 35 |
| 2.17 Ecuaciones para el Factor de Fricción | 35 |
| 2.18 Pérdidas Menores, Accesorios y Válvulas | 36 |
| 2.19 Sistemas de Línea de Tubería en Serie | 38 |
| 2.20 Conductos y Tuberías Comercialmente Disponibles | 38 |
| 2.20.1 Conducto de Acero | 39 |

| | |
|--|----|
| 2.20.2 Tubos de Acero | 39 |
| 2.20.3 Tubos de Cobre | 39 |
| 2.20.4 Conductos de Hierro Dúctil | 39 |
| 2.20.5 Otros Tipos de Conductos y Tuberías | 39 |
| 2.21 Velocidad de Erosión | 39 |
| 2.21.1 Velocidad de Flujo Recomendada en Tuberías | 40 |
| 2.22 Componentes de Superficie Utilizados en el Proceso de Producción de Hidrocarburos | 41 |
| 2.23 Restricciones (Cuellos de Botella) | 55 |
| 2.24 Redes de Tuberías | 55 |
| 2.24.1 Estructura de una Red de Tuberías | 56 |
| 2.24.2 Topología de una Red | 57 |
| 2.24.3 Incidencia Nodo-Tubería | 59 |
| 2.25 Ecuación de Balance de Energía Mecánica | 60 |
| 2.26 Formulación Nodal | 61 |
| 2.26.1 Generación del Sistema de Ecuaciones Basado en la Formulación Nodal | 63 |
| 2.27 Metodología de Newton | 67 |
| 2.28 Metodología de Sustituciones Sucesivas (Hardy-Cross). | 68 |
| 2.29 Planificación | 69 |
| 2.29.1 Ciclo de Planificación | 69 |
| 2.30 Simulador PIPEPHASE | 71 |
| | |
| CAPÍTULO III | 72 |
| | |
| DESARROLLO DEL TRABAJO | 72 |
| 3.1 EMPLEO DE LA ECUACIÓN DE ENERGÍA PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS DE TUBERÍA EN SERIE. | 72 |
| 3.1.1 Aplicación de la Ecuación General de la Energía para el Cálculo de la Energía Adicionada a una Bomba. | 72 |
| 3.2 PRESENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD Y CAUDAL DE FLUJO PERMITIDO EN UNA TUBERÍA. | 77 |
| 3.2.1 Aplicación del Procedimiento Iterativo para la Determinación de la Velocidad y Caudal Permitido en una Tubería. | 78 |
| 3.2.2 Método Computacional | 81 |
| 3.2.3 Aplicación del Método Computacional para el Cálculo del Máximo Caudal Permisible en una Tubería. | 81 |
| 3.3 ANÁLISIS DE UNA TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO ADECUADO DE TUBERÍA QUE CUMPLA CON LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA. | 82 |
| 3.3.1 Aplicación de la Técnica para la Determinación del Tamaño Adecuado de Tubería que Cumpla con los Requerimientos del Sistema. | 83 |
| 3.3.2 Método Computacional para la Determinación del Diámetro de Tubería | 86 |
| 3.3.3 Aplicación del Método Computacional para la Determinación del Diámetro de Tubería | 86 |
| 3.4 DEFINICIÓN DEL MÉTODO HARDY-CROSS PARA EL ANÁLISIS | |

| | |
|---|--------------------------------------|
| Y SIMULACIÓN DE REDES DE FLUIDO. | 87 |
| 3.4.1 Aplicación del Método Hardy-Cross para una Red de Agua | 88 |
| 3.5 COMPARACIÓN DE LA TÉCNICA HARDY-CROSS CON LA ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA Y EL SIMULADOR PIPEPHASE. | 97 |
| CAPÍTULO IV | 101 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS, | 101 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 101 |
| 4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 101 |
| 4.1.1 Empleo de la Ecuación General de la Energía para el Estudio de Sistemas de Tubería en Serie. | 101 |
| 4.1.2 Presentación de un Procedimiento de Solución para el Cálculo de la Velocidad y Caudal de Flujo Permitido en una Tubería. | 102 |
| 4.1.3 Análisis de una Técnica para la Determinación del Tamaño Adecuado de Tubería que Cumpla con los Requerimientos del Sistema. | 103 |
| 4.1.4 Definición del Método Hardy-Cross para el Análisis y Simulación de Redes de Fluído. | 104 |
| 4.1.5 Comparación de la Técnica Hardy-Cross con la Ecuación General de la Energía y el Simulador PIPEPHASE. | 105 |
| 4.2 CONCLUSIONES | 109 |
| 4.3 RECOMENDACIONES | 110 |
| BIBLIOGRAFÍA | 111 |
| ANEXOS | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| ANEXO A | ¡Error! Marcador no definido. |
| Tablas de Velocidades Típicas de Líquidos en Tuberías de Acero (Kern), Bases de Diseño para Líneas Normales de Acero al Carbono y Propiedades de Diseño de Tuberías | ¡Error! Marcador no definido. |
| ANEXO B | ¡Error! Marcador no definido. |
| Figuras del Diagrama de Moody y Rugosidad Relativa de los Materiales de las Tuberías | ¡Error! Marcador no definido. |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 2.1 Velocidades de Flujo Recomendadas en Sistemas de Potencia de Fluido | 40 |
| Tabla 3.1 Caudales que Circulan por los Nodos y Tuberías | 90 |
| Tabla 3.2 Parámetros Dimensionales y Adimensionales de las Tuberías que Conforman la Red | 92 |
| Tabla 3.3 Cálculo de la Energía en el Nodo 4 Mediante la Técnica Hardy- Cross | 95 |
| Tabla 3.4 Cálculo de la Energía en el Nodo 6 Mediante la Técnica Hardy- Cross | 95 |
| Tabla 3.5 Cálculo de la Energía en el Nodo 5 Mediante la Técnica Hardy- Cross | 95 |
| Tabla 3.6 Cálculo de la Energía en el Nodo 2 Mediante la Técnica Hardy- Cross | 96 |
| Tabla 3.7 Cálculo de la Energía en el Nodo 3 Mediante la Técnica Hardy- Cross | 96 |
| Tabla 3.8 Cálculo de la Energía en el Nodo 1 Mediante la Técnica Hardy- Cross | 96 |
| Tabla 3.9 Niveles de Energía y de Presión en Cada Codo (Hardy-Cross) | 97 |
| Tabla 3.10 Pérdidas de Energía por Fricción en cada Tubería | 99 |
| Tabla 3.11 Niveles de Energía y de Presión en cada Nodo | 99 |
| Tabla 3.12 Comparación de las Técnicas Hardy-Cross y la Ecuación General de la Energía | 99 |
| Tabla 3.13 Niveles de Presión en cada Nodo (PIPEPHASE) | 99 |
| Tabla 3.14 Comparación de las Técnicas Hardy-Cross, Ecuación General de la Energía y el Simulador PIPEPHASE | 100 |
| Tabla 4.1 Comparación de Resultados para Diferentes Diámetros de Descarga | 101 |
| Tabla 4.2 Resultados del Método Iterativo para el Cálculo de Velocidad y Caudal | 102 |
| Tabla 4.3 Resultados del Método Iterativo para el Cálculo del Tamaño de Tubería | 103 |
| Tabla 4.4 Niveles de Energía en cada Nodo (Hardy- Cross) | 104 |
| Tabla 4.5 Niveles de Presión en cada Nodo (Hardy- Cross) | 105 |
| Tabla 4.6 Niveles de Energía cada Nodo | 106 |
| Tabla 4.7 Niveles de Presión en cada Nodo | 106 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| Tabla 4.8 Comparación de las Técnicas Hardy- Cross y la Ecuación General de la Energía | 106 |
| Tabla 4.9 Niveles de Presión en cada Nodo (PIPEPHASE) | 107 |
| Tabla 4.10 Comparación de las Técnicas Hardy-Cross, Ecuación General de la Energía y el Simulador PIPEPHASE | 107 |
| Tabla A.1 Velocidades Típicas de Líquidos en Tuberías de Acero (Kern) | ¡ERROR! |
| MARCADOR NO DEFINIDO. | |
| Tabla A.2 Bases de Diseño para Líneas Normales de Acero al Carbono | ¡ERROR! |
| MARCADOR NO DEFINIDO. | |
| Tabla A.3 Propiedades de Diseño de Tuberías | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|------|
| Figura 1.1 Ubicación Geográfica de la División Oriente | 15 |
| Figura 2.1 Parte de un Sistema de Distribución de Fluido | 25 |
| Figura 2.2 Elemento de Fluido en un Conducto | 26 |
| Figura 2.3 Energía de Flujo | 28 |
| Figura 2.4 Elementos de Fluido utilizados en la Ecuación de Bernoulli | 28 |
| Figura 2.5 Cabeza de Presión, Cabeza de Elevación, Cabeza de Velocidad y Cabeza Total | 30 |
| Figura 2.6 Sistema de flujo de Fluido que ilustra la Ecuación General de la Energía | 32 |
| Figura 2.7 Perfiles de Velocidad para Flujos en Conductos | 35 |
| Figura 2.8 Cabezales de Pozo | 41 |
| Figura 2.9 Líneas de Flujo | 42 |
| Figura 2.10 Estación de Flujo Santa Bárbara Distrito Norte, estado Monagas | 44 |
| Figura 2.11 Múltiple de Producción | 44 |
| Figura 2.12 Instalaciones de Separadores y Etapas de Separación de acuerdo a la Magnitud de la Presión y al Volumen de Gas que deba Manejarse | 45 |
| Figura 2.13 Separador Gas- Líquido (Horizontal) | 46 |
| Figura 2.14 Separador Gas- Líquido (Vertical) | 46 |
| Figura 2.15 Depuradores | 48 |
| Figura 2.16 Tipos de Compresores para Procesos Químicos | 50 |
| Figura 2.17 Tanque de Lavado | 52 |
| Figura 2.18 Tanques de Almacenamiento del Crudo | 54 |
| Figura 2.19 Diagrama de Flujo de una Planta de Inyección de Agua | 54 |
| Figura 2.20 Red Abierta | 55 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 2.21 Red Cerrada | 55 |
| Figura 2.22 Red Mixta | 56 |
| Figura 2.23 Red de Tuberías | 57 |
| Figura 2.24 Grafo de una Red de Tuberías | 58 |
| Figura 2.25 Nodo de Referencia en un Grafo de una Red de Tuberías | 59 |
| Figura 2.26 Sistema de Flujo de Fluido | 60 |
| Figura 2.27 Red Cerrada de Tuberías | 62 |
| Figura 2.28 Red Cerrada de Tuberías | 63 |
| Figura 3.1 Sistema de Flujo de Fluido en la Estación de Flujo Orocual 1 | 73 |
| Figura 3.2 Puntos de Referencia para el Sistema de Flujo en la Estación de Flujo Orocual 1 | 78 |
| Figura 3.3 Red Abierta de Tuberías de Petróleo en el Patio de Tanques Orocual | 88 |
| Figura 3.4 Identificación de Nodos y Tuberías en el Sistema | 89 |
| Figura B.1 Diagrama de Moody | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| Figura B.2 Determinación del Factor de Fricción | 128 |
| Figura B.3. Rugosidad Relativa de los Materiales de las Tuberías | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| Figura B.4 Resultados de la Simulación con PIPEPHASE | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA EMPRESA

La División Oriente está ubicada en el eje poblacional de Orocuál, La Toscana, Jusepín, Carito, Pirital y parte del municipio Libertad en el estado Anzoátegui. El área operacional es de 2.675 km². Está conformada por dos Distritos Operacionales: El Furrial y Punta de Mata en los estados Anzoátegui y Monagas (**Figura 1.1**) y cinco Unidades de Producción, Carito, Pirital, El Furrial, Jusepín y Orocuál. La División Oriente tuvo una producción promedio para el año 2010 de 867,2 MBD de crudo y 3.770,7 MMPCND de gas. El Distrito Punta de Mata produjo 425,1 MBD de crudo y 2.787,2 MMPCND de gas. El Distrito El Furrial produjo 442,1 MBD de crudo y 983,5 MMPCND de gas. La División tiene su sede administrativa en la ciudad de Maturín, estado Monagas. ^[1]

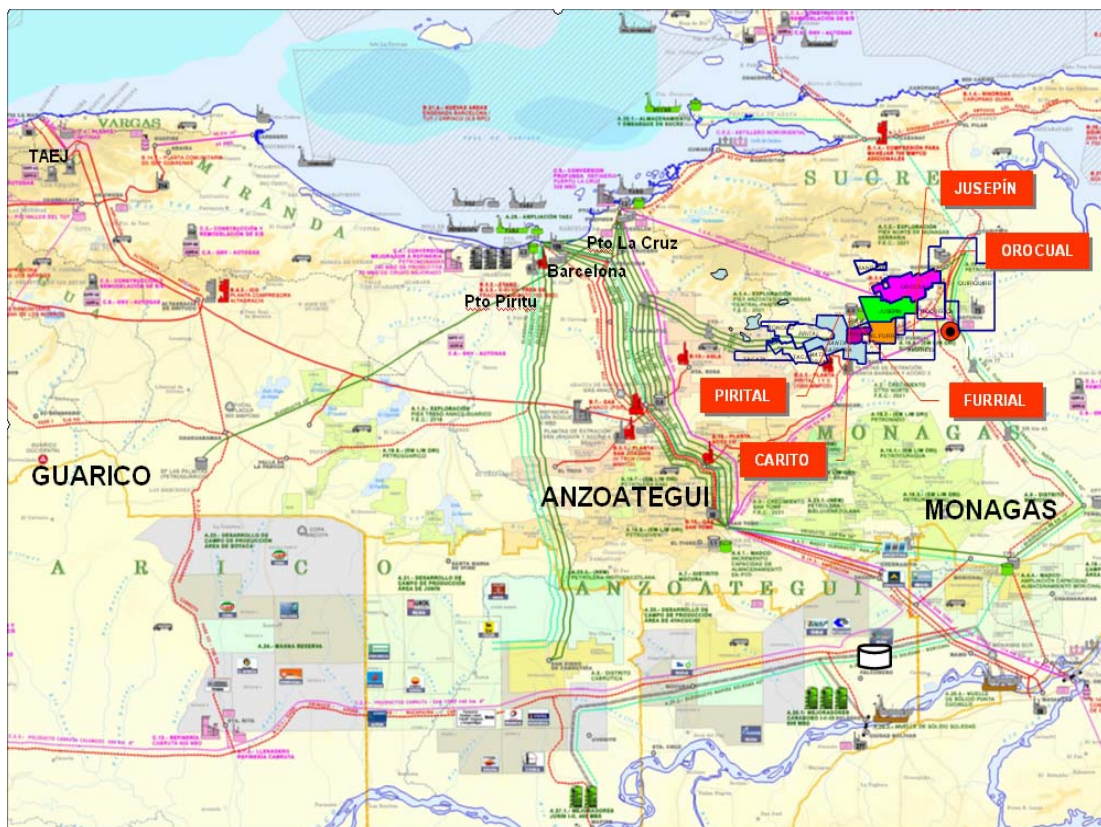


Figura 1.1 Ubicación Geográfica de la División Oriente^[1]



1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima, (PDVSA), es una empresa estatal, propiedad de la República Bolivariana de Venezuela, adscrita al Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo (MPPEP) y creada el 1 de enero de 1976. Petróleos de Venezuela S.A., se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos, de manera eficiente, rentable, segura, transparente y comprometida con la protección ambiental. Con la nacionalización de la industria petrolera en el año 1975, el Estado Venezolano, se reserva, por razones de conveniencia nacional, todo lo relacionado a la exploración y producción para el desarrollo del país en busca de petróleo y gas, asfalto y otros hidrocarburos; manufactura o refinación; transporte por vías especiales y almacenamiento; comercio interior y exterior, y obras que su manejo requiera.

PDVSA en su ciclo de planificación, cuenta con una Base de Recursos (BR), un Portafolio de Oportunidades a 20 años (PDO) y un Plan de Negocio a 6 años (PDN), aplicable a cada una de sus unidades de producción de yacimiento. El PDO comprende una gama de posibilidades técnico-económicas tanto para el desarrollo sostenido de reservas como para determinar la rentabilidad de un proyecto. Así mismo, comprende un conjunto de proyectos de generación de potencial con un compendio de oportunidades relacionadas con la exploración y explotación de un área específica, que incluyen recursos e inversiones necesarias para drenar las reservas de hidrocarburos de manera racional, es a través de estos proyectos que las unidades de producción compiten por la obtención de recursos financieros para sus planes de desarrollo.

Uno de los aspectos fundamentales que interviene en la explotación comercial de hidrocarburos es, sin duda, el sistema de producción; entendiendo como tal, el sistema de transporte de hidrocarburos desde el pozo hasta la estación recolectora, incluyendo los procesos de separación de sus fases: petróleo, gas y agua y el tratamiento y preparación de estos fluidos para su posterior comercialización, disposición o reinyección en el subsuelo. Los principales elementos mecánicos asociados a un sistema de producción son: pozos, líneas de flujo, múltiples de producción, separadores, equipos de tratamiento, instrumentos de medición, y tanques de almacenamiento. Teniendo en cuenta la interacción existente entre todos y cada uno de dichos elementos, cualquier cambio o alteración de las condiciones de flujo en alguno de ellos afectará en mayor o menor grado las condiciones de flujo de los restantes.

Los procedimientos de planificación, consisten en la evaluación de los planes de explotación para cada una de las unidades del negocio de producción (cartera de oportunidades), iniciando el proceso con una revisión y clasificación de las reservas, definición de los perfiles de producción de crudo, agua y gas sobre la base de métodos de perforación y/o producción conocidos, nuevas tecnologías o emergentes. Confrontando dichos perfiles, con las facilidades de producción existentes, se pueden detectar necesidades de infraestructura adicional o la optimización de su uso. El objetivo de todo el proceso de investigación, es estimar a nivel de Visualización de Proyecto, la infraestructura de



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

producción requerida en el PDO, esta Visualización dentro de un mapa de proceso, corresponde a la primera fase del mismo y es donde se identifican los objetivos y propósitos del proyecto a nivel macro para verificar su alineación con las estrategias corporativas y su desarrollo preliminar. Luego de esta fase inicial continúa el mapa de proceso con las siguientes etapas: Conceptualizar, Definir, Implantar y Operar.

Actualmente los ejercicios de planificación para la generación del PDO y PDN, requieren optimizarse con una arquitectura de información dinámica y flexible, que realmente soporte y responda a la integración de todos los procesos de la cadena de valor involucrados en el ciclo de Planificación del Negocio de Exploración y Producción (EyP), tales como: recursos de hidrocarburos, desarrollo de subsuelo, infraestructura, redes de manejo de fluidos de superficie incluyendo los procesos de recolección, manejo y disposición; presupuesto, gestión operacional, social y financiera, análisis y evaluación de oportunidades, control, retroalimentación y valorización de activos. Debido a estas necesidades, la Gerencia de Planificación, Presupuesto y Gestión (PPyG), en conjunto con la Gerencia de Automatización, Informática y Telecomunicaciones (AIT), están desarrollando un sistema integral de planificación en ambiente Web bajo la filosofía de software libre, que permita disponer de una base de datos integrada y homologada en el ejercicio del PDO y PDN de Producción Oriente, a nivel subsuelo-superficie, con el objeto de disponer de un Plan Maestro que garantice el cumplimiento de las metas de producción contempladas en el Plan de Negocio.

Es por ello, que este trabajo permitirá la creación de una metodología que pueda ser incorporada al nuevo sistema de planificación, para el procesamiento relacionado a las facilidades de superficie con el objeto de evaluar, mediante una base de cálculos, los posibles requerimientos presentados a largo plazo, en cuanto a las consideraciones en el diseño de los sistemas de tuberías utilizados para transportar un fluido, entre ellos se tienen: la naturaleza y cantidad del fluido a ser transportado, material de las tuberías, la distancia entre los extremos de las tuberías, el perfil del terreno, entre otros, ofreciendo la posibilidad de dar respuesta oportuna a los requerimientos de infraestructura para el manejo de los fluidos producidos (petróleo, gas y agua). Los procedimientos metodológicos estudiados serán aplicados en la Estación de Flujo Orocuál 1 y en el Patio de Tanques Orocuál. Esta herramienta permitirá contar con una metodología de cálculo en el proceso de análisis y diseño de sistemas de recolección y distribución en vista que es necesario seleccionar la mejor opción desde el punto de vista hidráulico y económico.



1.3 OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar metodologías de análisis de sistemas de flujo, para el diseño de las tuberías de recolección y distribución de los fluidos de producción, para su incorporación en el nuevo sistema de planificación de PDVSA EyP Oriente.

Objetivos Específicos

1. Emplear la ecuación general de la energía para el estudio de sistemas de tubería en serie.
2. Presentar un procedimiento de solución para el cálculo de la velocidad y caudal de flujo permitido en una tubería.
3. Analizar una técnica para la determinación del tamaño adecuado de tubería que cumpla con los requerimientos del sistema.
4. Definir el método Hardy-Cross para el análisis y simulación de redes de fluido.
5. Comparación de la técnica Hardy-Cross con la ecuación general de la energía y el simulador PIPEPHASE.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

- En 1998. Velásquez C., realizó un análisis del sistema de manejo de crudo en Oriente, en donde decidió adoptar la herramienta **Sc FloMatic™** como sistema de planificación diseñada por Sistemas Cadmatic C.A., que mediante la resolución de las ecuaciones de continuidad, momentum y energía, además de las correlaciones utilizadas para el flujo, caída de presión y propiedades del gas permite brindar apoyo al ingeniero de planificación en las actividades relacionadas con la estimación de la nueva infraestructura requerida para manejar, en forma satisfactoria, la producción pronosticada a corto, mediano y largo plazo. ^[2]
- En 2007. García M., realizó un estudio integrado de la infraestructura existente en cuanto a oleoductos troncales, patios de tanques y terminales de almacenamiento y embarque en función de la producción, encontrándose que algunas de estas instalaciones no soportan un aumento de producción, pues superan los límites establecidos para operar con seguridad. Posteriormente, se establecieron posibles opciones de operación y distribución del crudo, mediante la simulación de las redes hidráulicas del sistema. ^[3]
- En 2007. Gómez A., evaluó la infraestructura del sistema de separación de fluidos, en los niveles de separación de 65 y 600 lpc/a de producción general en la Estación de Flujo Orocual EF-ORC-04 del Campo Orocual, con la finalidad de obtener la distribución de los fluidos desde los respectivos múltiples y la capacidad volumétrica con la que cuenta esta estación con la ayuda de los simuladores PIPEFHASE 8.1 y PROII 6.0. Se determinaron las caídas de presiones y la velocidad de la mezcla, llevando a cabo sensibilidades con cambios de diámetro en los que presentaron problemas de altas caídas de presión y velocidad de la mezcla, proponiendo un sistema mejorado para las condiciones de operación en la red de tuberías que permita aumentar la capacidad de la estación para el transporte de los fluidos. ^[4]



2.2 Producción de Hidrocarburos

La cantidad de petróleo existente en un yacimiento depende del espesor de la roca productora, de la porosidad y el porcentaje de saturación de las rocas del yacimiento, sin embargo la parte que se puede extraer de todo el petróleo existente depende de la permeabilidad, de la presión de la formación y los métodos empleados para mantenerla, del espaciado de los pozos, del diámetro de la tubería de producción y en fin, del método de explotación empleado. Otros factores como el costo de producción y el precio de venta del petróleo y el gas, llegan a influir directamente en la recuperación final, puesto que son tomados en cuenta en la determinación de la tasa de utilidad mínima de recuperación.

El proceso de producción de un campo consiste en llevar el fluido generado en el yacimiento por cada uno de los pozos y a través de tuberías individuales, hasta la estación recolectora correspondiente; aquí se involucran una serie de operaciones realizadas mediante diversos equipos que separan el fluido extraído, el cual está compuesto básicamente por una mezcla de petróleo y gas, pudiendo mostrar la presencia de agua y sedimentos.^[5]

2.3 Disposición del Crudo

Diariamente los pozos productores fluyen o bombean sus respectivas cuotas de producción a sus correspondientes estaciones de flujo. Allí, luego de la separación y tratamiento adecuados, el crudo pasa a tanques de almacenamiento cuyo número y volumen son suficientes para recoger holgadamente la producción de varios días. También se mantiene un registro de los volúmenes de crudo recibidos, tratados, almacenados y despachados.

Los tanques utilizados para el almacenamiento son cilíndricos y su altura y diámetro están en función de su capacidad. Estaciones pequeñas bombean el crudo a estaciones de mayor capacidad de recolección y almacenamiento, que conectadas a oleoductos, despachan diariamente grandes volúmenes de crudo a los puertos de embarque o directamente a las refinerías.^[6]

2.4 Disposición del Gas

El gas producido con el petróleo, luego de separado y tratado preliminarmente, si fuese necesario, puede ser enviado a plantas especiales de tratamiento final para distribución por gasoductos a las plantas petroquímicas y refinerías; a ciudades para consumo en las industrias y servicios domésticos o también es usado por la misma industria petrolera en sus operaciones, como combustible o para ser reinyectado en los yacimientos para la restauración y/o mantenimiento de la presión y por ende, lograr un mayor porcentaje de extracción del petróleo en sitio.^[6]

2.5 Disposición del Agua

La cantidad de agua que acompaña al petróleo producido puede ser de características sencillas, cuya separación por asentamiento en tanques se logra fácilmente. En ocasiones, el manejo, tratamiento y disposición del agua no requiere de instalaciones especiales. Sin embargo, se dan situaciones en las que el volumen de agua producido diariamente es muy



alto. Las características del agua y del petróleo pueden facilitar emulsiones que requieren de tratamientos mecánico, químico, térmico o eléctrico para lograr la adecuada separación de los dos fluidos y obtener un crudo que corresponda a las especificaciones de calidad requeridas. La presencia de sal en asociación con el agua y el petróleo, es de ocurrencia natural en muchos estratos geológicos. De la concentración de sal en solución dependerá la selección del tratamiento que deba emplearse para despojar el petróleo de la sal que contiene. La sal es indeseable en el crudo por sus propiedades corrosivas y las implicaciones operacionales y económicas que ello significa para las refinerías.

El manejo y disposición del agua asociada con la producción de petróleo es una fase que a veces puede resultar muy compleja, especialmente si el volumen de agua es muy grande y si el agua es salada o salmuera. En ocasiones, una buena opción operacional y económica es inyectar el agua al yacimiento. Para mantener y estimular la producción de petróleo de los yacimientos se recurre a la inyección de agua mediante plantas de diseño específico.^[6]

2.6 Facilidades de Superficie

Se refiere a la infraestructura de superficie necesaria para manejar un volumen de crudo o gas. Algunos de sus elementos son: bombas de transferencia, compresores, tanques, separadores, entre otros.

El objetivo principal de las facilidades de superficie en las operaciones de producción consiste en separar los fluidos producidos a través de los pozos en sus tres componentes básicos: crudo, gas y agua. Esto se logra por medio de un grupo de instalaciones que facilitan en superficie el recibo, la separación, medición, tratamiento, almacenamiento y despacho de estos fluidos.^[5]

Para lograr dicho objetivo se debe cumplir con los siguientes parámetros:

- El crudo debe satisfacer las normas para su almacenamiento, comercialización, y refinación.
- El gas debe satisfacer las normas para su comercialización, procesamiento y posterior utilización.
- El agua debe tratarse con el fin de que su disposición, se haga de acuerdo con las normas vigentes de protección al ambiente.^[3]

2.7 Fluidos

Se llamará fluido a cualquier sustancia que se pueda hacer escurrir mediante una aplicación apropiada de fuerzas. En términos generales, se pueden clasificar en líquidos y gases. Los líquidos son prácticamente incompresibles, por lo que se puede considerar que su volumen es constante, aunque su forma puede variar. Los gases son altamente compresibles, por lo que no tienen un volumen característico, sencillamente se expanden hasta llenar cualquier recipiente en que se les coloque. Sus propiedades principales son: densidad, presión, volumen específico, peso específico y viscosidad.^[7]



❖ Densidad

Se define la densidad de un fluido, también llamada densidad absoluta, denotado por la letra griega ρ , como la cantidad de masa que hay en una unidad de volumen (**Ec. 2.1**):

$$\rho = m/V \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido, kg/m^3 .

m = masa, kg .

V = Volumen, m^3 .

La densidad del agua es la densidad clave para definir la densidad relativa de un fluido, ya que expresa la relación que existe entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua, resultando en una magnitud adimensional.^[7]

➤ Densidad del Petróleo

La densidad del petróleo se define como la razón entre la masa de una unidad de volumen de crudo a una determinada presión y temperatura, mientras que la gravedad específica del petróleo se define como la razón entre la densidad del petróleo y la densidad del agua, medidas a 60°F y a 1 atm de presión (**Ec. 2.2**):

$$\gamma_o = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La gravedad específica representa un número adimensional que relaciona las densidades de los fluidos a 60°F (condiciones estándar). A estas condiciones la densidad del agua puede ser considerada igual a 62,4 lbm/pies^3 , entonces se tiene la **ecuación 2.3**:

$$\gamma_o = \frac{\rho_o}{62,4} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Aunque la densidad y la gravedad específica del petróleo son variables comúnmente utilizadas en la industria petrolera, la gravedad API, término definido por el Instituto Americano del Petróleo, es preferida como escala de gravedad. Este parámetro fue definido para expresar la densidad de un fluido relativa al agua (**Ec. 2.4**). Como referencia se le asignó al agua una gravedad API equivalente a 10°.^[8]

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\gamma_o} - 131,5 \quad (\text{Ec. 2.4})$$



❖ Presión

La presión que se ejerce sobre un fluido de área A , que se denota por P , se define como la razón entre la fuerza ejercida y el área sobre el cual actúa (Ec. 2.5):¹⁷¹

$$P = F/A \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

P = Presión, N/m^2 .

F = Fuerza, N .

A = Área, m^2 .

❖ Volumen Específico (V_s)

Es el inverso de la densidad y se define como el volumen ocupado por la unidad de masa del fluido (Ec. 2.6):¹⁷¹

$$V_s = 1/\rho \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

V_s = Volumen específico, m^3/kg .

❖ Peso Específico (γ)

Es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia. Utilizando la letra griega γ (gamma) para denotar el peso específico (Ec. 2.7):¹⁷¹

$$\gamma = \omega/V \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

γ = Peso específico, N/m^3 (lb/pe^3).

ω = Peso, N (lb).

V = Volumen de una sustancia, m^3 (pe^3).

❖ Viscosidad

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal. En realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones. Existen dos tipos de viscosidad: viscosidad absoluta o dinámica, μ y viscosidad cinemática: es la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad de masa del fluido (Ec. 2.8):¹⁷¹

$$\nu = \mu / \rho \quad (\text{Ec. 2.8})$$



Donde:

μ = Viscosidad dinámica, N s/m² (dina s/cm² (poise)).

ν = Viscosidad cinemática, m²/s (cm²/s (stoke)).

2.8 Rapidez de Flujo de Fluido

La cantidad de flujo que fluye en un sistema por unidad de tiempo, se puede expresar mediante los tres términos que se definen a continuación.^[9]

A. Rapidez de Flujo de Volumen, Q

Es el volumen de flujo de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo. La rapidez de flujo de volumen, Q es el más importante de estos tres términos, que se calcula con la **ecuación 2.9**:^[9]

$$Q = A * V \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde

A= Área de la sección, m².

V= Velocidad promedio del flujo, m/s.

Q= Caudal o rapidez de flujo de volumen, m³/s. |

B. Rapidez de Flujo de Peso, W

Es el peso de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo. La rapidez de flujo de peso, W, está relacionada con Q mediante la **ecuación 2.10**:^[9]

$$W = \gamma * Q \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

γ = Peso específico del fluido, N/m³.

W=Rapidez de flujo de peso, N/s.

C. Rapidez de Flujo de Masa, M

Es la masa de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo. La rapidez de flujo de masa, M, está relacionado con Q mediante la **ecuación 2.11**:^[9]

$$M = \rho * Q \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido, kg/m³.

M = Rapidez de flujo de masa, kg/s.



2.9 Variables de Flujo

En el diseño o análisis de un sistema de tubería existen seis parámetros básicos involucrados:

1. Las pérdidas de energía del sistema.
2. La velocidad o caudal del fluido circulante por la tubería.
3. El diámetro de la tubería.
4. La longitud de la tubería.
5. La rugosidad de la pared de la tubería.
6. Las propiedades del fluido.^[8]

2.10 Ecuación de Continuidad

El método para calcular la velocidad de flujo de un fluido en un sistema de conductos cerrado, depende del principio de continuidad. Considere el tubo de la **Figura 2.1**. Un fluido fluye de la sección 1 a la sección 2 con una rapidez constante. Esto es, la cantidad de fluido que pasa por cualquier sección en un cierto tiempo dado es constante. En este caso se dice que se tiene un flujo constante.

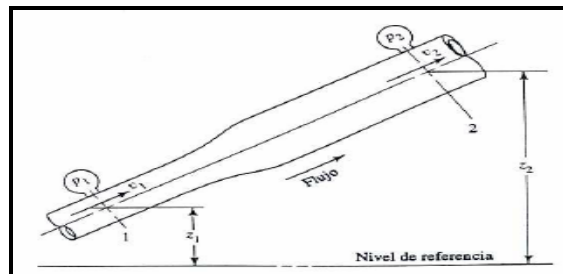


Figura 2.1 Parte de un Sistema de Distribución de Fluido^[9]

Ahora bien, si no se agrega fluido, se almacena o se retira entre la sección 1 y la sección 2, entonces la masa de fluido que pasa por la sección 2 en un tiempo dado, debe ser la misma que la que fluye por la sección 1, en el mismo tiempo. Lo anterior se puede expresar en términos de la rapidez de flujo de masa como muestra la **ecuación 2.12**:

$$M_1 = M_2 \quad (\text{Ec. 2.12})$$

O, puesto que $M = \rho AV$, se tiene la **ecuación 2.13**:

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2 \quad (\text{Ec. 2.13})$$

La **ecuación 2.13** es un planteamiento matemático del principio de continuidad y se le conoce como ecuación de continuidad. Se utiliza para relacionar la densidad del fluido, el



área de flujo y la velocidad de flujo en dos secciones de un sistema en el que existe un flujo estable. Es válida para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos.

Si el fluido que se encuentra en el tubo de la **Figura 2.1** es un líquido que puede ser considerado incompresible, entonces los términos ρ_1 y ρ_2 de la **ecuación 2.13** son iguales, quedando como muestra la **ecuación 2.14**:

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 \quad (\text{Ec. 2.14})$$

O, puesto que $Q=AV$, se tiene la **ecuación 2.15**:

$$Q_1 = Q_2 \quad (\text{Ec. 2.15})$$

La **ecuación 2.15** es la ecuación de continuidad aplicada a líquidos; establece que para un flujo estable, la rapidez de flujo de volumen es la misma en cualquier sección. También se le puede utilizar, con un error pequeño, para gases a baja velocidad, es decir, menor que 100 m/s.^[9]

2.11 Conservación de la Energía- Ecuación de Bernoulli

La energía no puede ser creada ni destruida, sino que puede ser transformada de un tipo a otro. Este es el enunciado de la ley de conservación de la energía.

Cuando se analizan problemas de flujo en conductos, existen tres formas de energía que siempre hay que tomar en consideración. Tomando en cuenta un elemento de fluido, como el que se muestra en la **Figura 2.2**, que puede estar dentro de un conducto de un sistema de flujo. Puede estar localizado a una cierta elevación z , tener una cierta velocidad v y una presión p .^[9]

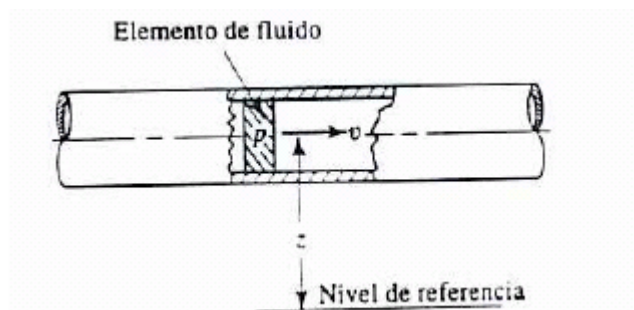


Figura 2.2 Elemento de Fluido en un Conducto^[9]

El elemento de fluido tendrá las siguientes formas de energía:

1) Energía Potencial

Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es (**Ec. 2.16**):^[9]



$$PE = wz \quad (\text{Ec. 2.16})$$

En la que w es el peso del elemento y z es la cabeza de altura.

2) Energía Cinética

Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es (Ec. 2.17):¹⁹¹

$$KE = \frac{wV^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

3) Energía de Flujo

En ocasiones conocida como energía de presión o trabajo de flujo, ésta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión, P . La energía de flujo se abrevia FE (Flow Energy) y se calcula a partir de la **ecuación 2.18**:

$$FE = \frac{wP}{\gamma} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

La **ecuación 2.18** puede ser derivada de la manera siguiente. En la **Figura 2.3** se muestra el elemento de fluido en el conducto que se traslada a través de una sección. La fuerza que actúa sobre el elemento es $P.A$. En la que P es la presión en la sección y A es su área. Al trasladar el elemento a través de la sección, la fuerza se mueve una distancia L igual a la longitud del elemento. En consecuencia, el trabajo hecho es (Ec. 2.19):

$$\text{Trabajo} = PAL = PV \quad (\text{Ec. 2.19})$$

En donde V es el volumen del elemento. El peso del elemento, w , es (Ec. 2.20):

$$w = \gamma V \quad (\text{Ec. 2.20})$$

En la que γ es el peso específico del fluido. Entonces, el volumen del elemento es (Ec. 2.21):

$$V = \frac{w}{\gamma} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Y se tiene que el trabajo viene dado por la **ecuación 2.22** al cual se le llama energía de flujo en la **ecuación 2.18**.



$$\text{Trabajo} = PV = \frac{Pw}{\gamma} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

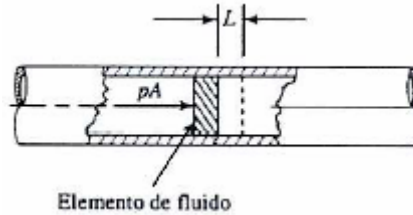


Figura 2.3 Energía de Flujo^[9]

La cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido será la suma, representada con E, como sigue (**Ec. 2.23**):

$$E = FE + PE + KE \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Sustituyendo las expresiones de cada tipo de energía se tiene (**Ec. 2.24**):

$$E = \frac{wP}{\gamma} + wz + \frac{wV^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía. Newton-metro (N.m) en el Sistema Internacional o en pies-libra (pie/lb) en el Sistema Británico de Unidades. Considerando ahora el elemento de fluido de la **Figura 2.4**, que se mueve de la sección 1 a la sección 2. Los valores de P , z y V son diferentes en las dos secciones.

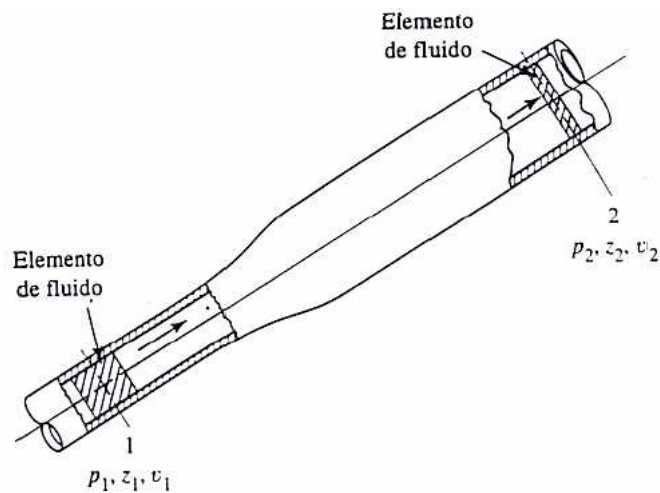


Figura 2.4 Elementos de Fluido Utilizados en la Ecuación de Bernoulli ^[9]

En la sección 1, la energía total es (**Ec. 2.20**):



$$E_1 = \frac{wP_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wV_1^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

En la sección 2, la energía total es (**Ec. 2.21**):

$$E_2 = \frac{wP_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wV_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Si no se agrega energía al fluido o se pierde entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía requiere que la energía en ambos puntos sea igual (**Ec. 2.22**):

$$E_1 = E_2 \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Escribiéndolo en sus expresiones equivalentes, se tiene (**Ec. 2.23**):

$$\frac{wP_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wV_1^2}{2g} = \frac{wP_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wV_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

El peso del elemento, w , es común a todos los términos y se le puede cancelar. La ecuación, entonces, se convierte en (**Ec. 2.24**):

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

A ésta se le conoce como ecuación de Bernoulli. Cada término de la ecuación de Bernoulli (**Ec. 2.24**) es el resultado de dividir una expresión de la energía entre el peso de un elemento del fluido. Por consiguiente, es apropiado referirse a las formas resultantes como la energía poseída por el fluido por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema.

Las unidades de cada término pueden ser Newton-metro por Newton (N. m/N) en el Sistema Internacional y libras-pies por libra (lb.pie/lb) en el Sistema Británico de Unidades.

Pero la unidad de peso, el Newton (N) o la libra (lb), pueden cancelarse, dejando solamente una unidad de longitud, el metro (m) o el pie. Por tanto, los términos de la ecuación de Bernoulli se conocen, a menudo, como “cabezas”, refiriéndose a la altura por encima de un nivel de referencia. El término P/γ se conoce como cabeza de presión, a z se le llama cabeza de elevación; y al término $V^2/2g$ representa la cabeza de velocidad. La suma de las tres se conoce como cabeza total. Debido a que cada término representa una altura, un diagrama parecido al que se presenta en la **Figura 2.5** es de utilidad para visualizar la relación entre los tres tipos de energía. Debido a la suposición de que no se



pierde o se agrega energía, la cabeza total permanece a un nivel constante. Entonces, la altura relativa de cada término de cabeza varía según lo establecido por la ecuación de Bernoulli.^[9]

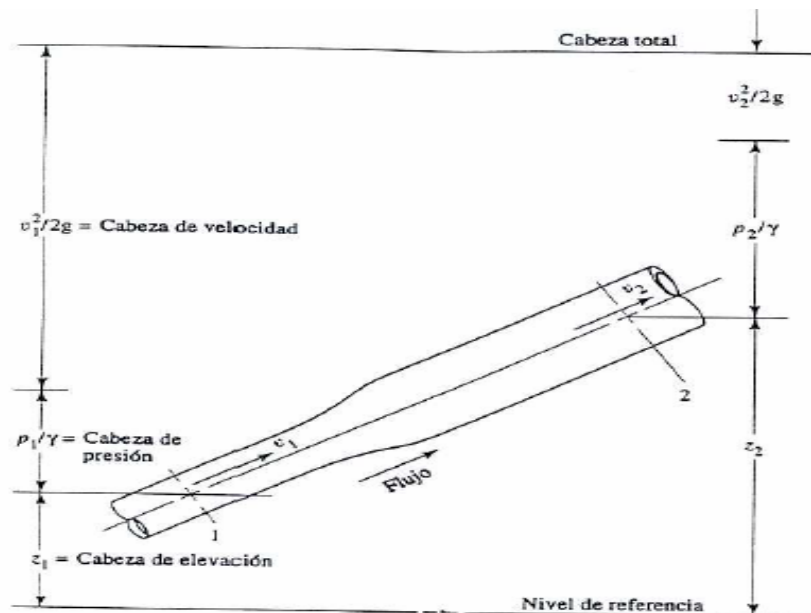


Figura 2.5 Cabeza de Presión, Cabeza de Elevación, Cabeza de Velocidad y Cabeza Total^[9]

2.11.1 Restricciones a la Ecuación de Bernoulli

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de problemas prácticos, existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta con el fin de aplicar la ecuación de manera correcta.

1. Es válida solamente para fluidos incompresibles, puesto que el peso específico del fluido se tomó como el mismo en las dos secciones de interés.
2. No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que pudieran agregar o eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante.
3. No puede haber transferencias de calor hacia dentro o fuera del fluido.
4. No puede haber pérdidas de energía debido a la fricción.

En realidad, ningún sistema satisface todas estas restricciones. Sin embargo, existen muchos sistemas para los cuales solamente se tendrá un error despreciable cuando se les aplica la ecuación de Bernoulli. Por otro lado, el uso de tal ecuación puede permitir una rápida estimación de un resultado, cuando eso es todo lo que se necesita.^[9]



2.11.2 Simplificación de la Ecuación de Energía

En caso de que el fluido provenga de un tanque y lo arroja a otro dispositivo colocado al final del conducto que los une, considerando la superficie del tanque y la corriente libre del fluido que sale por la boquilla no están confinadas por fronteras sólidas, sino que están expuestas a la atmósfera prevaleciente entonces en el momento de representar dicho sistema con la ecuación de Bernoulli utilizando estos puntos extremos como puntos de referencia, los términos correspondientes a la cabeza de presión serán cero y se pueden cancelar.

Se puede suponer que el tanque del cual se saca el fluido es bastante grande comparado con el tamaño del área de flujo dentro del conducto. Debido a que $V=Q/A$, la velocidad en la superficie de dicho tanque será muy pequeña por esta razón consideramos que la cabeza de velocidad en la superficie del tanque o recipiente es muy cercana a cero y la eliminamos de la ecuación.

Si ambos puntos de referencia necesarios para aplicar la ecuación de Bernoulli estuvieran en el mismo conducto, que poseen un área de flujo uniforme, los términos correspondientes a la cabeza de velocidad en ambos lados de la ecuación serían iguales y se cancelarían.

Si la elevación en los dos puntos de referencia usados en la ecuación de Bernoulli es la misma, estos términos se cancelan.^[9]

2.12 Dispositivo Mecánico

Los dispositivos mecánicos se pueden clasificar de acuerdo con la característica de si éste entrega energía al fluido o si el fluido entrega energía al dispositivo.

Una bomba es un ejemplo común de un dispositivo mecánico que añade energía a un fluido. Un motor eléctrico o algún otro dispositivo principal de potencia hacen funcionar un eje de la bomba. Esta entonces toma su energía cinética y la entrega al fluido, lo cual trae como resultado un aumento en la presión de fluido y este empieza a fluir.^[9]

2.13 Fricción de Fluido

Un fluido en movimiento ofrece una resistencia de fricción al flujo. Parte de la energía del sistema se convierte en energía térmica (calor), el cual se disipa a través de las paredes del conducto en el que el fluido se desplaza. La magnitud de la pérdida de energía depende de las propiedades del fluido, la velocidad de flujo, el tamaño del conducto, la rugosidad de la pared del conducto y la longitud del tubo.^[9]

2.14 Ecuación General de la Energía

Algunas de las restricciones que se establecieron para el uso de la ecuación de Bernoulli se pueden eliminar al expandir la ecuación, a lo que se conoce como ecuación general de la energía.



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

La ecuación general de la energía es una expansión de la ecuación de Bernoulli, que hace posible resolver problemas en los que se presentan pérdidas y adiciones de energía. La interpretación lógica de la ecuación de energía se puede ver en la **Figura 2.6**, que representa un sistema de flujo. Los términos H_1 y H_2 denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2, respectivamente. También se muestran las adiciones y pérdidas de energía, h_A y h_L , para tal sistema, la expresión del principio de conservación de energía está dada por la **ecuación 2.25**:

$$H_1 + h_A - h_L = H_2 \quad (\text{Ec. 2.25})$$

La energía que posee el fluido por unidad de peso es (**Ec. 2.26**):

$$H = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

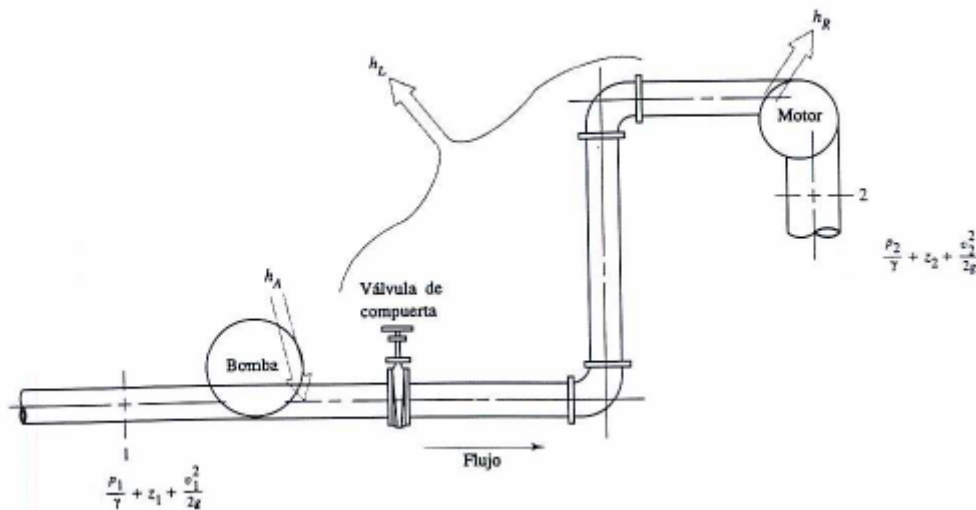


Figura 2.6 Sistema de Flujo de Fluido que Ilustra la Ecuación General de la Energía^[9]

Sustituyendo la **ecuación 2.26** en la **ecuación 2.25**, queda entonces (**Ec. 2.27**):

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Esta es la forma de la ecuación de la energía que se utilizará en este trabajo. Al igual que en la ecuación de Bernoulli, cada término de la **ecuación 2.27** representa una cantidad de energía por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema. Las unidades SI típicas son Nm/N o metros. Las unidades en el Sistema Británico de Unidades son lb-pie/lb o pie.



Es de suma importancia que la ecuación general de energía este escrita en la dirección de flujo, es decir, desde el punto de referencia, en la parte izquierda de la ecuación, al punto correspondiente, en el lado derecho.

En un problema particular, es posible que no todos los términos de la ecuación general de la energía se requieran. Por ejemplo, si no existe un dispositivo mecánico entre las secciones de interés, el término h_A será cero, y puede eliminarse de la ecuación. Si las pérdidas de energía son tan pequeñas que pueden ser despreciadas, el término h_L se elimina. Si existen estas dos condiciones la **ecuación 2.27** se reduce a la de Bernoulli.¹⁹¹

2.14.1 Pérdidas de Energía debido a la Fricción

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción interna en el fluido. Como se indica en la ecuación general de la energía, tales pérdidas de energía traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo. Es muy importante ser capaces de calcular la magnitud de dichas pérdidas de energía. En la ecuación general de la energía (**Ec. 2.27**), el término h_L se define como la energía perdida por el sistema. Un componente de la pérdida de energía se debe a la fricción en el fluido en movimiento. La fricción es proporcional a la cabeza de velocidad del flujo y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente de flujo, para el caso de flujo en conductos y tubos. Lo anterior se expresa de manera matemática en la ecuación de Darcy (**Ec. 2.28**):

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Donde:

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción, m (pie).

L = Longitud de la corriente de flujo, m (pie).

D = Diámetro del conducto, m (pie).

V = Velocidad de flujo promedio, m/s (pie/s).

f = Factor de fricción, adimensional.

La ecuación de Darcy se puede utilizar para calcular la pérdida de energía en secciones largas y rectas de conductos redondos, tanto para flujo laminar como turbulento. La diferencia entre los dos está en la evaluación del factor de fricción, f , que carece de dimensiones.¹⁹¹

2.15 Número de Reynolds

El tipo de flujo se puede predecir mediante el cálculo de un número sin dimensiones, el número de Reynolds, que relaciona las variables más importantes que describen un flujo: velocidad, diámetro de la sección transversal de la tubería, densidad del fluido y viscosidad.



El número de Reynolds es el cociente de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido, entre la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se deriva de la segunda ley de Newton del movimiento, $F = m \cdot a$, la fuerza viscosa está relacionada con el producto de la tensión de corte por el área.

El comportamiento de un fluido, particularmente con respecto a las pérdidas de energía, depende bastante de si el flujo es laminar o turbulento, por esta razón deseamos tener medios para predecir el tipo de flujo sin tener necesidad de observarlo. En efecto, la observación directa es imposible para fluidos que se encuentran en conductos opacos. Se puede mostrar experimentalmente y verificar analíticamente que el carácter del flujo en un conducto redondo depende de cuatro variables: la densidad del fluido, ρ , la viscosidad del fluido, μ , el diámetro del conducto, D , y la velocidad promedio de flujo, V . Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como número de Reynolds (Re). La **ecuación 2.29** muestra la definición básica del número de Reynolds.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Donde:

V = Velocidad, m/s (pies/s).

ν = Viscosidad cinemática, m^2/s (pies²/s).

D = Diámetro interno de la tubería, m (pies).

μ = Viscosidad, kg/m.s (lb.s/pies²).

ρ = Densidad, kg/m^3 (slug/pie³).

Re = Número de Reynolds, adimensional.

Los flujos que tienen un número de Reynolds grande, típicamente debido a una alta velocidad o a una baja viscosidad, o a ambas, tienden a ser turbulentos (flujo rápido y caótico). Aquellos fluidos que poseen una alta viscosidad y/o que se mueven a bajas velocidades tendrán un número de Reynolds pequeño y tenderán a ser laminares (flujo lento). Para calcular la cantidad de energía perdida debido a la fricción en un sistema de fluido, es necesario caracterizar la naturaleza del flujo.

Para aplicaciones prácticas en flujos de conductos, se tiene que si el número de Reynolds para el flujo es menor que 2.000, el flujo será laminar. Se tiene también que si el número de Reynolds es mayor que 4.000, se puede suponer que el flujo es turbulento.

En el intervalo de números de Reynolds comprendido entre 2.000 y 4.000, es imposible predecir qué tipo de flujo existe, por consiguiente, este intervalo se conoce como región de transición. Las aplicaciones típicas involucran flujos que se encuentran bien colocados en el intervalo de los flujos laminares o en el intervalo de los flujos turbulentos, de modo que la existencia de esta región de incertidumbre no ocasiona gran dificultad. Si se encuentra que el flujo de un sistema está en la región de transición, se asumirá el flujo como turbulento.^[9]



2.16 Perfiles de Velocidad

A menos que se diga otra cosa, se supone que el término velocidad indica la velocidad promedio del flujo que se encuentra a partir de la ecuación de continuidad. La magnitud de la velocidad no es, en modo alguno, uniforme a través de una sección particular del conducto, y, como se muestra en la **Figura 2.7**, la forma en que la velocidad varía con respecto a la posición depende del tipo de flujo que exista. La velocidad de un fluido en contacto con un límite sólido estacionario es cero. La velocidad máxima para cualquier tipo de flujo se presenta en el centro del conducto. La razón de las diferentes formas de los perfiles de velocidad es que, debido al movimiento bastante caótico y a la mezcla violenta de las moléculas del fluido en un flujo turbulento, existe una transferencia de momento entre las moléculas, lo cual trae como resultado una distribución de velocidad más uniforme que en el caso del flujo laminar. Puesto que el flujo laminar está conformado esencialmente por capas de fluido, la transferencia de momento entre las moléculas es menor y el perfil de velocidad se hace parabólico.^[9]

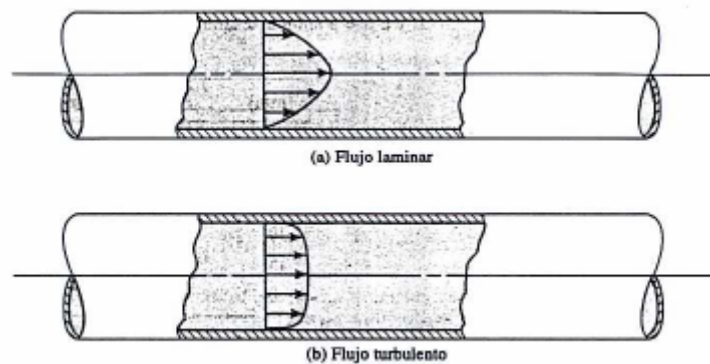


Figura 2.7 Perfiles de Velocidad para Flujos en Conductos^[9]

2.17 Ecuaciones para el Factor de Fricción

El Diagrama de Moody (**Figura B.1**) es un medio conveniente y lo suficientemente preciso para determinar el factor de fricción cuando se resuelven problemas mediante cálculos manuales. Sin embargo, si los cálculos deben ser algo automáticos para poder obtener la solución en una computadora o con una calculadora programable, es necesario tener ecuaciones para el factor de fricción.

La ecuación que se utiliza en el trabajo realizado por Moody (1944) cubre tres diferentes zonas del diagrama. En la zona de flujo laminar, para valores del número de Reynolds por debajo de 2.000, f puede encontrarse con la **ecuación 2.30**:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Esta relación está graficada en el diagrama de Moody como una línea recta en el lado izquierdo del diagrama. Para los números de Reynolds desde 2.000 hasta 4.000, el flujo se



encuentra en la región crítica o de transición y es imposible predecir el valor de f . Por encima del número de Reynolds de 4.000, por lo general el flujo se conoce como turbulento. Existe una ecuación explícita para el factor de fricción que permite el cálculo directo del valor del factor de fricción para flujo turbulento (**Ec. 2.31**), fue desarrollada por P.K. Swamee y A.K. ^[9]

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(D/\varepsilon)} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

2.18 Pérdidas Menores, Accesorios y Válvulas

Los sistemas de tuberías no solo están formados por secciones rectas de tuberías. Existen adicionalmente componentes tales como válvulas, codos, tes y otros, los cuales incrementan las pérdidas de la energía en el sistema. A tales pérdidas se le denominan pérdidas locales o pérdidas menores, aunque en ciertas situaciones estas pérdidas resultan ser las pérdidas dominantes. Para calcular las pérdidas de energía total en el sistema, se suman las pérdidas locales y las pérdidas de energía por fricción en la tubería. Algunos componentes auxiliares que se emplean en un sistema de tuberías, incluyen:

- Adaptadores para cambios en el tamaño de la tubería.
- Codos y curvas para cambiar la dirección del flujo o tuberías.
- Tes y accesorios laterales para dividir o mezclar corrientes.
- Válvulas para controlar flujo.
- Entradas y salidas, casos especiales de adaptadores, donde se considera que las corrientes aguas arriba o aguas abajo son infinitas en extensión, respectivamente.

Todos estos componentes introducen perturbaciones ya que producen turbulencias y pérdidas de energía mecánica adicionales a las que ocurren en el flujo de fluidos en una tubería. Por ejemplo, en un ensanchamiento brusco el flujo describe el fenómeno conocido como vena contracta formándose una zona de estancamiento donde el flujo se separa generando un movimiento muy desordenado. A medida que el flujo prosigue aguas abajo, el movimiento degenera en una turbulencia real. La perturbación causada por la expansión persiste una cierta distancia corriente abajo, a medida que la energía cinética del movimiento desordenado se disipa y el flujo gradualmente regresa a la condición de flujo totalmente desarrollado. Este comportamiento no es exclusivo del ensanchamiento brusco, otros componentes generan perturbaciones similares. Estas perturbaciones son responsables de las pérdidas de energía en la región inmediata corriente abajo del componente. Las pérdidas locales se calculan a partir de coeficiente de pérdidas definido por la **ecuación 2.32**:



$$h_l = K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

Despejando K, se tiene **(Ec. 2.33)**:

$$K = \frac{h_l}{V^2 / 2g} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Una alternativa al método del coeficiente de pérdidas para calcular las pérdidas de energía locales es el método de la longitud equivalente. En este método se reemplaza el componente por un tramo recto de tubería que produce, en teoría, las mismas pérdidas. Sustituyendo la pérdida de energía por fricción, h_l , por su equivalente según la ecuación de Darcy **(Ec. 2.28)** se obtiene la **ecuación 2.34**:

$$K = \frac{f \frac{L}{D} V^2 / 2g}{V^2 / 2g} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Simplificando la ecuación, se tiene **(Ec. 2.35)**:

$$K = f \frac{L}{D} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

Despejando la longitud, se tiene **(Ec. 2.36)**:

$$L_{eq} = \frac{KD}{f} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

Donde: f es el factor de fricción en la tubería en la cual está instalado el componente, cuando se aplica este concepto a los adaptadores se debe tener mucho cuidado si la longitud equivalente se añade a la tubería de menor diámetro o a la de mayor. En la práctica, los coeficientes de pérdidas locales o las longitudes equivalentes se obtienen de manuales o para una mayor precisión, de las especificaciones del fabricante. Estos datos son generalmente obtenidos por medio de experimentación.^[8]



2.19 Sistemas de Línea de Tubería en Serie

Son tuberías con características diferentes colocadas una a continuación de la otra. Estas características pueden ser el diámetro, el material o una combinación de las dos. En las tuberías en serie el caudal en cada tubería es el mismo, en caso de que no existan caudales laterales en las uniones, mientras que las pérdidas o adiciones de energía se suman a lo largo de la serie. ^[10]

La mayoría de los sistemas de flujo de tubería involucran grandes pérdidas de energía de fricción y pérdidas menores. Si el sistema es arreglado de tal forma que el fluido fluye a través de una línea continua sin ramificaciones, éste se conoce con el nombre de sistema en serie. Este tipo de sistemas se estudian con métodos de análisis para sistemas de línea de tubería en los cuales el fluido fluye a través de una trayectoria continua única. En una línea de tubería en serie la pérdida de energía total es la suma de las pérdidas individuales grandes y pequeñas. Esta afirmación está de acuerdo con el principio de que la ecuación de la energía es una manera de tomar en cuenta toda la energía en el sistema entre dos puntos de referencia.

En el diseño o análisis de un sistema de flujo de tubería existen seis parámetros básicos involucrados, llamados:

1. Las pérdidas de energía del sistema o la adición de energía al sistema.
2. La velocidad de flujo de volumen del fluido o la velocidad del fluido.
3. El tamaño de la tubería.
4. La longitud de la tubería.
5. La rugosidad de la pared de la tubería, e
6. Las propiedades del fluido como peso específico, densidad y viscosidad.

Normalmente, se determinará uno de los primeros tres parámetros mientras que los demás se conocen o pueden especificarse por el diseñador. El método de llevar a cabo el diseño o completar el análisis es diferente dependiendo de lo que no se sabe. Estos métodos consisten en:

- I. Determinar las pérdidas o adiciones de energía.
- II. Determinar la velocidad del flujo de volumen.
- III. Determinar el diámetro de la tubería. ^[9]

2.20 Conductos y Tuberías Comercialmente Disponibles

Los diámetros reales internos y externos de conductos y tubos estándar disponibles comercialmente, pueden ser bastante diferentes del tamaño nominal dado. Existen varios tipos de conductos y tubos utilizados ampliamente. En los anexos se dan los datos correspondientes al diámetro exterior, diámetro interior, espesor de pared y área de flujo para algunos de tales tipos. Los tamaños nominales para los conductos comercialmente disponibles todavía están en unidades de pulgadas, a pesar de que la adopción del SI es una tendencia internacional. Puesto que el tamaño nominal se utiliza solamente para el diseño de ciertos conductos o tuberías. ^[9]



2.20.1 Conducto de Acero

Las líneas de conductos para propósitos generales, a menudo, están construidas de acero. Los tamaños estándar de los conductos de acero están diseñados de acuerdo con el tamaño nominal y el número de calibre. Los números de calibre están relacionados con la presión de operación permisible y con la tensión permitida del acero en el conducto. El intervalo de número de calibre va de 10 a 160, y los números más grandes indican un espesor mayor en las paredes del conducto. Como todos los calibres de conductos de un tamaño nominal dado tienen el mismo diámetro externo, los calibres más grandes tienen un diámetro interno más pequeño. La serie más completa de conductos de acero disponibles son los calibres 40 y 80.^[9]

2.20.2 Tubos de Acero

Los tubos estándar de acero se utilizan en sistemas hidráulicos, condensadores, intercambiadores de calor, sistemas de combustible de motores y en sistemas industriales de procesamiento de fluidos. Los tamaños están diseñados según el diámetro externo y el espesor de las paredes.^[9]

2.20.3 Tubos de Cobre

Las líneas de plomería doméstica, para refrigeración y de aire comprimido, con frecuencia utilizan tuberías de cobre manufacturadas como del Tipo K o del Tipo L. El Tipo K tiene un mayor espesor de pared y es recomendable para instalaciones subterráneas. El Tipo L es adecuado para tuberías domésticas de propósito general. El tamaño nominal de los tubos de cobre es de 1/8 de pulgada, menos el diámetro exterior real del tubo.^[9]

2.20.4 Conductos de Hierro Dúctil

A menudo, las líneas de conducto de agua, gas y drenaje se hacen con hierro dúctil, debido a su resistencia, ductilidad y relativa facilidad de manejo. Ha sustituido al hierro forjado en muchas aplicaciones. Junto con los tubos, se proporcionan conectores estándar para la instalación adecuada de la tubería, ya sea subterránea o no. Varias clases de conductos de hierro dúctil están disponibles para su uso en sistemas que manejan un intervalo de presiones.^[9]

2.20.5 Otros Tipos de Conductos y Tuberías

Los conductos de latón se utilizan con fluidos corrosivos, al igual que el acero inoxidable. Otros materiales utilizados son el aluminio, el plomo, el estaño, arcilla vitrificada, concreto y muchos tipos de plástico, como el polietileno, el nailon y el cloruro de polivinil (PVC).^[9]

2.21 Velocidad de Erosión

La experiencia indica que un importante límite superior de velocidad en tuberías de proceso, es la llamada “velocidad de erosión”, que equivale presumiblemente a una velocidad por encima de la cual ocurriría una erosión excesiva, con el peligro de que la tubería falle en las te, codos, etc.



Las partículas de virutas, arena o afines podrían convertirse en agente de erosión. Mientras que en el flujo bifásico las pequeñas gotas de líquido podrían ser las responsables. Independientemente del mecanismo, no cabe duda de que el fenómeno es real. Las recomendaciones para limitar las velocidades erosivas son pocas y carecen de fundamento experimental. La recomendación se basa en una fórmula presentada varias veces en la literatura, además de la experiencia general de que no se han producido accidentes catastróficos causados por su aplicación. La tabla de Kern (**Tabla A.1**) puede usarse como guía de calibración de líquido. Su uso debe limitarse a efectuar estimados preliminares de diámetros de tuberías. ^[11]

2.21.1 Velocidad de Flujo Recomendada en Tuberías

Los factores que afectan la elección de una velocidad de flujo satisfactoria en los sistemas de fluidos son numerosos. Algunos de los más importantes son el tipo de fluido, la longitud del sistema de flujo, el tipo de conducto o de tubo, la caída de presión que se puede tolerar, los dispositivos como bombas, válvulas, etc., que se pueden conectar al conducto o a la tubería, la temperatura, la presión y el ruido. La velocidad de flujo aumenta a medida que disminuye el área de la trayectoria de flujo. Por consiguiente, los tubos más pequeños producirán altas velocidades, y, al contrario, los tubos más grandes proporcionarán bajas velocidades. Las pérdidas de energía y las correspondientes caídas de presión aumentan drásticamente a media que aumenta la velocidad de flujo. Es por esta razón que se hace deseable mantener las velocidades bajas. Pero, debido a que los tubos y los conductos grandes son más costosos, es necesario establecer algunas limitaciones.

Una velocidad de flujo razonable para sistemas de distribución de fluido es de aproximadamente 3,0 m/s (alrededor de 10 pies). Esto se puede aplicar a agua, aceite y otros líquidos de uso común en conductos, fuera de las salidas de las bombas. Un desempeño apropiado de una bomba requiere velocidades más bajas en su entrada, aproximadamente 1,0 m/s (alrededor de 3 pies/s). En la **Tabla 2.1** se presentan lineamientos generales para las velocidades de flujo en sistemas hidráulicos de aceite de potencia de fluido. ^[9]

Tabla 2.1 Velocidades de Flujo Recomendadas en Sistemas de Potencia de Fluido ^[9]

| | Unidades SI | Unidades del Sistema Británico |
|--|---------------|--------------------------------|
| Entradas a Bombas (Líneas de Succión) | 0,6 a 2,2 m/s | 2,0 a 7,0 pies/s |



| | | |
|---|---------------|--------------------|
| Salidas de Bombas (Líneas de Descarga o Presión) | 2,4 a 7,5 m/s | 8,0 a 25,0 pies /s |
| Líneas de Retorno | 0,6 a 2,6 m/s | 2,0 a 8,5 pies/s |

2.22 Componentes de Superficie Utilizados en el Proceso de Producción de Hidrocarburos

A. Cabezal del Pozo

Las conexiones del cabezal del pozo son equipos que se encargan de mantener el control del pozo (**Figura 2.8**), éstos varían en forma y en resistencia. Generalmente, el cabezal del pozo depende de la presión que se debe soportar, el tipo de completación, los fluidos a manejar, incluyendo fluidos corrosivos y arenas, además de la preferencia de los operadores. ^[12]



Figura 2.8 Cabezales de Pozo ^[13]

B. Reductores

El reductor es una restricción de la tubería que permite variar la tasa de producción. Consiste básicamente en un dispositivo de menor diámetro al de la tubería, que se instala en la entrada de la línea de flujo, en el cabezal del pozo. Es la única herramienta que permite controlar la producción, RGL, % AyS, para reducir o aumentar la presión en la línea de flujo del pozo; entre otros, fluyendo por flujo natural. Además de permitir controlar el flujo, las presiones y el grado de conificación del agua y del gas en el yacimiento; puede maximizar la producción del pozo, mantener el máximo tiempo posible el pozo en producción y evitar problemas asociados. ^[3]



C. Líneas de Flujo

El término línea de flujo se refiere a la tubería que conecta el cabezal de un pozo con su respectiva estación de flujo (**Figura 2.9**). En pozos de completación múltiple se utilizan dos o más líneas con el fin de mantener un control sobre cada zona.

Las líneas de flujo se diseñan de acuerdo a la máxima presión de operación, el caudal de flujo a manejar, la longitud de la línea, la variación de presión tolerable, las condiciones geográficas y del suelo y el mantenimiento requerido. Con estos datos es posible seleccionar el diámetro de la línea de flujo, el peso y el tipo de tubería.^[3]



Figura 2.9 Líneas de Flujo^[14]

a. Dimensionamiento de Líneas de Flujo

A menos que se le fije en base a consideraciones de proceso o de seguridad, el tamaño de las líneas está determinado por la longitud de la línea de flujo y la caída de presión admisible. La caída de presión admisible puede ser influenciada por muchos factores incluyendo los requerimientos de proceso, económicos, seguridad y límites de ruido y vibración.

El diámetro óptimo de las líneas está determinado por el balance entre la inversión de líneas de flujo y tuberías de producción contra la inversión de la bomba o compresor y el costo de operación del accionador. Todas las líneas de alto costo deben ser consideradas individualmente y se debe calcular el caso de mínima inversión para las líneas de flujo y equipos de bombeo. La **Tabla A.2** da algunas guías de las caídas de presión óptimas en líneas de acero al carbono. Esta lista ha sido preparada tomando como base líneas de flujo promedios en el rango de 200 m (600 pie) o menos. Estos valores deben ser considerados como una guía y pueden ser modificados por razones económicas.^[15]



b. Selección de la Clase de Tuberías (Schedule)

Para seleccionar una clase de una tubería, se debe conocer el diámetro de la línea (interno y externo) y el espesor de la pared (**Tabla A.3**). El diámetro interno de la tubería se calcula según se indicó en Dimensionamiento de Líneas de Flujo. Para tuberías de 300 mm (12 pulg) o menos, el diámetro interno de la línea corresponde estrechamente al tamaño nominal. Para diámetros mayores, el diámetro nominal corresponde al diámetro externo. ^[15]

D. Estación de Flujo

La estación de flujo es un conjunto de equipos interrelacionados para recolectar, separar, almacenar temporalmente y bombear los fluidos provenientes de los pozos ubicados en su vecindad. ^[5]

Las estaciones de flujo instaladas en tierra, tienen como función recolectar la producción bruta de crudo proveniente de los pozos, separar parte del gas asociado, y enviar el crudo al patio de almacenamiento u otra planta de tratamiento. En la **Figura 2.10** se muestra una estación de flujo. El proceso se inicia con la recolección del crudo a través del múltiple de producción, el cual está formado por un cabezal de producción y otro de prueba. El cabezal de prueba es utilizado para aislar individualmente la producción de un pozo con el objeto de evaluarlo. El crudo de producción entra a los separadores en donde se separa la parte gaseosa (gas) del crudo. El gas separado sale por el tope del separador y se envía al depurador que permite purificar o eliminar las diminutas partículas en suspensión depositando los residuos de crudo que pudieron ser arrastrados en la separación. El gas limpio es enviado por las tuberías o líneas de recolección a las plantas de compresión. El líquido sale por la parte inferior de los separadores hacia los calentadores, aumentando su temperatura para disminuir su viscosidad y facilitar su manejo. Una vez calentado el crudo se almacena en los tanques de almacenamiento. El crudo almacenado en los tanques alimenta la succión de las bombas y es enviado a los patios de tanques. Cuando el crudo presenta un porcentaje representativo de agua (mayor a 1%), éste pasa por una planta deshidratadora, antes de llegar a los patios de tanques. El crudo de prueba se procesa de manera similar al de producción. ^[16]



Figura 2.10 Estación de Flujo Santa Bárbara Distrito Norte, estado Monagas ^[17]

E. Múltiples de Producción

En la estación de flujo y de recolección, el múltiple de recolección representa un sistema de recibo, al cual llega la línea de flujo de cada uno de los pozos productores asignados a esa estación (**Figura 2.11**). El múltiple facilita el manejo de la producción total de los pozos que ha de pasar por los separadores, como también el aislamiento de pozos para pruebas individuales de producción. Por medio de las interconexiones del sistema y la disposición apropiada de válvulas, se facilita la distribución, el manejo y el control del flujo a los pozos. ^[6]

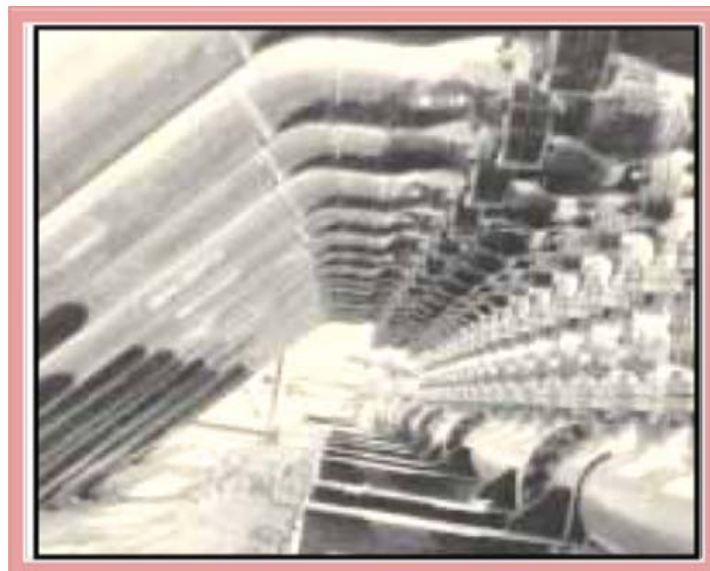


Figura 2.11 Múltiple de Producción ^[6]

F. Separador Líquido-Gas



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Es muy importante la separación del petróleo del gas, del agua y de los sedimentos que lo acompañan desde el yacimiento. Para realizar la separación del gas del petróleo se emplean separadores del tipo vertical y horizontal, cuya capacidad para manejar ciertos volúmenes diarios de crudo y de gas, a determinadas presiones y etapas de separación, varía de acuerdo a las especificaciones de manufactura y funcionamiento requeridos.

Los separadores se fabrican de acero, cuyas características corresponden a las normas establecidas para funcionar en etapas específicas de alta, mediana o baja presión. En la separación de gas y petróleo es muy importante considerar la expansión que se produce cuando el gas se desprende del petróleo y la función que desempeña la presión. Además, en el interior del separador, a través de diseños apropiados, debe procurarse el mayor despojo de petróleo del gas, de manera que el gas salga lo más limpio posible y se logre la mayor cantidad posible de petróleo. La separación para una, dos o tres etapas está regulada por factores tales como la presión de flujo en el cabezal del pozo, la presión con que llega a la estación, la relación gas-petróleo, la temperatura y el tipo de crudo (Figura 2.12).^[6]

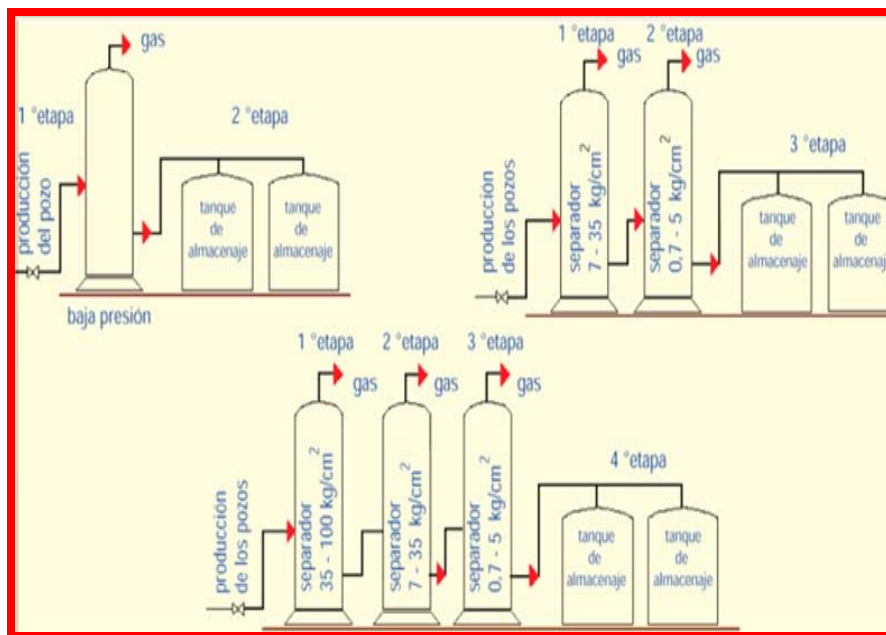


Figura 2.12 Instalaciones de Separadores y Etapas de Separación de acuerdo a la Magnitud de la Presión y al Volumen de Gas que deba Manejarse^[6]

La mezcla de fases entra al separador y, si existe, choca contra un aditamento interno ubicado en la entrada, lo cual hace que cambie el momentum de la mezcla, provocando así una separación gruesa de las fases. Seguidamente, en la sección de decantación (espacio libre) del separador, actúa la fuerza de gravedad sobre el fluido permitiendo que el líquido abandone la fase vapor y caiga hacia el fondo del separador (sección de acumulación de líquido). Las fases líquidas ya separadas requieren de un volumen de control y emergencia para una operación confiable y segura de los equipos aguas abajo, esta sección provee del tiempo de retención suficiente para que los equipos aguas abajo pueden operar



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

satisfactoriamente y, si se ha tomado la previsión correspondiente, liberar el líquido de las burbujas de gas atrapadas. Normalmente, pueden identificarse cuatro zonas principales en los separadores horizontales (**Figuras 2.13**) y verticales (**Figura 2.14**).

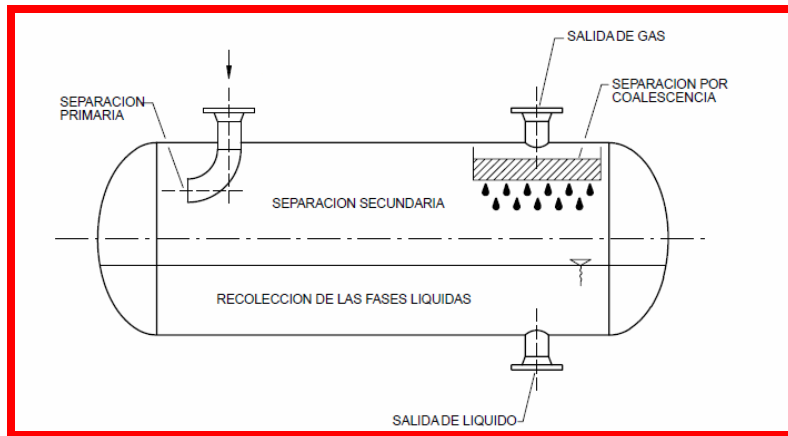


Figura 2.13 Separador Gas- Líquido (Horizontal) ^[18]

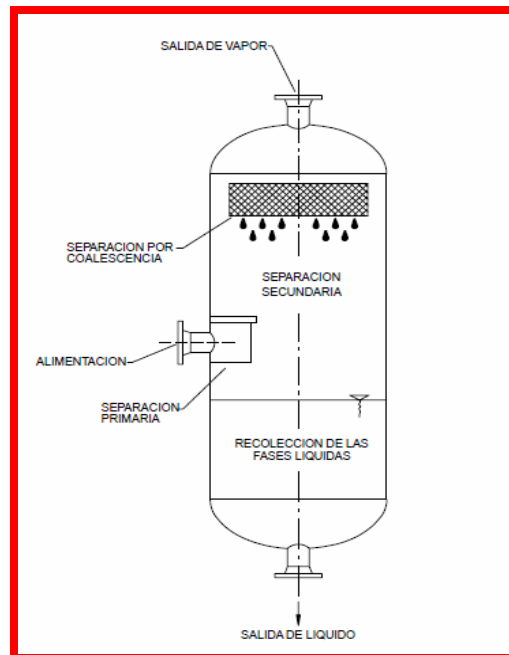


Figura 2.14 Separador Gas- Líquido (Vertical) ^[18]

Los principios fundamentalmente considerados para realizar la separación física de gas y líquidos son: el momentum o cantidad de movimiento, la fuerza de gravedad y la coalescencia. Toda separación puede emplear uno o más de estos principios, pero siempre las fases de los fluidos deben ser inmiscibles y de diferentes densidades para que ocurra la separación. ^[18]



➤ **Momentum (Cantidad de Movimiento)**

Fluidos con diferentes densidades tienen diferentes momentum. Si una corriente de dos fases se cambia bruscamente de dirección, el fuerte momentum o la gran velocidad adquirida por las fases, no permiten que las partículas de la fase pesada se muevan tan rápidamente como las de la fase liviana, este fenómeno provoca la separación. En la separación primaria el cambio en la cantidad de movimiento de las fases a la entrada del separador genera la separación gruesa de las fases. Esta zona incluye las boquillas de entrada y los aditamentos de entrada, tales como deflectores o distribuidores.^[18]

➤ **Fuerza de Gravedad (Separación Secundaria)**

Durante la separación secundaria se observan zonas de fase continua con gotas dispersas (fase discontinua), sobre la cual actúa la fuerza de gravedad. Esta fuerza se encarga de decantar hasta cierto tamaño de gotas de la fase pesada discontinua en la fase liviana continua. También produce la flotación de hasta un cierto tamaño de gotas de la fase líquida liviana (fase discontinua), en la fase pesada continua. En esta parte del recipiente la fase liviana se mueve a una velocidad relativamente baja y con muy poca turbulencia.^[18]

➤ **Coalescencia**

Las gotas muy pequeñas no pueden ser separadas por gravedad. Estas gotas se unen, por medio del fenómeno de coalescencia, para formar gotas mayores, las cuales se acercan lo suficientemente como para superar las tensiones superficiales individuales y poder de esta forma separarse por gravedad.

En ciertas situaciones, no es aceptable que gotas muy finas de la fase pesada discontinua sean arrastradas en la fase liviana: por ello es necesario que, por coalescencia, tales gotas finas alcancen un tamaño lo suficientemente grande para separarse por gravedad: para lograrlo se hace necesario tener elementos como los eliminadores de niebla o mallas para el caso de separadores líquido-gas, o las esponjas o platos coalescedores, en el caso de la separación líquido-líquido.^[18]

❖ **Funciones de un Separador**

- Realizar una primera separación entre los hidrocarburos líquidos y gaseosos.
- Liberar el gas que permanezca en la fase líquida.
- Recolectar las partículas líquidas presentes en la fase gaseosa, con lo cual se logra una mejor separación de los fluidos.
- Realizar la descarga de petróleo y gas, por separado.^[3]

G. Depurador

Es un recipiente con características físicas similares a los separadores, pero con elementos físicos internos adicionales que permiten eliminar los restos de las partículas de crudo en



suspensión en el gas proveniente de los separadores, y purificarlo. Por diseño, estos recipientes trabajan para eliminar humedad en el gas, para evitar el envío de líquidos a las Plantas Compresoras. En los depuradores se realiza la medición del gas total producido en la instalación. Estos cuentan con un sistema de control de nivel que evita el paso de líquidos al sistema de gas de la instalación. Adicionalmente, el sistema de protección consta de un interruptor neumático de nivel que actúa como respaldo al sistema de control y envía una señal para abrir la válvula de descarga y drenar los líquidos que se acumulan hacia los tanques de la estación (**Figura 2.15**).^[3]



Figura 2.15 Depuradores^[19]

Los depuradores son separadores que no poseen:

- Capacidad para hacer una separación gas-líquido cuando los volúmenes de líquido pueden ser apreciables.
- Tamaño suficiente para que el asentamiento por fuerzas gravitacionales sea óptimo.

La función básica de un depurador es remover pequeñas cantidades de líquido de una mezcla predominantemente gaseosa. Su diseño se fundamenta en la primera separación donde predominan elementos de impacto para remover partículas líquidas. El líquido puede estar íntimamente mezclado en el gas o en forma libre. Los valores de la constante K usados en el diseño de los depuradores para determinar la velocidad crítica son aproximadamente 2/3 mayores que los usados para un separador.^[20]

H. Calentador

Un calentador es un intercambiador de calor que aumenta la temperatura de una corriente, sin que normalmente ocurra un cambio de fase. Como fuente de calor puede utilizarse una corriente de servicio; tal como vapor de agua, aceite caliente, fluidos térmicos o líquidos químicos o una corriente de proceso de entalpía alta; por ejemplo: la descarga de un reactor operado a alta temperatura. La función básica de los calentadores es la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferente temperatura. El calor fluye, como



resultado del gradiente de temperatura, desde el fluido caliente hacia el frío a través de una pared de separación, la cual se le denomina superficie o área de transferencia de calor. Por otro lado, si los fluidos son inmiscibles, el área física de transferencia de calor puede ser eliminada, y la interfase formada entre los fluidos puede servir como área de transferencia de calor. ^[21]

I. Compresores

El propósito fundamental de una planta compresora de gas es comprimir el gas natural asociado al petróleo proveniente de los yacimientos para elevar su presión. Este gas natural es destinado a funciones como:

- Gas motriz en el levantamiento artificial.
- Gas combustible para consumo propio de la planta.
- Gas para las turbinas a gas instaladas en las plantas de inyección de agua.
- Suministro de gas a tierra para usos industriales y/o domésticos.

En plantas compresoras de gas formadas por tres etapas de compresión, cada etapa está constituida por un compresor, un enfriador y separador. El gas de alimentación ingresa al separador de entrada, con la finalidad de separar el gas del agua e hidrocarburos más pesados que hubiesen sido arrastrados en línea. El gas proveniente del separador de entrada es comprimido por las tres etapas de compresión. En cada etapa el gas es comprimido (compresor) para elevar su presión, enfriado (enfriador) para que la temperatura de descarga no exceda los parámetros de diseño de los equipos, y depurado (separador) para eliminar del gas los líquidos producidos por la condensación en enfriamiento. ^[22]

Los compresores son del tipo dinámico o de desplazamiento positivo (**Figura 2.16**). Los dinámicos incluyen centrífugos de flujo radial y axial y, en menor grado, los de emisión parcial para bajo flujo. Los tipos de desplazamiento positivo son de dos categorías básicas: reciprocantes y rotatorios. El compresor reciprocante tiene uno o más cilindros en los cuales hay un pistón o émbolo de movimiento alternativo, que desplaza un volumen positivo con cada carrera. Los rotatorios incluyen los tipos de lóbulos, espiral, aspas o paletas y anillo de líquido, cada uno con una carcasa, con uno o más elementos rotatorios que se acoplan entre sí, como los lóbulos o las espirales, o desplazan un volumen fijo en cada rotación. ^[23]

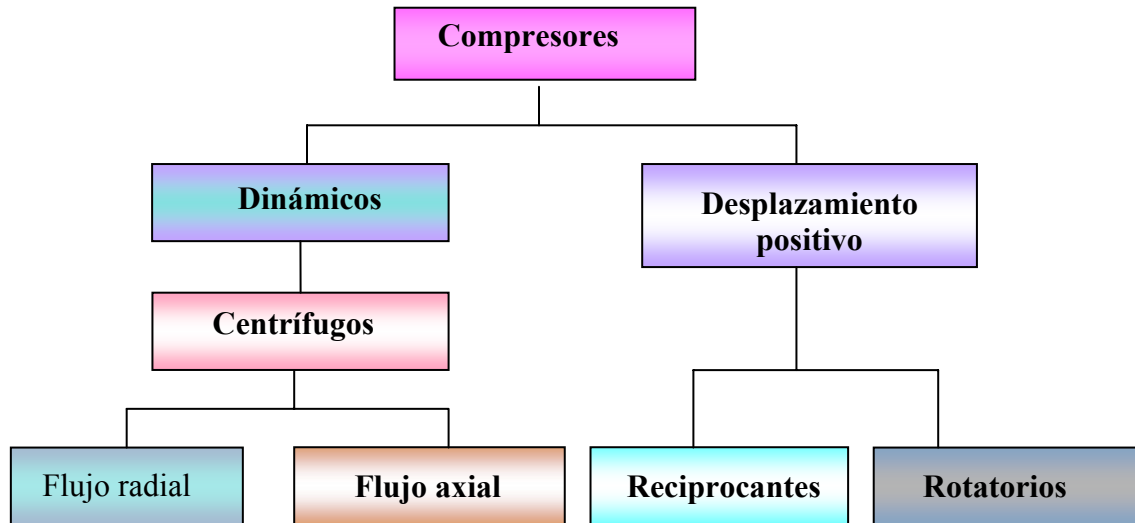


Figura 2.16 Tipos de Compresores para Procesos Químicos^[23]

J. Bombas de Transferencia

Son equipos que permiten impulsar o transmitir el fluido contenido en los tanques de almacenamiento y enviarlos a los Patios de Tanques, a través de tuberías asociadas a los sistemas de recolección de dicho fluido. El funcionamiento del sistema de bombeo en una estación de flujo, está controlado por una serie de interruptores instalados en la pared del tanque, estos interruptores abren o cierran un sistema eléctrico que permite la acción de las bombas.

Las bombas absorben energía mecánica y restituyen energía hidráulica al líquido que las atraviesa. Son utilizadas para enviar el crudo junto con el agua desde las estaciones de flujo por medio de tuberías secundarias, hacia los Patios de Tanques, donde será deshidratado y en algunos casos desalado, para que tengan las especificaciones requeridas para ser transportado a los terminales de embarque y/o refinería. Dentro de las bombas más comunes por la industria petrolera para la transmisión de crudo tenemos: bombas centrífugas y reciprocantes.^[3]

➤ Potencia Requerida por Bombas de Transferencia

La potencia se define como la rapidez con que se realiza un trabajo. En mecánica de fluidos se puede modificar este enunciado y considerar que la potencia es la rapidez con que la energía está siendo transferida a la unidad de potencia en el SI es el watt (W), que es equivalente a 1,0 N. m/s, para su cálculo se debe determinar cuántos Newtons de flujo están fluyendo por la bomba en un intervalo dado de tiempo. A esto se le conoce como rapidez de flujo de peso, W , se le expresa en unidades de N/s. La potencia se calcula multiplicando la energía transferida por Newton de fluido por la rapidez de flujo de peso. (Ec. 2.60):

$$P_A = h_A M \quad (\text{Ec. 2.60})$$

Pero como $M = \gamma Q$, se puede escribir también (Ec. 2.61):



$$P_A = h_A \gamma Q \quad (\text{Ec. 2.61})$$

En la que P_A representa la potencia añadida al fluido, γ es el peso específico del fluido que fluye por la bomba y Q es la rapidez de flujo de volumen del fluido (caudal).

La unidad de potencia en el Sistema Británico de Unidades es la lb-pie/s. Puesto que es una práctica común referirse a la potencia en caballos de fuerza (hp [Horse Power]), el factor de conversión requerido es:^{19]}

$$1hp = 550lb - pies / s$$

➤ Eficiencia Mecánica en las Bombas de Transferencia

El término eficiencia se utiliza para denotar el cociente de la potencia transmitida por la bomba al fluido entre la potencia suministrada por la bomba. Debido a las pérdidas de energía ocasionadas por la fricción mecánica en los componentes de la bomba, la fricción del fluido en la misma y la excesiva turbulencia del fluido que se forma en ella, no toda la potencia suministrada a la bomba es transmitida al fluido. Entonces, utilizando el símbolo e_M para representar la eficiencia mecánica se tiene (Ec. 2.62):

$$e_M = \frac{\text{Potencia transmitida al fluido}}{\text{Potencia puesta en la bomba}} = \frac{P_A}{P_I} \quad (\text{Ec. 2.62})$$

El valor de e_M siempre será menor que 1,0. El valor de eficiencia mecánica de las bombas depende no solamente de su diseño, sino también de las condiciones en las cuales está funcionando, particularmente, de la cabeza total y de la rapidez de flujo. Para las bombas que se utilizan en sistemas hidráulicos el intervalo de eficiencias va desde 70 hasta 90 por ciento. Para las bombas centrífugas utilizadas principalmente para transferir líquidos o hacerlos circular, el intervalo de eficiencias está comprendido entre 50 y 85 por ciento, aproximadamente.^{19]}

K. Tanques de Lavado

Son aquellos equipos mecánicos (recipientes), sometidos a una presión cercana a la atmosférica que reciben un fluido multifásico y son utilizados en la industria petrolera para completar el proceso de deshidratación de crudo dinámicamente, es decir, en forma continua; para la separación del agua del crudo.

Por lo general, antes de entrar a un tanque de lavado, las emulsiones son sometidas a un proceso de separación gas-líquido en separadores convencionales. Durante este proceso se libera la mayor parte del gas en solución. Esto permite que la cantidad de gas que se libera en un tanque de lavado sea relativamente pequeña.



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

El agua contenida en el crudo se puede separar en el tanque de lavado mediante gravedad. Sin embargo, cuando el agua y el crudo forman emulsiones, es necesario comenzar su tratamiento antes de que ingresen al tanque de lavado. Esto se hace generalmente mediante el uso de calor y/o química demulsificante.

Uno de los parámetros más importantes en el análisis de un tanque de lavado, es el tiempo de retención. Este se define como el tiempo que debe pasar la emulsión en el tanque, para que el petróleo y el agua se separen adecuadamente. Usualmente se requiere que el petróleo a su salida del tanque de lavado posea un promedio de agua igual o inferior a 1 %. Los tiempos de retención varían entre 4 y 36 horas.

En pruebas piloto se ha demostrado que la emulsión se canaliza en el tanque si existe una ruta directa entre su entrada y su salida. Cuando esto ocurre, la emulsión no pasa por ciertas regiones del tanque denominadas zonas muertas. En tanques de diámetros apreciables, aún con problemas de canalización, es posible obtener los tiempos de retención requeridos para una deshidratación adecuada. No obstante, para tanques de diámetros menores es necesario construir, en el interior del tanque, sistemas deflectores para solucionar el problema de la canalización. De esta forma se obtienen las mejoras en los tiempos de retención de asentamiento para que el grado de deshidratación sea el requerido. (Figura 2.17).^[24]

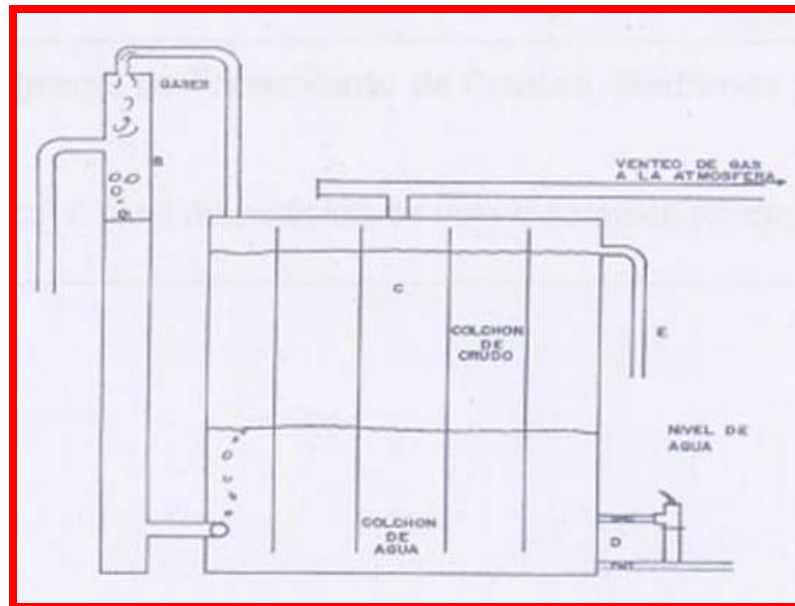


Figura 2.17 Tanque de Lavado^[24]

➤ Funcionamiento de un Tanque de Lavado

La mezcla de petróleo y agua entra por la parte superior, luego se hace circular por medio de canales conformados por bafles, lo que permite que el agua contenida en el petróleo y por diferencia de densidades el agua se deposita en la parte baja del tanque (este fenómeno



es conocido como coalescencia) permitiendo que el petróleo alcance el nivel más alto y rebose hasta el tanque de almacenamiento de crudo.

De esta manera, el petróleo que sale del tanque de lavado generalmente cumple con las especificaciones exigidas para ser transportado por oleoductos. Sin embargo, este petróleo pasa primeramente a los tanques de almacenamiento antes de entrar a los oleoductos. De esta forma se logra mejorar aún más el proceso de deshidratación, ya que parte de la fracción de agua que todavía permanece en el crudo, se asienta en el fondo del tanque de almacenamiento.^[24]

L. Estación de Descarga

La estación de descarga es el punto donde todo el petróleo es medido antes de bombearse por el oleoducto lateral al patio de tanques. Dichas estaciones reciben crudo de estaciones de flujo y de pozos individuales, están provistas de equipos destinados al tratamiento, almacenaje y bombeo del petróleo hasta los patios de tanques. Para el tratamiento, cuentan con separadores gas-crudo para las producciones limpias (libres de agua), sucias (con agua) y de prueba, además de calentadores y tanques de lavado o de estabilización.^[3]

M. Tanques de Almacenamiento del Crudo

Los tanques de almacenamiento se usan como depósitos para contener una reserva suficiente de algún producto para su uso posterior y/o comercialización (**Figura 2.18**). Los tanques para almacenamiento de crudo pueden ser construidos en dos estilos básicos: de techo cónico y de techo flotante. Los tanques de techo cónico tienen un techo fijo sobre la superficie del líquido a almacenar y son completamente cerrados, usualmente contienen una concentración de vapores entre la superficie del líquido y el techo del tanque. En los tanques de techo flotante, este techo flota sobre la superficie del líquido minimizando así las pérdidas por evaporación.

La última etapa de separación ocurre donde todavía se desprende gas del petróleo, a una presión levemente mayor o igual a la atmosférica. Además de un proceso tecnológico, la separación procura la mayor obtención de crudo que, por ende, significa la mayor extracción de petróleo del yacimiento y el consiguiente aumento de ingresos.^[4] Los tanques esféricos son utilizados para almacenar productos ligeros como gasolina, propano, etc. Su forma permite soportar presiones mayores de 25 lpca. Los demás tipos de tanques se utilizan para almacenar petróleo crudo, a presiones cercanas a la atmosférica.^[25]



Figura 2.18 Tanques de Almacenamiento del Crudo ^[25]

N. Planta de Inyección de Agua

La instalación de una planta de inyección de agua, en tierra firme, tiene como finalidad la inyección a alta presión de agua tratada a los yacimientos con fines de recuperación secundaria. En la **Figura 2.19** se observa el diagrama de flujo de una planta de inyección de agua. El proceso se inicia con la recolección del agua proveniente de la planta de tratamiento en el tanque de almacenamiento, el cual tiene como finalidad garantizar el suministro continuo de agua a la bomba de inyección, así como asegurar el suministro temporal en caso de falla del agua proveniente de la planta de tratamiento.

Este tanque es presurizado mediante un manto de gas que evita el contacto del agua tratada con el aire, para no permitir su oxidación. El gas se suministra al tanque desde el recipiente.

Las bombas succionan el agua desde el tanque y su descarga se inyecta a los pozos. Se considera que por cada pozo se requiere aproximadamente 4–5 MBAD, los pozos se encuentran a una distancia promedio de 2,5 km y el tendido de las líneas se realiza con tubería 4” API 5L Gr, SCH 80. Las presiones de descarga empleadas en este estudio varían de 1.200–2.000 lpca. ^[26]

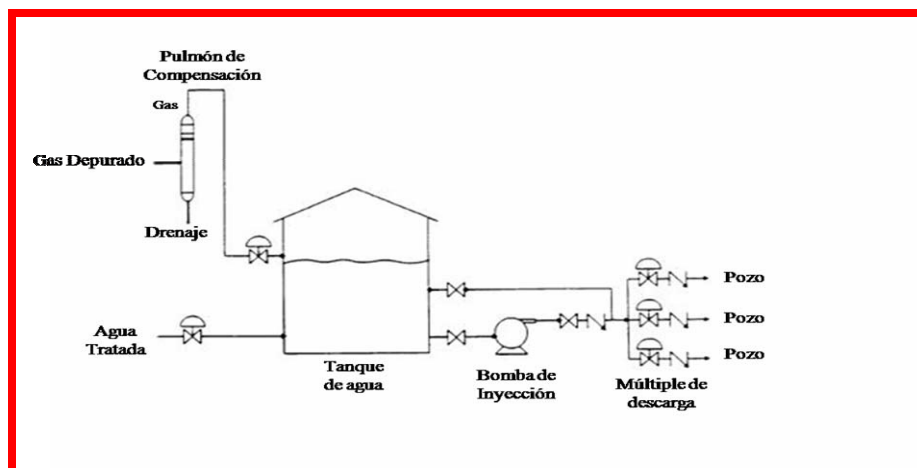


Figura 2.19 Diagrama de Flujo de una Planta de Inyección de Agua ^[26]



2.23 Restricciones (Cuellos de Botella)

Es una limitación o restricción al paso de fluido que se presentan en los elementos de la infraestructura (Bombas, Tuberías, Separadores, etc.) donde, producto de la cantidad de crudo o gas que se está manejando, o se quiere manejar, se incumplen las condiciones de diseño del equipo. Usualmente se refleja con un incremento de la presión. ^[2]

2.24 Redes de Tuberías

Una red es un arreglo entre tuberías conectadas unas a las otras, la cual se puede clasificar en red abierta, cerrada o mixta.

Una red abierta es un arreglo entre tuberías conectadas unas a las otras, de manera tal que no formen lazos entre las mismas (**Figura 2.20**).

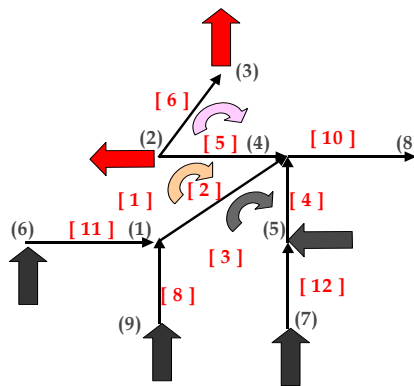


Figura 2.20 Red Abierta^[8]

Una red cerrada, está constituida únicamente por lazos de tuberías, perteneciendo cada una de ellas a uno o más lazos de la red (**Figura 2.21**).

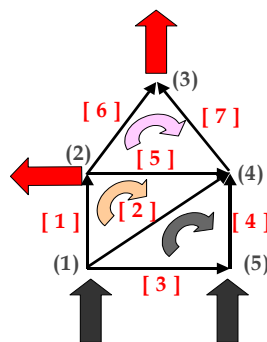


Figura 2.21 Red Cerrada^[8]

La combinación entre redes abiertas y cerradas forman una red mixta (**Figura 2.22**). Las siguientes figuras muestran de manera esquemática la estructura de las redes descritas.

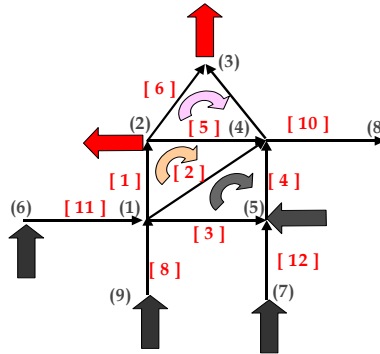


Figura 2.22 Red Mixta ^[8]

El punto de interconexión entre dos o más tuberías o los extremos de las mismas se denominan nodos, los cuales se representan por un paréntesis y se identifican por un carácter numérico, de manera similar a los nodos se identifican las tuberías, las cuales son representadas por corchetes. La representación e identificación de los nodos y tuberías se realizan de manera arbitraria, pero de forma consecutiva por conveniencia. ^[8]

2.24.1 Estructura de una Red de Tuberías

Una red consiste de un conjunto de tuberías $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ interconectadas entre sí por medio de sus nodos (n_i, n_f) , los cuales constituyen el conjunto $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ de los nodos de la red. Con base en esto, la red se representa por un conjunto formado por dos subconjuntos pertenecientes a las tuberías y a los nodos (**Ec. 2.63**):

$$R = \{T, N\} \quad (\text{Ec. 2.63})$$

Donde T y N están dadas por las **ecuaciones 2.64** y **2.65** respectivamente:

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, \dots, t_{n-1}, t_n\} \quad (\text{Ec. 2.64})$$

$$N = \{n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, \dots, n_{n-1}, n_n\} \quad (\text{Ec. 2.65})$$

Esta manera de expresar una red es conocida como grafo. El conjunto de tuberías y nodos puede mostrarse de manera ordenada o, por el contrario, en forma desordenada. Para el primer caso el grafo correspondiente será un grafo ordenado y todo lo contrario correspondería al segundo caso. Las **ecuaciones 2.66** y **2.67** expresarían un grafo ordenado, mientras que las **ecuaciones 2.68** y **2.69** corresponden a un grafo no ordenado:



$$T = \{t_6, t_3, t_1, t_4, t_2, t_5, \dots, t_{n-1}, t_n\} \quad (\text{Ec. 2.66})$$

$$N = \{n_5, n_1, n_3, n_4, n_6, n_2, \dots, n_{n-1}, n_n\} \quad (\text{Ec. 2.67})$$

$$T = \{t_1(n_i, n_f), t_2(n_i, n_f), t_3(n_i, n_f), \dots, t_{n-1}, t_n(n_i, n_f)\} \quad (\text{Ec. 2.68})$$

$$T = \{t_1(1, 2), t_2(1, 4), t_3(1, 5), \dots, t_{n-1}, t_7(4, 3)\} \quad (\text{Ec. 2.69})$$

La **Figura 2.23** muestra una red, donde el sentido del flujo en todas sus tuberías está dirigido desde el nodo inicial hasta el nodo final, el grafo definido por este arreglo, se denomina grafo dirigido.

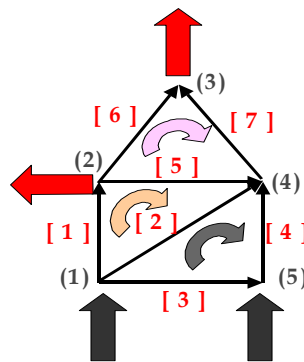


Figura 2.23 Red de Tuberías^[8]

Un caso particular se puede presentar cuando dos nodos estén conectados por más de una tubería, en tal caso constituye un conjunto de tuberías paralelas, esto es (**Ec. 2.70**):

$$T = \{t_1(1,2), t_2(1,2), t_3(2,3)\} \quad (\text{Ec. 2.70})$$

En la simulación de una red de tuberías se asume que todas sus tuberías y sus nodos están identificados, así como la interconexión entre ellos (tuberías y nodos). La orientación del flujo en las tuberías se fundamenta en la dirección de las tuberías definida por el sentido de flujo original entre sus nodos extremos.^[8]

2.2.4.2 Topología de una Red

Una matriz es la manera más sencilla y útil de representar a un grafo de una red de tuberías. Las matrices por sí solas, permiten manipulaciones matemáticas. La forma de contribución



de las matrices a la formulación de los sistemas de ecuaciones, que gobiernan a una red de tuberías se fundamentará sobre la red mostrada en la **Figura 2.24**.

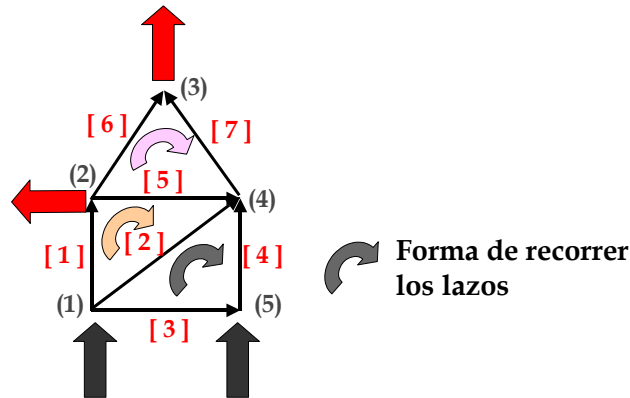


Figura 2.24 Grafo de una Red de Tuberías^[8]

Esta red consiste de dos nodos fuentes (1) y (5), dos nodos sumideros (2) y (3), y un nodo de transferencia (4) y siete tuberías o ramales [1], [2], [3], [4], [5], [6] y [7]. En una red es necesario seleccionar un nodo como nodo de referencia. Matemáticamente, el nodo de referencia es considerado independiente de los otros nodos, como consecuencia de esto los nodos restantes y las tuberías de la red se consideran dependientes del nodo de referencia o nodo raíz. Puesto que en una red de tubería es necesario conocer la presión en al menos unos de sus nodos, por lo tanto este nodo puede ser considerado como nodo raíz.

La interconexión entre las tuberías que forman la red pueden describir una trayectoria cerrada, formándose los lazos de una red, para la **Figura 2.25**, se tienen tres lazos descritos por las tuberías [2], [3] y [4] el primer lazo, por las tuberías [1], [5] y [2] el segundo lazo, mientras que el tercer lazo está definido por las tuberías [5], [6] y [7]. Los lazos 1 y 2 están interconectados por medio de la tubería [2], mientras que los lazos 2 y 3 lo están por medio de la tubería [5]. Los lazos 1 y 3 son lazos independientes, puestos que no comparten ni nodos ni tuberías.

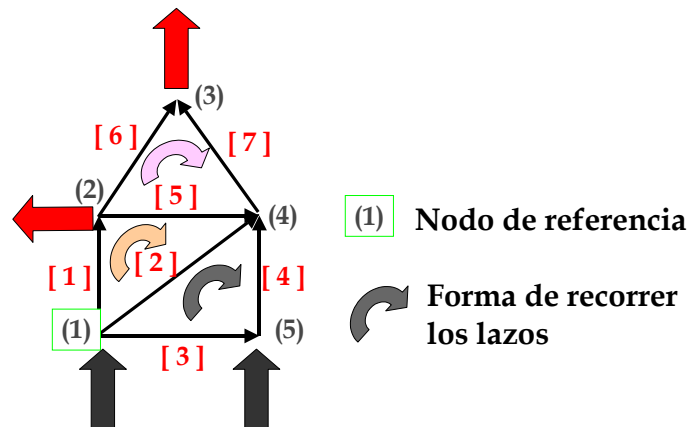


Figura 2.25 Nodo de Referencia en un Grafo de una Red de Tuberías^[8]

Para definir la topología e interpretación de una red, es necesario asignarle direcciones al sentido del fluido en cada tubería y en los lazos que forman la red, esta asignación se realiza en forma arbitraria, una de ellas consiste en designarle la dirección de una tubería igual al sentido del flujo que circula por ella, definida originalmente por medio de la especificación de sus nodos extremos, y la dirección de un lazo a la dirección correspondiente a la cuerda que constituye dicho lazo. Si el sentido de la tubería coincide con el correspondiente del lazo a la cual pertenece, se considera positivo; en caso contrario sería negativo.^[8]

2.24.3 Incidencia Nodo-Tubería

La interconexión entre nodos y sus tuberías incidentes o viceversa, permite describir el arreglo de incidencia entre nodos y tuberías que forman una red. Considerando el grafo $G = G(T,N)$, para especificar la incidencia entre un nodo y una tubería se utiliza el siguiente criterio, cuando exista la incidencia se utilizará la unidad, con un signo positivo si la tubería llega al nodo en estudio, si sale se utilizará el número menos uno y el cero para especificar la no incidencia. Para la red descrita por la **Figura 2.24**, las incidencias son:

| | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [6] | [7] |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (1) | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 |
| (3) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| (4) | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 |
| (5) | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 |

La incidencia nodo-tubería se puede especificar mediante una matriz $n \times m$, cuyo número de filas es igual al número de nodos n , mientras que el número de columnas sería el número de tuberías m . Cualquier elemento A_{ji} en la fila j y en la columna i de la matriz A corresponde al nodo j y a la tubería i .^[8]



2.25 Ecuación de Balance de Energía Mecánica

Considerando el flujo uniforme de un fluido incompresible bajo condiciones estacionarias a través de la tubería mostrada en la **Figura 2.26**.

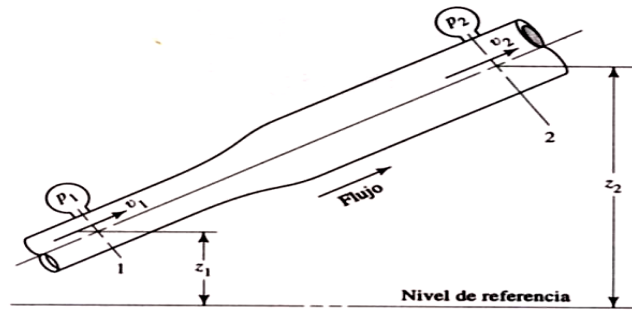


Figura 2.26 Sistema de Flujo de Fluido ^[8]

De la aplicación de estas consideraciones en la ecuación general de la energía, se tiene (Ec. 2.71):

$$\underbrace{\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g}}_{H_1} - h_L = \underbrace{\frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}}_{H_2} \quad (\text{Ec. 2.71})$$

Recordando que los términos que constituyen la **ecuación 2.71** están dimensionados en términos de longitud, de allí que reciben el nombre de cabeza o altura. Así, el término P/γ se conoce como cabeza o altura de presión, Z como altura o cabeza de elevación y a $V^2/2g$ cabeza o altura de velocidad. La suma de los tres términos ($P/\gamma + Z + V^2/2g$) se conoce como altura o cabeza total, mientras que la suma de los términos ($P/\gamma + Z$) se denomina altura o carga piezométrica. Así mismo la suma de ($P/\gamma + V^2/2g$) se denomina presión total o presión de estancamiento. La diferencia de las alturas totales representa la altura equivalente a las pérdidas de presión por fricción (**Ec. 2.72**):

$$H_1 - H_2 = \frac{fV^2L}{2gD} \quad (\text{Ec. 2.72})$$

Definiendo las energías en la entrada (**Ec. 2.73**) y la salida (**Ec. 2.74**), se tiene:

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \quad (\text{Ec. 2.73})$$



$$H_2 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (\text{Ec. 2.74})$$

Obteniendo el diferencial de energía en base al caudal (**Ec. 2.75**):

$$H_1 - H_2 = \frac{f 8 Q^2 L}{\pi^2 g D^5} \quad (\text{Ec. 2.75})$$

Despejando el caudal, se tiene (**Ec. 2.76**):

$$Q = \sqrt{\frac{\pi^2 g D^5 (H_1 - H_2)}{8 f L}} \quad (\text{Ec. 2.76})$$

Expresando el caudal en función de K, se tiene (**Ec. 2.77**):

$$Q = K \sqrt{(H_1 - H_2)} \quad (\text{Ec. 2.77})$$

En donde K viene dada por la **ecuación 2.78**:

$$K = \sqrt{\frac{D^5 \pi^2 g}{8 f L}} \quad (\text{Ec. 2.78})$$

La **ecuación 2.77** representa la ecuación fundamental de flujo de fluido incompresible a través de una tubería, esta ecuación también es conocida como la ecuación de balance de energía mecánica. Representa la relación entre las variables de flujo ΔH , Q y D, conocidas dos de ellas se puede determinar la tercera.^[8]

2.26 Formulación Nodal

La generación del sistema de ecuaciones bajo el esquema de la formulación nodal se fundamenta en la aplicación de la ecuación de continuidad en los nodos de la red y en expresar el sistema de ecuaciones en función del nivel de energía en los nodos de la red, para ello se hace uso de la ecuación de balance de energía mecánica para cada tubería que constituye la red. Considerando la red de tuberías descrita por la **Figura 2.27**.

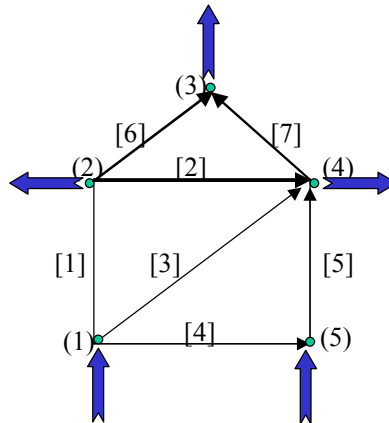


Figura 2.27 Red Cerrada de Tuberías ^[8]

En forma general:

I. Ecuación de continuidad en los nodos (**Ec. 2.79**):

$$\sum_{i=1}^n Q_i + Q_j = 0 \quad (\text{Ec. 2.79})$$

Donde i se refiere a la tubería que tiene incidencia con el nodo j.

II. Ecuación de balance de energía mecánica (**Ec. 2.77**) expresada para la tubería, i, se obtiene (**Ec. 2.80**):

$$Q_i = \left(K \sqrt{H_I - H_F} \right)_i \quad (\text{Ec. 2.80})$$

Donde:

I= inicial.

F=Final.

De la combinación de las **ecuaciones 2.79** y **2.80** se tiene la **ecuación 2.81**:

$$\sum_{i=1}^n \left(K \sqrt{H_I - H_F} \right)_i + Q_j = 0 \quad (\text{Ec. 2.81})$$

La **ecuación 2.81** representa la ecuación de continuidad en base al nivel de energía en los nodos (j) de la red de tubería. El sistema de ecuaciones que se genera mediante la aplicación de la **ecuación 2.81** representa el método de formulación nodal, es importante resaltar que para la generación de este sistema de ecuaciones solo es necesario conocer las



incidencias entre las tuberías y los nodos de la red, sin requerir información sobre los lazos de la red.

La solución del sistema de ecuaciones establecido por la aplicación de la **ecuación 2.81** en cada nodo de la red, se logra por medio de aproximaciones de los valores de los niveles de energía (H), hasta que se cumpla la **ecuación 2.81** en cada nodo. En cada una de las aproximaciones o iteraciones, el miembro izquierdo de la **ecuación 2.81** no es igual a cero. Por lo tanto, los valores de los niveles de energía son solamente aproximaciones a sus valores reales y los flujos de masa calculados a partir de estos niveles de energía no satisfacen las ecuaciones de continuidad en cada nodo de la red.

Una función error que represente el balance en la ecuación de continuidad debe ser definida, como muestra la **ecuación 2.82**:

$$f(e) = \sum_{i=1}^n \left(K \sqrt{H_I - H_F} \right)_i + Q_j \quad (\text{Ec. 2.82})$$

La solución del sistema de ecuaciones generado por la aplicación de la **Ec. 2.82** en los nodos de la red puede ser realizada por medio de varias técnicas, entre ellas:

- Método de sustituciones sucesivas o Hardy-Cross.
- Método de solución simultánea del sistema de ecuaciones.^[8]

2.26.1 Generación del Sistema de Ecuaciones Basado en la Formulación Nodal

En la generación del sistema de ecuaciones bajo el esquema de la formulación nodal es necesario disponer de las matrices de incidencias entre los nodos y las tuberías asociados con los mismos. Para la red descrita por la **Figura 2.28**, se ha considerado que la forma de recorrer los lazos es en el sentido horario (se puede especificar cualquier orientación de recorrido de los lazos), así como para las tuberías que forman los lazos y el sentido de flujo en las tuberías que forman los lazos.

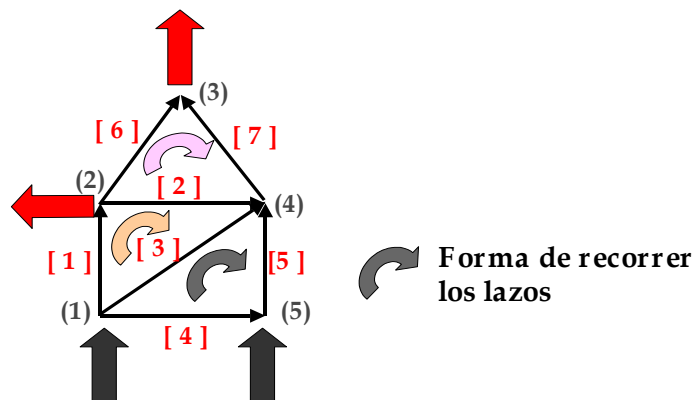


Figura 2.28 Red Cerrada de Tuberías^[8]



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Aplicando la ecuación de continuidad en los nodos de la red se tienen las **ecuaciones 2.83-2.87**):

$$\text{Nodo 1} \quad -Q_{[1]} - Q_{[3]} - Q_{[4]} + Q_{(1)} = 0 \quad (\text{Ec. 2.83})$$

$$\text{Nodo 2} \quad Q_{[1]} - Q_{[2]} - Q_{[6]} - Q_{(2)} = 0 \quad (\text{Ec. 2.84})$$

$$\text{Nodo 3} \quad Q_{[6]} + Q_{[7]} - Q_{(3)} = 0 \quad (\text{Ec. 2.85})$$

$$\text{Nodo 4} \quad Q_{[2]} + Q_{[3]} + Q_{[5]} - Q_{[7]} = 0 \quad (\text{Ec. 2.86})$$

$$\text{Nodo 5} \quad Q_{[4]} - Q_{[5]} + Q_{(5)} = 0 \quad (\text{Ec. 2.87})$$

Estructurando el sistema de ecuaciones de manera de considerar en el miembro izquierdo las tasas de flujo circulante por las tuberías y en el derecho la tasa de flujo externa que son intercambiados con el medio ambiente (**Ec. 2.88-2.89**):

$$-Q_{[1]} - Q_{[3]} - Q_{[4]} = -Q_{(1)} \quad (\text{Ec. 2.88})$$

$$Q_{[1]} - Q_{[2]} - Q_{[6]} = Q_{(2)} \quad (\text{Ec. 2.89})$$

$$Q_{[6]} + Q_{[7]} = Q_{(3)} \quad (\text{Ec. 2.90})$$

$$Q_{[2]} + Q_{[3]} + Q_{[5]} - Q_{[7]} = 0 \quad (\text{Ec. 2.91})$$

$$Q_{[4]} - Q_{[5]} = -Q_{(5)} \quad (\text{Ec. 2.92})$$

Haciendo uso de la matriz de incidencia entre tuberías y nodos se tiene (**Ec. 2.93**):



| | | Tuberías | | | | | | |
|-------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [6] | [7] |
| Nodos | (1) | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| | (2) | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| | (3) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | (4) | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | -1 |
| | (5) | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 |

(Ec. 2.93)

Haciendo uso de la representación matricial para las matrices descritas por las tasas de flujo circulante en cada tubería e intercambiadas en cada nodo se tiene **(Ec. 2.94)**:

Flujo de volumen en las tuberías

Flujo de volumen en los nodos

$$\begin{array}{c}
 \left| \begin{array}{c} Q_{[1]} \\ Q_{[2]} \\ Q_{[3]} \\ Q_{[4]} \\ Q_{[5]} \\ Q_{[6]} \\ Q_{[7]} \end{array} \right|
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{c}
 \left| \begin{array}{c} Q_{(1)} \\ Q_{(2)} \\ Q_{(3)} \\ Q_{(4)} \\ Q_{(5)} \end{array} \right|
 \end{array}
 \qquad
 \text{(Ec. 2.94)}$$

Combinando las expresiones matriciales para representar el sistema de ecuaciones descrito por las **ecuaciones 2.93 y 2.94** se tiene **(Ec. 2.95)**:



$$\begin{array}{c}
 \left| \begin{array}{cccccc} -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{array} \right| \begin{array}{c} Q_{[1]} \\ Q_{[2]} \\ Q_{[3]} \\ Q_{[4]} \\ Q_{[5]} \\ Q_{[6]} \\ Q_{[7]} \end{array} = - \begin{array}{c} Q_{(1)} \\ Q_{(2)} \\ Q_{(3)} \\ Q_{(4)} \\ Q_{(5)} \end{array} \quad (\text{Ec. 2.95}) \\
 \text{A} \qquad \qquad \qquad \text{M} \qquad \qquad \qquad \text{L}
 \end{array}$$

Matriz de Incidencias

Vector de flujo de volumen en Tuberías

Vector de flujo de volumen en nodos

Luego, se puede escribir la **ecuación 2.96**, como sigue:

$$A \cdot M = -L. \quad (\text{Ec. 2.96})$$

También se puede representar el producto de la matriz con el vector como (**Ec. 2.97**):

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} m_i = -L_j \quad (\text{Ec.2.97})$$

Donde:

- i Se refiere a la tubería, que tiene incidencia con el nodo j; estos tomarán valores de 1 si la tubería llega al nodo, -1 si sale del nodo y 0 si no tiene incidencia.
- j Se refiere al nodo.
- a_{ij} Coeficiente de la matriz, que representa la incidencia entre las tuberías y los nodos.
- n Número total de tuberías.

La transformación de la **ecuación 2.95** ó **2.96** en función de los niveles de energía en los nodos requiere del uso de la ecuación de balance de energía mecánica a cada tubería (**Ec. 2.77**). Expresando la función error para cada nodo de la red que representa el balance en la ecuación de continuidad para la red en estudio, se tiene (**Ec. 2.98- 2.102**):



$$\text{Nodo 1. } f(e_1) = -K_{[1]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(2)}} - K_{[3]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(4)}} - K_{[4]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(5)}} + Q_{(1)} \quad (\text{Ec.2.98})$$

$$\text{Nodo 2. } f(e_2) = K_{[1]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(2)}} - K_{[2]}\sqrt{H_{(2)} - H_{(4)}} - K_{[6]}\sqrt{H_{(2)} - H_{(3)}} - Q_{(2)} \quad (\text{Ec. 2.99})$$

$$\text{Nodo 3. } f(e_3) = K_{[6]}\sqrt{H_{(2)} - H_{(3)}} + K_{[7]}\sqrt{H_{(4)} - H_{(3)}} - Q_{(3)} \quad (\text{Ec. 2.100})$$

$$\text{Nodo 4. } f(e_4) = K_{[2]}\sqrt{H_{(2)} - H_{(4)}} + K_{[3]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(4)}} + K_{[5]}\sqrt{H_{(5)} - H_{(4)}} - K_{[7]}\sqrt{H_{(4)} - H_{(3)}} - Q_{(4)} \quad (\text{Ec. 2.101})$$

$$\text{Nodo 5. } f(e_5) = K_{[4]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(5)}} - K_{[5]}\sqrt{H_{(5)} - H_{(4)}} + Q_{(5)} \quad (\text{Ec. 2.102})$$

La solución del sistema de ecuaciones generado por la aplicación de la **ecuación 2.82** en los nodos de la red se realiza por medio del método de sustituciones sucesivas o Hardy-Cross. La solución consiste en superponer una distribución inicial de niveles de energía H en cada nodo de la red. Esta aproximación es corregida inmediatamente y de manera sucesiva hasta que la solución sea alcanzada. ^[8]

2.27 Metodología de Newton

Como medio para acelerar el proceso de convergencia, se hace uso de la metodología de Newton definida por la relación entre el valor del vector H en la iteración I+1 a partir de los valores de dicho vector y el de su cambio en la iteración I, relacionados por la **ecuación 2.103**:

$$H^{I+1} = H^I + (\delta H)^I \quad (\text{Ec. 2.103})$$

El término δH se obtiene de la relación dada por la **ecuación 2.104**:

$$J^I (\delta H)^I = -[f(e)]^I \quad (\text{Ec. 2.104})$$

Donde la matriz J está dada por la matriz del Jacobiano definido por la **ecuación 2.105**.^[8]



$$\mathbf{J} = \begin{vmatrix} J_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{55} \end{vmatrix} \quad (\text{Ec. 2.105})$$

Con:

$$J_{11} = -\frac{1}{2} \left(\frac{m_{[1]}}{(\Delta H)_{[1]}} + \frac{m_{[3]}}{(\Delta H)_{[3]}} + \frac{m_{[4]}}{(\Delta H)_{[4]}} \right)$$

$$J_{22} = -\frac{1}{2} \left(\frac{m_{[1]}}{(\Delta H)_{[1]}} + \frac{m_{[2]}}{(\Delta H)_{[2]}} + \frac{m_{[6]}}{(\Delta H)_{[6]}} \right)$$

$$J_{33} = -\frac{1}{2} \left(\frac{m_{[6]}}{(\Delta H)_{[6]}} + \frac{m_{[7]}}{(\Delta H)_{[7]}} \right)$$

$$J_{44} = -\frac{1}{2} \left(\frac{m_{[2]}}{(\Delta H)_{[2]}} + \frac{m_{[3]}}{(\Delta H)_{[3]}} + \frac{m_{[5]}}{(\Delta H)_{[5]}} + \frac{m_{[7]}}{(\Delta H)_{[7]}} \right)$$

$$J_{55} = -\frac{1}{2} \left(\frac{m_{[4]}}{(\Delta H)_{[4]}} + \frac{m_{[5]}}{(\Delta H)_{[5]}} \right)$$

2.28 Metodología de Sustituciones Sucesivas (Hardy-Cross).

La solución del sistema de ecuaciones por medio de sustituciones sucesivas se fundamenta en el desarrollo de la **ecuación 2.82**, anteriormente descrita. Si se supone que el nivel de energía del nodo inicial de la tubería está subestimado o sobre estimado, por lo tanto es necesario perturbarlo de manera que se tiene (**Ec. 2.106**):

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \left(K \sqrt{H_I - H_F + (\Delta H)_I} \right)_i \quad (\text{Ec. 2.106})$$

Desarrollando el binomio, se obtiene las **ecuaciones 2.107** y **2.108**:



$$(H_I - H_F + (\Delta H)_I)^{1/2} \cong (H_I - H_F)^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{(\Delta H)_I}{(H_I - H_F)^{1/2}} \quad (\text{Ec. 2.107})$$

$$\sum_{i=1}^n \left(K(H_I - H_F)^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{K(\Delta H)_I}{(H_I - H_F)^{1/2}} \right) = \sum_{i=1}^n Q_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(H_I - H_F)_i} (\Delta H)_I \quad (\text{Ec. 2.108})$$

Sustituyendo en la ecuación de continuidad se tiene **(Ec. 2.109)**:

$$f(e) = \sum_{i=1}^n Q_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(H_I - H_F)_i} (\Delta H)_I + Q_j \quad (\text{Ec. 2.109})$$

Despejando el incremento del nivel de energía en el nodo I, se tiene **(Ec. 2.110)**:^[8]

$$(\Delta H)_I = - \frac{2 \sum_{i=1}^n Q_i + 2Q_j - 2f(e)}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(H_I - H_F)_i}} \quad (\text{Ec. 2.110})$$

2.29 Planificación

Compendio de oportunidades relacionadas con la exploración y explotación de un área geográfica específica, incluyendo las actividades, recursos e inversiones necesarias para extraer las reservas de hidrocarburos de manera racional (Responsable del proceso: Gerencia de Planificación, Presupuesto y Gestión). En este proceso se realiza la planificación estratégica, táctica y operacional de actividades y proyectos para la obtención de la infraestructura requerida que apalanque el cumplimiento de la volumetría y el crecimiento integral previsto en los planes de desarrollo. Durante este proceso, se generan el Portafolio de Oportunidades (PDO) y Plan de Negocios (PDN).^[27]

2.29.1 Ciclo de Planificación

Período en el cual se desarrollan las diferentes actividades que involucran las fases de planificación de la Industria Petrolera. Abarca desde el Análisis del Entorno Nacional e Internacional, Ejercicios Estratégicos, Elaboración de Base de Recursos, Portafolio de Oportunidades, Plan de Negocios, Análisis y Formulación de Bases Presupuestarias. En la **Figura 2.29** se describe el ciclo de planificación.^[27]

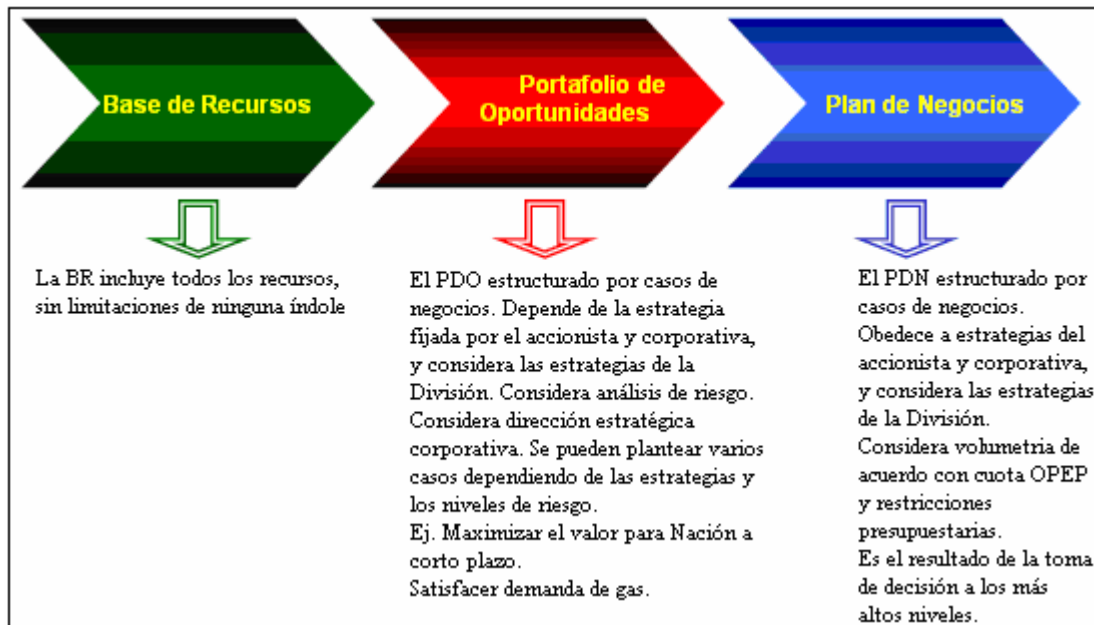


Figura 2.29 Ciclo de Planificación ^[27]

A. Base de Recursos

Etapa del Ciclo de Planificación que permite identificar y establecer las diferentes oportunidades de generación de potencial de petróleo y gas, considerando la utilización de todos los recursos en un horizonte de 20 años y sin limitaciones financieras. En este proceso inicial del ciclo de planificación se integra el inventario de activos (Subsuelo y Superficie) y sus perfiles de explotación aprobados durante el ciclo de planificación anterior. La base de recursos queda conformada con:

- Inventario de pozos.
- Inventario de instalaciones de superficie.
- Balance de reservas.
- Plan de explotación óptimo de cada yacimiento. ^[27]

B. Portafolio de Oportunidades (PDO)

Etapa del ciclo de planificación que permite identificar y establecer las diferentes oportunidades de generación de potencial de petróleo y gas a la capacidad de ejecución operacional requerida. Depende de la estrategia fijada por el accionista y corporativa. Representa el proceso del ciclo de planificación anual durante el cual se identifica y establece la cartera óptima actualizada de las diferentes oportunidades de generación de potencial de petróleo y gas, con base en la disponibilidad de reservas, a la capacidad de ejecución operacional sin limitaciones financieras ni de mercado, sometidas ante PDVSA por los Negocios y Filiales para establecer los objetivos y metas trazadas en un horizonte de 20 años. ^[27]



C. Plan de Negocios (PDN)

Comprende las acciones o decisiones a ser ejecutadas por las unidades de negocios de Exploración y Producción, para conseguir los objetivos y metas de la empresa en un período de seis (6) años. El PDN se origina a partir del PDO y establece las bases del presupuesto con todas las actividades incluidas en el ciclo de planificación.

El Plan de Negocios representa un proceso del ciclo de planificación anual posterior al Portafolio de Oportunidades, durante el cual se seleccionan los paquetes óptimos de la cartera del PDO aprobado basado en criterios estratégicos y en la jerarquización de oportunidades considerando restricciones financieras y de mercado. Esto permite establecer las mejores oportunidades de generación de potencial de petróleo y gas, con base en la disponibilidad de reservas, a la capacidad de ejecución técnica y operacional bajo un escenario condicionado por limitantes financieras y de mercado. Como resultado, se establecen las bases del presupuesto y el compromiso de realizar las actividades seleccionadas y aprobadas en un horizonte de seis años.^[27]

2.30 Simulador PIPEPHASE

Es un poderoso y útil simulador de flujo de fluidos multifásicos para predecir presiones, temperaturas y “holdup” de líquidos en pozos, líneas de flujo, sistemas de distribución y almacenaje. Es usado para diseñar nuevos sistemas de tuberías, sistemas de corrientes monitoreadas y prevenir o solucionar problemas determinados. Para iniciar una simulación en PIPEPHASE se debe:

- 1) Abrir una simulación existente, seleccionando Open desde el menú File. O crear una nueva simulación seleccionando New desde el menú File.
- 2) Si es una nueva simulación debe continuar con los pasos siguientes.
- 3) Seleccionar una carpeta o sitio del disco duro del computador donde PIPEPHASE archivará la simulación, seguidamente debe darle un nombre.
- 4) Seleccionar el tipo de simulación y tipo de fluido.
- 5) Seleccionar las unidades de medidas que se emplearan en la simulación.
- 6) Realizar el esquema de la simulación para su posterior corrida.^[28]

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 EMPLEO DE LA ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS DE TUBERÍA EN SERIE.

La mayoría de los sistemas de flujo de tubería involucran grandes pérdidas de energía por fricción y pérdidas menores. Las pérdidas menores debidas a la presencia de válvulas y conectores ya que éstas se considerarán pequeñas en comparación a las pérdidas por fricción en las tuberías. Si el sistema es arreglado de tal forma que el fluido fluye a través de una línea continua sin ramificaciones, éste se conoce con el nombre de sistema en serie. Se asumirá conductos con secciones transversales circulares y rugosidad, ϵ , igual a $4,6 \times 10^{-5}$ m para tubería de acero comercial. No se tomarán en cuenta los efectos de la transferencia de calor hacia o fuera del fluido, ya que son despreciables en los tipos de problemas que se estudian. Se considera un flujo estable. Se asume que el término velocidad indica la velocidad promedio del flujo. Para la solución de sistemas en serie se usa la ecuación general de la energía (**Ec. 2.27**), con esta ecuación se podrán conocer las pérdidas o adiciones de energía, la velocidad de flujo de volumen y el diámetro de la tubería.

3.1.1 Aplicación de la Ecuación General de la Energía para el Cálculo de la Energía Adicionada al Sistema.

A continuación se muestra un sistema de flujo de fluido el cual se estudia mediante la aplicación de la ecuación de general de energía en la Estación de Flujo Orocal 1. Se calcula la potencia proporcionada a la bomba que se muestra en la **Figura 3.1**. Se encuentra fluyendo $0,0920 \text{ m}^3/\text{s}$ (50MBD) de petróleo liviano a 100°F . La línea de succión es una tubería de acero estándar de 12 pulgadas y de 30 metros de largo. La línea de descarga es de 6 pulgadas y tiene una longitud de 200 metros.

Para la solución de este sistema se toman en cuenta las pérdidas menores ocasionadas por la válvula y codos así como también las entradas y salidas de los tanques. Según la **Tabla A.3** el diámetro interno de la tubería de succión es de 12 pulgadas. Mientras que el diámetro interno de la tubería de descarga es de 6,065 pulgadas.

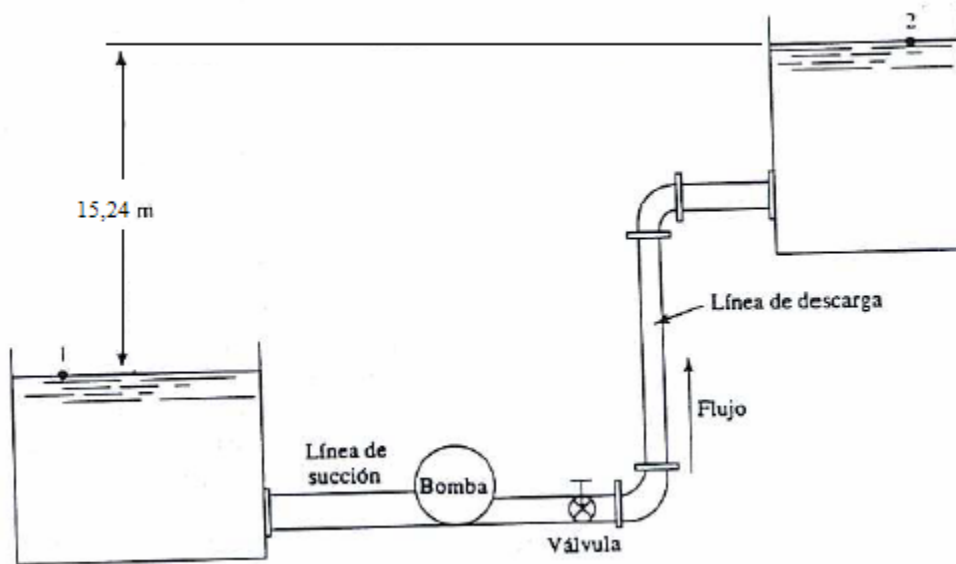


Figura 3.1 Sistema de Flujo de Fluido en la Estación de Flujo Orocual 1

Para comenzar a resolver, se escribe la ecuación de la energía del sistema (Ec. 2.27). Utilizando las superficies de los depósitos como puntos de referencia, se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Puesto que $P_1=P_2=0$ y V_1 y V_2 son aproximadamente cero, la ecuación puede simplificarse en la ecuación 3.1:

$$Z_1 + h_A - h_L = Z_2 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Debido a que el objetivo es calcular la potencia proporcionada a la bomba, se despeja la cabeza total como se muestra en la ecuación 3.2:

$$h_A = Z_2 - Z_1 + h_L \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Existen seis componentes a considerar en la pérdida total de energía (h_L), El subíndice s indica la línea de succión y el subíndice d indica la línea de descarga. La pérdida total de energía sería entonces la suma de los seis componentes de pérdida dados por la pérdida en la entrada de la tubería de succión, pérdida por fricción en la línea de succión, válvula, codos, pérdida por fricción en la línea de descarga y pérdida en la entrada del tanque. (Ver ecuación 3.3):



$$h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Puesto que se requiere la cabeza de velocidad de la línea de succión y descarga para cada pérdida de energía, se despeja la velocidad de la **ecuación 2.9**, obteniendo la **ecuación 3.4**:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

El área se obtiene de la **Tabla A.3**, aplicando la **ecuación 3.4** en la succión y en la descarga se obtienen los siguientes resultados:

$$V_s = \frac{Q}{A_s} = \frac{0,0920m^3 / s}{0,0730 m^2} = 1,2603m / s(4,1348pie / s)$$

$$V_d = \frac{Q}{A_d} = \frac{0,0920m^3 / s}{0,0186 m^2} = 4,9462m / s(16,2277pie / s)$$

Para calcular las pérdidas por fricción en la línea de succión y en la línea de descarga, se necesita el número de Reynolds (**Ec. 2.29**) y el factor de fricción de cada tubería. Para el petróleo liviano a 100°F, $\rho=54,03216 \text{ lb/pie}^3$ y $\mu=0,005954 \text{ lb/pie.s}$ se tiene el siguiente número de Reynolds en la línea de succión:

$$R_{es} = \frac{4,1348pie / s * 1pie * 54,03216lb / pie^3}{0,005954lb / pie.s}$$

$$R_{es} = 37.523,0392$$

Aplicando la **ecuación 2.31** para el cálculo del factor de fricción para flujo turbulento se tiene:

$$f_s = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(0,3048m / 0,000046m)} + \frac{5,74}{37.523,0392^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f_s = 0,0227 \quad \Longrightarrow \text{Ver Figura B.2}$$

Aplicando la **ecuación 2.29** en la línea de descarga, se tiene:



$$R_{ed} = \frac{16,2277 \text{ pie} / \text{s} * 0,5054 \text{ pie} * 54,03216 \text{ lb} / \text{pie}^3}{0,005954 \text{ lb} / \text{pie} \cdot \text{s}}$$

$$R_{ed} = 74.427,8900$$

Por lo tanto el flujo en ambas líneas es turbulento, evaluando el factor de fricción f_d mediante la aplicación de la **ecuación 2.31**, se obtiene:

$$f_d = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(0,1540 \text{ m} / 0,000046 \text{ m})} + \frac{5,74}{74.427,8900^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f_d = 0,0204 \text{ (Ver Figura B.1)}$$

Regresando a los cálculos de pérdida de energía, se evalúa la pérdida de energía a la entrada, para una entrada de orilla cuadrada $K=0,5$, evaluando la pérdida mediante la **ecuación 3.5**:

$$h_1 = K * \frac{V_s^2}{2g} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$h_1 = 0,5 * 0,0809 = 0,0404 \text{ m}$$

Ahora se evalúa la pérdida de energía en la succión mediante la aplicación de la **ecuación 2.28** como sigue:

$$h_2 = h_{LS} = 0,0227 \left(\frac{30 \text{ m}}{0,3048 \text{ m}} \right) \left(\frac{(1,2603 \text{ m} / \text{s})^2}{2 * 9,81 \text{ m} / \text{s}^2} \right)$$

$$h_2 = h_{LS} = 0,1808 \text{ m}$$

La relación de longitud equivalente Le/D para una válvula de globo completamente abierta es de 340. El factor de fricción es $f_{dt}=0,019$, se tiene la **ecuación 3.6**:

$$h_3 = f_{dt} * \frac{Le}{D} * \frac{V_d^2}{2g} \quad (\text{Ec. 3.6})$$



$$h_3 = 0,019 * 340 * 1,2469 = 8,0549m$$

Para codos estándar de 90° Le/D es igual a 30, el valor de $f_{dt}=0,019$, aplicando la **ecuación 3.5** se tiene:

$$h_4 = 2 * 0,019 * 30 * 1,2469 = 1,4215m$$

Evaluando la pérdida de energía en la descarga mediante la aplicación de la **ecuación 2.28** como sigue:

$$h_5 = h_{Ld} = 0,0204 \left(\frac{200 m}{0,1541 m} \right) \left(\frac{(4,9462 m/s)^2}{2 * 9,81 m/s^2} \right)$$

$$h_5 = h_{Ld} = 33,0143 m$$

La pérdida a la salida es (**Ec. 3.5**):

$$h_6 = 01 * 1,2469 = 1,2469m$$

Sustituyendo los valores de h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 y h_6 en la **ecuación 3.3** se tiene:

$$h_L = (0,0404 + 0,1808 + 8,0549 + 1,4215 + 33,0143 + 1,2469)m$$

$$h_L = 43,9588 m$$

Sustituyendo h_L en la **ecuación 3.2** se tiene:

$$h_A = 15,2400 m + 43,9588 m = 59,1988 m$$

Ahora se calcula la potencia de la bomba (**Ec. 2.61**):

$$Potencia = 59,1988m * 8.490,6938 N/m^3 * 0,0920 m^3/s$$

$$Potencia = 46,2427 KW (62,0124HP)$$

En caso de no haber tomado en cuenta las pérdidas menores, se obtendría una potencia de bomba igual a 37,8348 KW (50,7372 HP)



Repitiendo los cálculos aumentando la tubería de descarga de 6 pulgadas a 8 pulgadas, se obtiene una energía $h_A = 34,8175$ m y una potencia de 27,1975 KW (36,4724 HP). En caso de no haber tomado en cuenta las pérdidas menores se obtendría una potencia de bomba igual a 18,7898KW (25,1975 HP).

3.2 PRESENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD Y CAUDAL DE FLUJO PERMITIDO EN UNA TUBERÍA.

Siempre que se desconozca la velocidad de flujo de volumen en el sistema, se analizará el funcionamiento del sistema por un procedimiento llamado iteración. Esto se requiere debido a que hay muchas cantidades desconocidas para utilizar el procedimiento de solución directo. Si la velocidad del flujo de volumen se desconoce, entonces la velocidad de flujo también se desconoce. Se deduce que el número de Reynolds se desconoce puesto que éste depende de la velocidad. Si no se puede encontrar el número de Reynolds, entonces el factor de fricción, f , no puede determinarse directamente. Puesto que las pérdidas de energía debido a la fricción dependen tanto de la velocidad como del factor de fricción, el valor de estas pérdidas no puede calcularse en forma directa.

La iteración supera estas dificultades. Es un método de solución del tipo prueba y error en el cual se asume un valor de prueba para el factor de fricción desconocido, f , permitiendo el cálculo de una velocidad de flujo correspondiente. El procedimiento proporciona una forma de verificar la exactitud del valor de prueba de f y también indica el nuevo valor de prueba a utilizarse si se requiere un ciclo de cálculo adicional. Este procedimiento para determinar la velocidad de flujo de volumen se presenta paso a paso a continuación:

1. Escribir la ecuación de energía del sistema.
2. Evaluar las cantidades conocidas tales como las cabezas de presión y las cabezas de elevación.
3. Expresar las pérdidas de energía en términos de la velocidad desconocida, V , y el factor de fricción, f . (**Ec. 2.28**).
4. Despejar la velocidad en términos de f , (**Ec. 3.7**):

$$V = \sqrt{\frac{2g * h_L * D}{f * L}} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

5. Expresar el número de Reynolds en términos de la velocidad (**Ec. 2.29**).



6. Calcular la rugosidad relativa D/ϵ (**Figura B.3**).
7. Seleccionar un valor de prueba f basado en el valor conocido D/ϵ y un número de Reynolds en el rango de turbulencia. Utilizar $f = 0,020$.
8. Calcular la velocidad, utilizando la **ecuación 3.7**.
9. Calcular el número de Reynolds (**Ec. 2.29**).
10. Evaluar el factor de fricción f para el número de Reynolds del paso 9 y el valor conocido de D/ϵ , mediante la **ecuación 2.31**.
11. Si el nuevo valor de f es diferente del valor utilizado en el paso 8, repetir los pasos 8 al 11 utilizando el nuevo valor de f .
12. Si no se presenta ningún cambio significativo en f del valor asumido, entonces la velocidad que se encontró es correcta.
13. Calcular el caudal (**Ec. 2.9**).¹⁹¹

3.2.1 Aplicación del Procedimiento Iterativo para la Determinación de la Velocidad y Caudal Permitido en una Tubería.

A continuación se aplicará el procedimiento previamente descrito para el cálculo de la velocidad y caudal de flujo para la tubería de descarga en la Estación de Flujo Orocual 1 (**Figura 3.2**). Un crudo liviano deberá ser bombeado a través de una tubería de acero horizontal de 8 pulgadas con una caída máxima de presión de 180 KPa (26,1067 psi) por 200 m de tubería. El petróleo tiene un peso específico de $8.490,6938 \text{ N/m}^3$ y una viscosidad dinámica de $0,0089 \text{ kg/m.s}$ ($8,900\text{cP}$).

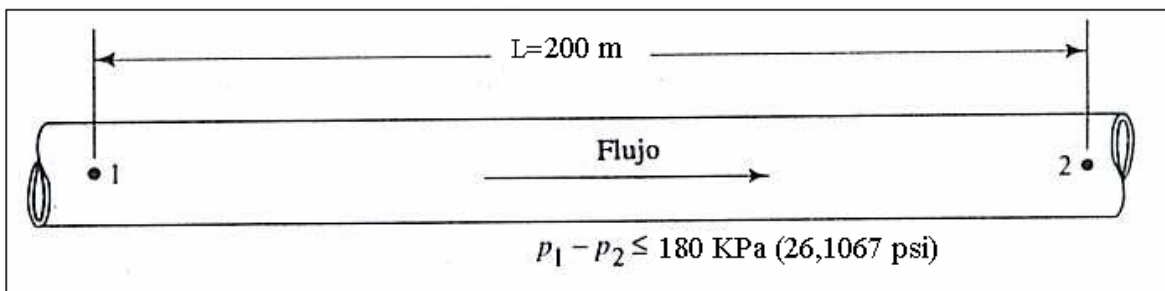


Figura 3.2 Puntos de Referencia para el Sistema de Flujo en la Estación de Flujo Orocual 1

1. Ecuación de energía del sistema.



Se tiene una tubería horizontal en donde no hay adición de energía al sistema, por lo tanto $h_A=0$, quedando:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Debido a que $Z_1=Z_2$ y $V_1=V_2$, queda la **ecuación 3.8**:

$$\frac{P_1}{\gamma} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} \quad (\text{Ec.3.8})$$

Despejando h_L queda la **ecuación 3.9**:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = h_L \quad (\text{Ec.3.9})$$

2. Evaluación de las cantidades conocidas tales como las cabezas de presión y las cabezas de elevación.

Se evalúa la diferencia de presión en la cabeza (**Ec.3.7**) para una caída de presión máxima permitida de 12.600 KPa.

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{180.000 N / m^2}{8.490,6938 N / m^3} = 21,1997 m$$

3. Las pérdidas de energía están expresadas en términos de la velocidad desconocida, V , y el factor de fricción, f mediante la **ecuación 2.28**.

4. Se aplica la **ecuación 3.7**. Sustituyendo los valores $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $h_L=21,1997 \text{ m}$, $D=0,2027 \text{ m}$, y $L= 200 \text{ m}$, se tiene:

$$V = \sqrt{\frac{2 * 9,81 * 21,1997 * 0,2027}{f * 200}}$$

$$V = \sqrt{\frac{0,4216}{f}}$$

5. Sabiendo que $D= 0,2027 \text{ m}$, $\mu=0,0089 \text{ kg/m.s}$, y $\rho=865,5142 \text{ kg/m}^3$ y aplicando la **ecuación 2.29**, entonces queda:



$$\text{Re} = \frac{V * 0,2027 * 865,5142}{0,0089}$$

$$\text{Re} = 19.712,3290 * V$$

6. Cálculo de la rugosidad relativa D/ϵ .

$$D / \epsilon = 0,2027m / 0,000046m$$

$$D / \epsilon = 4.406,5217$$

7. Se selecciona un valor de prueba $f = 0,020$.

8. Cálculo de la velocidad, utilizando la **ecuación 3.7**:

$$V = \sqrt{\frac{0,4216}{0,020}} = 4,5913m / s$$

9. Cálculo del número de Reynolds.

$$\text{Re} = 19.712,3290 * V = 19.712,3290 * 4,5913 = 90.505,2161$$

10. Evaluación del factor de fricción, f , para el número de Reynolds del paso 9 y el valor conocido de D/ϵ , mediante la **ecuación 2.31**:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(4.406,5217)} + \frac{5,74}{90.505,2161^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,0194 \text{ (Ver Figura B.1)}$$

11. El nuevo valor del factor de fricción es diferente al asumido inicialmente, entonces se repiten los pasos 8 al 11 utilizando el nuevo valor de f , obteniendo lo siguiente:

$$V = 4,6618 m / s$$

$$\text{Re} = 91.894,9353$$



$$f = 0,0194 \text{ (Ver Figura B.1)}$$

12. No se presenta cambio significativo en el valor asumido de f , entonces la velocidad = 4,6615 m/s es la correcta.

13. Cálculo del caudal (Ec. 2.9):

$$Q = 4,6618 \text{ m/s} * 0,0323 \text{ m}^2$$

$$Q = 0,1506 \text{ m}^3 / \text{s} \text{ (81,8420 MBD)}$$

3.2.2 Método Computacional

Este método evita la necesidad de utilizar iteración para la solución cuando solamente están involucradas pérdidas de energía debido a la fricción. El método fue originalmente desarrollado por Swamee y Jain. La máxima velocidad de flujo de volumen permisible que una tubería determinada puede transportar, limitando la pérdida de energía a un valor máximo específico viene dada por la **ecuación 3.8**:^[9]

$$Q = -2,22D^2 \sqrt{\frac{gDh_L}{L}} \log \left[\frac{1}{3,7D/\varepsilon} + \frac{1,784(\mu/\rho)}{D\sqrt{gDh_L/L}} \right] \quad (\text{Ec. 3.10})$$

3.2.3 Aplicación del Método Computacional para el Cálculo del Máximo Caudal Permisible en una Tubería.

Este método se aplicará al sistema mostrado en la **Figura 3.2** para calcular el máximo caudal permisible de un petróleo liviano a través de una tubería estándar de acero horizontal de 8 pulgadas, con una caída máxima de presión de 12.6000 KPa por 14.000 m de tubería. El petróleo tiene una densidad de 865,5142 kg/m³ (54,032lb/pie³) y una viscosidad dinámica de 0,0089 kg/m.s (8,900 cP). Evaluando la **ecuación 3.18** para estas condiciones se tiene:

$$Q = -2,22(0,2027)^2 \sqrt{\frac{9,81*0,2027*21,1997}{200}} \log \left[\frac{1}{3,7*4.406,5217} + \frac{1,784(0,0089/865,5142)}{0,2027 \sqrt{\frac{9,81*0,2027*21,1997}{200}}} \right]$$

$$Q = 0,1502 \text{ m}^3 / \text{s} \text{ (81,6246 MBD)}$$



3.3 ANÁLISIS DE UNA TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO ADECUADO DE TUBERÍA QUE CUMPLA CON LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.

Cuando existen sistemas en donde se requiere determinar el diámetro de la tubería se presentan verdaderos problemas de diseño. Los requerimientos del sistema se especifican en términos de una caída de presión permitida o pérdida de energía, una velocidad de flujo de volumen deseado, las propiedades del fluido y el tipo de tubería que se utilizará. Después, se determina el tamaño de tubería adecuado que cumpla estos requerimientos.

Se requiere de iteración para resolver este tipo de sistemas debido a que no existen tantas incógnitas para permitir una solución directa. La velocidad de flujo, el número de Reynolds y la rugosidad relativa D/ϵ son todas ellas dependientes del diámetro de la tubería. Por lo tanto el factor de fricción no puede determinarse en forma directa. El problema es seleccionar el tamaño de tubería adecuado que transportará una velocidad de flujo de volumen determinado con una cierta caída de presión máxima permitida. El procedimiento de solución se describe abajo. Los primeros siete pasos representan una reducción algebraica del problema a una forma más simple. Los pasos 8 al 13 comprenden la rutina de iteración.

1. Escribir la ecuación de la energía del sistema.
2. Despejar la pérdida de energía total, h_L , y evalúe las cabezas de presión y elevaciones conocidas.
3. Expresar la pérdida de energía en términos de la velocidad, utilizando la ecuación de Darcy (**Ec. 2.28**).
4. Expresar la velocidad en términos del caudal y el diámetro de la tubería (**Ec. 3.11**):

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

5. Sustituir la **ecuación 3.11** en la **ecuación 2.28**, generando así la **ecuación 3.12**:

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{16 * Q^2}{\pi^2 D^4 (2g)} = \frac{8LQ^2}{\pi^2 g} * \frac{f}{D^5} \quad (\text{Ec 3.12})$$

6. Despejar el diámetro, (**Ec. 3.13**):

$$D = \left(\frac{8LQ^2}{\pi^2 g h_L} f \right)^{\frac{1}{5}} = (C_1 f)^{0.2} \quad (\text{Ec. 3.13})$$



Donde C_1 está dado por la (Ec. 3.14):

$$C_1 = \left(\frac{8LQ^2}{\pi^2 gh_L} \right) \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Los términos que forman C_1 son todos conocidos e independientes del diámetro de la tubería.

7. Sustituir la **ecuación 3.11** en la **ecuación 2.29**, obteniendo la **ecuación 3.15**:

$$R_e = \frac{4Q}{\pi D^2} * \frac{D\rho}{\mu} = \frac{4Q\rho}{\pi\mu} * \frac{1}{D} = \frac{C_2}{D} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Donde el término C_2 viene dado por la **ecuación 3.16**:

$$C_2 = \frac{4Q\rho}{\pi\mu} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

8. Asumir un valor de prueba inicial para f . Puesto que tanto R_e como D/ϵ son incógnitas, no existen procedimientos específicos para seleccionar el valor inicial. Al menos que existan las condiciones específicas o que la experiencia dicte otro valor, asumir $f=0,02$.

9. Calcular el diámetro mediante la **ecuación 3.9**.

10. Calcular R_e mediante la **ecuación 3.15**.

11. Calcular D/ϵ .

12. Determinar el nuevo valor para el factor de fricción, f , (Ec. 2.31).

13. Comparar el nuevo valor de f con el que se asumió en el paso 8 y repetir los pasos 8 al 12 hasta que no se pueda detectar un cambio significativo en f , el diámetro calculado en el paso 9 es entonces correcto.^[9]

3.3.1 Aplicación de la Técnica para la Determinación del Tamaño Adecuado de Tubería que Cumpla con los Requerimientos del Sistema.

Para aplicar esta técnica, se estudia el sistema de flujo de fluido mostrado en la **Figura 3.2**, en donde se requiere calcular el tamaño mínimo de tubería para transportar $0,1502 \text{ m}^3/\text{s}$



(81,6246 MBD) de petróleo liviano a través de una tubería estándar de acero comercial, con una caída máxima de presión de 180 KPa (26,1067 psi) por 200 m de tubería. El petróleo tiene una densidad de $865,5142 \text{ kg/m}^3$ ($54,0321 \text{ lb/pe}^3$) y una viscosidad dinámica de $0,0089 \text{ kg/m.s}$ ($8,9000 \text{ cP}$).

1. En la **sección 3.2.1** se determinó que el sistema de la **Figura 3.2** está representado por la **ecuación 3.8**.
2. Al despejar h_L de la **ecuación 3.8**, queda la **ecuación 3.9**, en donde se evalúa la cabeza de presión como sigue:

$$\frac{180.000Pa}{8.490,6938N/m^3} = 21,1997m$$

$$h_L = 21,1997m$$

3. La pérdida de energía se expresa en términos de la velocidad, utilizando la ecuación de Darcy (**Ec. 2.28**).
4. La velocidad se expresa en términos del caudal y el diámetro de la tubería (**Ec. 3.11**).
5. Se cuenta con la **ecuación 3.12** para evaluar la pérdida de energía por fricción.
6. Evaluando la **ecuación 3.14** se obtiene lo siguiente:

$$C_1 = \left(\frac{8 * 200 * 0,1502^2}{\pi^2 * 9,81 * 21,1997} \right)$$

$$C_1 = 0,0176$$

Sustituyendo C_1 en la **ecuación 3.13** se tiene:

$$D = (0,0176f)^{0,2}$$

7. Evaluando la **ecuación 3.16**, se tiene:

$$C_2 = \frac{4 * 0,1502 * 865,5142}{\pi * 0,0089}$$



$$C_2 = 18.607,3474$$

Sustituyendo C_2 en la **ecuación 3.15**.

$$R_e = \frac{18.607,3474}{D}$$

8. Se asume un valor de prueba inicial para $f = 0,02$.

9. Cálculo del diámetro mediante la **ecuación 3.13**:

$$D = (0,0176 * 0,02)^{0,2}$$

$$D = 0,2038 \text{ m}$$

10. Cálculo de R_e mediante la **ecuación 3.15**:

$$R_e = \frac{18.607,3474}{0,2038}$$

$$R_e = 91.276,2998$$

11. Cálculo de la rugosidad relativa, D/ϵ :

$$D/\epsilon = \frac{0,2038}{0,000046}$$

$$D/\epsilon = 4.431,6822$$

12. Determinación del nuevo valor para el factor de fricción, f , aplicando la **ecuación 2.31**:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(4.431,6822)} + \frac{5,74}{91.276,2998^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,0194 \text{ (Ver Figura B.1)}$$

13. Puesto que el nuevo valor de f es diferente al valor que se asumió, se repiten los pasos 8 al 12, asumiendo ahora el nuevo valor de, se obtiene:



$$D=0,2026 \text{ m}$$

$$R_e=91.842,7808$$

$$D/\epsilon=4.404,3478$$

$$f = 0,0194 \text{ (Ver Figura B.1)}$$

El nuevo valor de f no cambió. Por lo tanto el tamaño mínimo permitido para la tubería es 0,2026 m. Una tubería estándar de acero comercial de 8 pulgadas tiene un diámetro interno de 7,981 pulgadas (0,2027 m), ver **Tabla A.3**, y se selecciona para esta aplicación.

3.3.2 Método Computacional para la Determinación del Diámetro de Tubería

El procedimiento de solución presentado anteriormente para la determinación del diámetro de la tubería requería de iteración para determinar el tamaño de la tubería que se necesita para transportar una determinada cantidad de fluido mientras limita la pérdida de energía a una cantidad máxima específica. Esto puede no ser conveniente si tales cálculos no se llevaran a cabo dentro de un programa de computadora. La siguiente ecuación se puede usar para calcular en forma directa el tamaño de tubería adecuado (**Ec. 3.17**):¹⁹

$$D = 0,66 \left[\epsilon^{1,25} \left(\frac{LQ^2}{gh_L} \right)^{4,75} + (\mu/\rho)Q^{9,4} \left(\frac{L}{gh_L} \right)^{5,2} \right]^{0,04} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

3.3.3 Aplicación del Método Computacional para la Determinación del Diámetro de Tubería

Para aplicar este método, se estudiará el sistema de flujo de fluido mostrado en la **Figura 3.2**, en donde se requiere calcular el diámetro mínimo permisible de una tubería estándar de acero comercial a través de la cual fluye 0,1502 m³/s (81,6246 MBD) de un petróleo liviano, con una caída máxima de presión de 180 KPa por 200 m de tubería. El petróleo tiene una densidad de 865,5142 kg/m³ (54,0321lb/pie³) y una viscosidad dinámica de 0,0089 kg/m.s (8,900 cP). Aplicando la **ecuación 3.17** se tiene:

$$D = 0,66 \left[0,000046^{1,25} \left(\frac{200 * 0,1502^2}{9,81 * 21,1997} \right)^{4,75} + (0,0089 / 865,5142) 0,1502^{9,4} \left(\frac{200}{9,81 * 21,1997} \right)^{5,2} \right]^{0,04}$$

$$D=0,2049 \text{ m} \approx 8 \text{ pulgadas}$$



3.4 DEFINICIÓN DEL MÉTODO HARDY-CROSS PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE REDES DE FLUIDO.

La solución del sistema de ecuaciones generado por la aplicación del balance de energía mecánica en los nodos de la red se realiza por medio del método de sustituciones sucesivas o Hardy-Cross. Como medio para acelerar el proceso de convergencia, se hace uso de la metodología de Newton, en donde se superpone una distribución inicial de niveles de energía H en cada nodo de la red. Esta aproximación es corregida inmediatamente y de manera sucesiva hasta que la solución sea alcanzada. Sin embargo en el proceso iterativo la ecuación de continuidad no es satisfecha (igual a cero). Pero el proceso iterativo finaliza cuando dicha ecuación sea menor o igual a la tolerancia permitida. Los pasos a seguir bajo este procedimiento se pueden resumir en:

- 1.- Se define claramente la geometría de la red, identificando de manera coherente los nodos y las tuberías de la misma.
- 2.- Se determina el flujo volumétrico en cada tubería por medio de la aplicación de la ecuación de continuidad en cada nodo de la red (**Ec. 2.79**).
- 3.- Se consideran conocidos todos los parámetros dimensionales de las tuberías que forman la red.
- 4.- Se suponen todos los niveles de energía en los nodos de la red, excepto en aquellos nodos, donde se considera que los niveles de energía son fijos (debe existir al menos un nodo con esta condición). Cuanto mejores sean los estimados más rápido se alcanza la convergencia.
- 5.- Se comprueba la ecuación de continuidad en los nodos de la red (**Ec. 2.82**). Si ésta no arroja un valor razonablemente cercano a cero, se debe corregir el nivel de energía en el nodo.
- 6.- Se determina el factor de corrección de los niveles de energía, δH , en los nodos de la red. El término δH se obtiene de la **ecuación 3.18**:

$$(\delta H) = -\frac{f(e)}{J} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Los términos del jacobiano relacionados con un nodo específico y las tuberías que tienen incidencias con dicho nodo están dados por los elementos de la diagonal principal del jacobiano.



- 7.- Proceder a corregir todos los niveles de energía (excepto donde se fije el mismo) mediante la **ecuación 2.103**.
- 8.- Repetir los pasos 4 a 7 tantas veces como sea necesario hasta que los valores arrojados por la ecuación de continuidad sean muy próximos a cero. ^{18]}

3.4.1 Aplicación del Método Hardy-Cross para una Red de Petróleo

A continuación se aplicará el método anteriormente descrito para la red de petróleo a 100°F del Patio de Tanques Orocuál mostrada en la **Figura 3.3**. Determinando la distribución de flujo de agua en cada tubería de la red, así como la distribución de presión en los nodos de la red. La densidad del petróleo es de $865,5142 \text{ kg/m}^3$, viscosidad dinámica de $0,0089 \text{ kg/m.s}$ y peso específico igual a $8.490,6938 \text{ N/m}^3$.

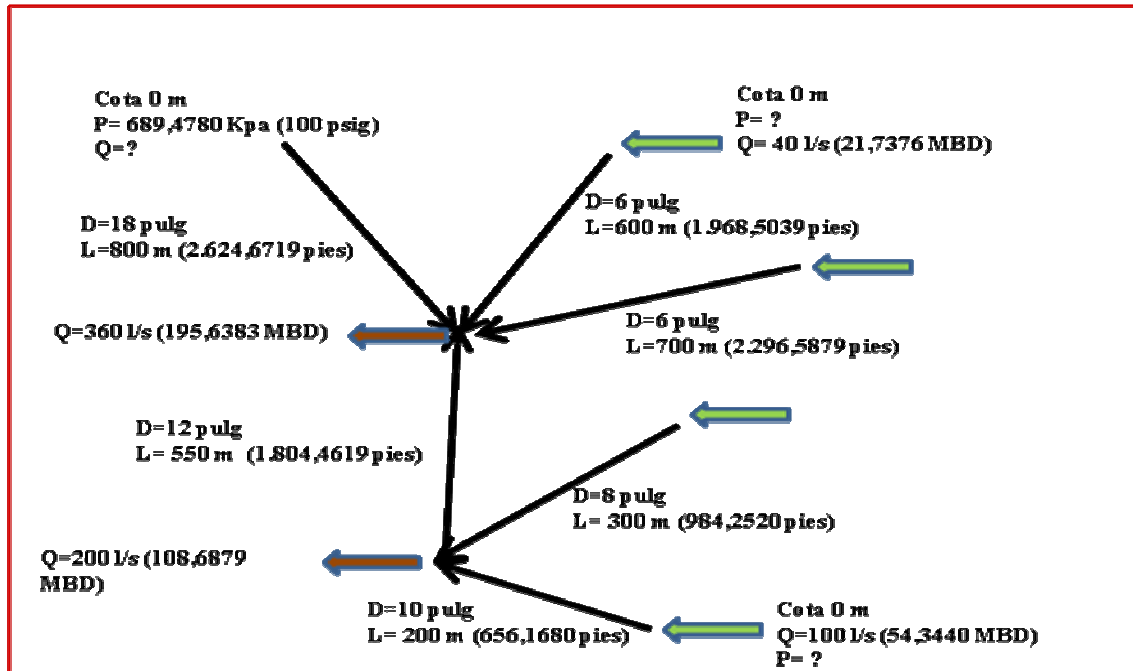


Figura 3.3 Red Abierta de Tuberías de Petróleo en el Patio de Tanques Orocuál

1.- Se tiene una red abierta de tuberías de petróleo, identificada por nodos y tuberías como se muestra en la **Figura 3.4**, los nodos se representan por un número entre paréntesis, y las tuberías se representan por un número entre corchete. Presentándose siete nodos y seis tuberías que constituyen la red en estudio. La identificación de nodos y tuberías se realiza arbitrariamente.

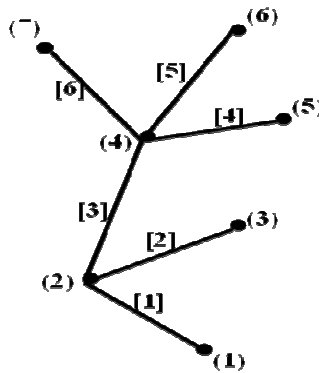


Figura 3.4 Identificación de Nodos y Tuberías en el Sistema

2.- Se desconoce el caudal circulante por la tubería [3] y la tubería [6], entonces se aplica la ecuación de continuidad (Ec. 2.79) en los nodos (2) y (4), como sigue:

$$\text{Nodo (2)} \quad Q_{[1]} + Q_{[2]} + Q_{[3]} - Q_{(2)} = 0$$

$$100 \text{ l/s} + 120 \text{ l/s} + Q_{[3]} - 200 \text{ l/s} = 0$$

$$Q_{[3]} = 200 - 120 - 100$$

$$Q_{[3]} = -20 \text{ l/s}$$

Del nodo (2) salen 20 l/s hacia la tubería [3]

$$\text{Nodo (4)} \quad Q_{[3]} + Q_{[4]} + Q_{[5]} + Q_{[6]} - Q_{(4)} = 0$$

$$20 \text{ l/s} + 30 \text{ l/s} + 40 \text{ l/s} + Q_{[6]} - 360 \text{ l/s} = 0$$

$$Q_{[6]} = 360 - 40 - 30 - 20$$

$$Q_{[6]} = 270 \text{ l/s}$$

Por la tubería [6] circula un caudal de 270 l/s.

Los caudales circulantes por el resto de las tuberías y los nodos se muestran en la **Tabla 3.1**.



Tabla 3.1 Caudales que Circulan por los Nodos y Tuberías

| | |
|------------------|--------|
| $Q_{[1]}, m^3/s$ | 0,1000 |
| $Q_{[2]}, m^3/s$ | 0,1200 |
| $Q_{[3]}, m^3/s$ | 0,0200 |
| $Q_{[4]}, m^3/s$ | 0,0300 |
| $Q_{[5]}, m^3/s$ | 0,0400 |
| $Q_{[6]}, m^3/s$ | 0,2700 |
| $Q_{(1)}, m^3/s$ | 0,1000 |
| $Q_{(2)}, m^3/s$ | 0,2000 |
| $Q_{(3)}, m^3/s$ | 0,1200 |
| $Q_{(4)}, m^3/s$ | 0,3600 |
| $Q_{(5)}, m^3/s$ | 0,0300 |
| $Q_{(6)}, m^3/s$ | 0,0400 |
| $Q_{(7)}, m^3/s$ | 0,2700 |

3.- Conociendo la densidad del petróleo igual a $865,5142 \text{ kg/m}^3$, la viscosidad es $0,0089 \text{ kg.m/s}$ y asumiendo que todas las tuberías de la red son de acero comercial ($\epsilon=0,000046 \text{ m}$), se calculan los parámetros de la tubería de la siguiente manera:

El área de las tuberías se obtiene mediante la **ecuación 3.19**:

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Aplicando la **ecuación 3.19** en la tubería [1] se calcula el área como sigue:

$$A_{[1]} = \pi * \frac{D_{[1]}^2}{4}$$
$$A_{[1]} = \pi * \frac{(0,2540 \text{ m})^2}{4}$$
$$A_{[1]} = 0,0506 \text{ m}^2$$

Para el cálculo del área para el resto de las tuberías se realiza el mismo procedimiento, cuyos valores se encuentran en la **Tabla 3.2**.

Para la tubería [1], se calcula la velocidad mediante la **ecuación 3.4** como sigue:

$$V_{[1]} = Q_{[1]} / A_{[1]}$$
$$V_{[1]} = \frac{0,1000 \text{ m}^3/s}{0,0506 \text{ m}^2}$$



$$V_{[1]}=1,9745 \text{ m/s (6,478 pie/s)}$$

El cálculo de la velocidad en cada tubería de la red se realizó mediante el mismo procedimiento mostrado para la tubería [1], cuyos valores se encuentran en la **Tabla 3.2**.

Para el cálculo del número de Reynolds se usa la **ecuación 2.29**. Para la tubería [1], se tiene:

$$R_{e[1]} = \frac{V_{[1]} D_{[1]} \rho}{\mu}$$

$$R_{e[1]} = \frac{1,9745 * 0,2540 * 865,5142}{0,0089}$$

$$R_{e[1]} = 48.773,1513$$

En la tubería [1] el flujo es turbulento ($R_e > 4.000$), por lo tanto se calcula el factor de fricción por medio de la aplicación de la **ecuación 2.31**:

$$f_{[1]} = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(0,2540 / 0,000046)} + \frac{5,74}{48.773,1513^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f_{[1]} = 0,0216 \text{ (Ver Figura B.1)}$$

Para el cálculo del número de Reynolds y el factor de fricción en cada tubería de la red se realizó el mismo procedimiento mostrado para la tubería [1], cuyos valores se encuentran en la **Tabla 3.2**.

El valor de K se calcula usando la **ecuación 2.78**, para el caso de la tubería [1], K se calcula como sigue:

$$K = \sqrt{\frac{0,254^5 \pi^2 9,81}{8 * 0,0216 * 200}}$$

$$K = 0,0544 \frac{m^{5/2}}{s}$$

Para el cálculo del valor de K en cada tubería de la red se realizó el mismo procedimiento mostrado para la tubería [1], cuyos valores se encuentran en la **Tabla 3.2**.



Tabla 3.2 Parámetros Dimensionales y Adimensionales de las Tuberías que Conforman la Red

| Tubería | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [6] |
|-------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| D, m | 0,2540 | 0,2032 | 0,3048 | 0,1524 | 0,1524 | 0,4572 |
| L, m | 200,0000 | 300,0000 | 550,0000 | 700,0000 | 600,0000 | 800,0000 |
| A, m² | 0,0506 | 0,0324 | 0,0729 | 0,0182 | 0,0182 | 0,1641 |
| V, m/s | 1,9745 | 3,7022 | 0,2742 | 1,6454 | 2,1939 | 1,6454 |
| Re | 48. 773,1513 | 73. 159,7270 | 8. 128,8585 | 24. 386,5756 | 32. 515,4342 | 73. 159,7270 |
| f | 0,0216 | 0,0202 | 0,0331 | 0,0254 | 0,0239 | 0,0196 |
| ε, m | 0,000046 | 0,000046 | 0,000046 | 0,000046 | 0,000046 | 0,000046 |
| K | 0,0544 | 0,0263 | 0,0418 | 0,0075 | 0,0083 | 0,1241 |

4.- En la red en estudio se fija la energía en el nodo (7), ya que se cuenta con la presión en dicho nodo, la energía se calcula por medio de la aplicación de la **ecuación 2.26** en el nodo (7).

$$H_{(7)} = \frac{P_{(7)}}{\gamma} + Z_{(7)} + \frac{V_{[6]}^2}{2g}$$

En donde:

$$P_{(7)} = 100 \text{ lpca} = 689,478 \text{ KPa.}$$

$$\gamma = 865,5142 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 = 9.780,57 \text{ kg/m}^2\text{s}^2 = 9.780,57 \text{ N/m}^3$$

$$Z_{(7)} = 0 \text{ m.}$$

$$V = 1,6454 \text{ m/s.}$$

Sustituyendo se tiene:

$$H_{(7)} = \frac{689,478,0 \text{ N / m}^2}{8.490,6938 \text{ N / m}^3} + 0 \text{ m} + \frac{(1,6454 \text{ m / s})^2}{2 * 9,81 \text{ m / s}^2}$$

$$H_{(7)} = 81,3419 \text{ m}$$

Para iniciar los cálculos se asumirá la energía en el nodo (4) igual a 80 m.

5.- Formulando el sistema de ecuaciones dadas por la función error (**Ec. 2.82**) que represente el balance en la ecuación de continuidad en cada nodo, se tiene:

$$\text{Nodo 1. } f(e_1) = -K_{[1]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(2)}} + Q_{(1)}$$

$$\text{Nodo 2. } f(e_2) = K_{[1]}\sqrt{H_{(1)} - H_{(2)}} + K_{[2]}\sqrt{H_{(3)} - H_{(2)}} - K_{[3]}\sqrt{H_{(2)} - H_{(4)}} - Q_{(2)}$$

$$\text{Nodo 3. } f(e_3) = -K_{[2]}\sqrt{H_{(3)} - H_{(2)}} + Q_{(3)}$$

$$\text{Nodo 4. } f(e_4) = K_{[3]}\sqrt{H_{(2)} - H_{(4)}} + K_{[4]}\sqrt{H_{(5)} - H_{(4)}} + K_{[5]}\sqrt{H_{(6)} - H_{(4)}} + K_{[6]}\sqrt{H_{(7)} - H_{(4)}} - Q_{(4)}$$



$$\text{Nodo 5. } f(e_5) = -K_{[4]}\sqrt{H_{(5)} - H_{(4)}} + Q_{(5)}$$

$$\text{Nodo 6 } f(e_6) = -K_{[5]}\sqrt{H_{(6)} - H_{(4)}} + Q_{(6)}$$

$$\text{Nodo 7 } f(e_7) = -K_{[6]}\sqrt{H_{(7)} - H_{(4)}} + Q_{(7)}$$

Ya que se conoce el valor fijo de energía en el nodo (7) y se tiene un valor supuesto de la energía en el nodo (4) se comprueba la ecuación de continuidad en el nodo (7) como sigue:

$$f(e_7) = -0,0544\sqrt{81,3419 - 80} + 0,2700 = 0,1262$$

6.- Aplicando el Jacobiano para cada función, se tiene:

$$\frac{\partial f(e_1)}{\partial H_{(1)}} = J_{11} = -\frac{K_{[1]}}{2\sqrt{H_{(1)} - H_{(2)}}} = -\frac{Q_{[1]}}{2[H_{(1)} - H_{(2)}]}$$

$$\frac{\partial f(e_2)}{\partial H_{(2)}} = J_{22} = -\frac{1}{2} \left[\frac{Q_{[1]}}{[H_{(1)} - H_{(2)}]} + \frac{Q_{[2]}}{[H_{(3)} - H_{(2)}]} + \frac{Q_{[3]}}{[H_{(2)} - H_{(4)}]} \right]$$

$$\frac{\partial f(e_3)}{\partial H_{(3)}} = J_{33} = -\frac{Q_{[2]}}{2[H_{(3)} - H_{(2)}]}$$

$$\frac{\partial f(e_4)}{\partial H_{(4)}} = J_{44} = -\frac{1}{2} \left[\frac{Q_{[3]}}{[H_{(2)} - H_{(4)}]} + \frac{Q_{[4]}}{[H_{(5)} - H_{(4)}]} + \frac{Q_{[5]}}{[H_{(6)} - H_{(4)}]} + \frac{Q_{[6]}}{[H_{(7)} - H_{(4)}]} \right]$$

$$\frac{\partial f(e_5)}{\partial H_{(5)}} = J_{55} = -\frac{Q_{[4]}}{2[H_{(5)} - H_{(4)}]}$$

$$\frac{\partial f(e_6)}{\partial H_{(6)}} = J_{66} = -\frac{Q_{[5]}}{2[H_{(6)} - H_{(4)}]}$$

$$\frac{\partial f(e_7)}{\partial H_{(7)}} = J_{77} = -\frac{Q_{[6]}}{2[H_{(7)} - H_{(4)}]}$$

Resolviendo el Jacobiano para el nodo 7 (J_{77}), se tiene:



$$\frac{\partial f(e_7)}{\partial H_{(7)}} = J_{77} = -\frac{0,2700}{2[81,3419 - 80,0000]}$$

$$\frac{\partial f(e_7)}{\partial H_{(7)}} = J_{77} = -0,1006$$

Aplicando la **ecuación 3.18** al nodo (7), se tiene:

$$(\delta H_4) = -\frac{f(e_7)}{J_{77}}$$

$$(\delta H_4) = -\frac{(0,1262)}{(-0,1006)}$$

$$(\delta H_4) = 1,2543$$

7.- Corrigiendo el nivel de energía asumido en el nodo 4 mediante la (**ecuación 2.103**), se tiene:

$$H_4 = 80 + (1,2543)$$

$$H_4 = 81,2543 \text{ m}$$

Al sustituir este nuevo valor de H_4 en la función error del nodo 7 se tiene:

$$f(e_7) = -0,0544\sqrt{81,3419 - 81,2543} + 0,2700 = 0,2539$$

Notando que el valor de la función error se aleja de cero, lo que indica que el factor de corrección en vez de sumarse debe ser restado en este caso.

$$H_4 = 80 - (1,2543)$$

$$H_4 = 78,7457 \text{ m}$$

Al sustituir este nuevo valor de H_4 en la función error del nodo 4 se tiene:

$$f(e_7) = -0,0544\sqrt{81,3419 - 78,7457} + 0,2700 = 0,0700$$



8.- La **Tabla 3.3** muestra los resultados obtenidos mediante la iteración en búsqueda del valor de la energía en el nodo 4.

Tabla 3.3 Cálculo de la Energía en el Nodo 4 mediante la Técnica Hardy- Cross

| Iteración | H(4), m | fe(7) | J77 | $\delta H(4)$ |
|-----------|---------|-------------|---------|---------------|
| 1 | 80,0000 | 0,1262 | -0,1006 | 1,2543 |
| 2 | 78,7457 | 0,0700 | -0,0520 | 1,3456 |
| 3 | 77,4001 | 0,0235 | -0,0342 | 0,6868 |
| 4 | 76,7133 | 0,0029 | -0,0292 | 0,0998 |
| 5 | 76,6135 | 4,67483E-05 | -0,0286 | 0,0016 |
| 6 | 76,6118 | 1,21397E-08 | -0,0285 | 4,25346E-07 |

Obteniendo en la sexta iteración un valor de $H_4 = 76,6118$ m, lo cual genera una función error muy próxima a cero.

Regresando al paso 4, se fija el nivel de energía $H_4 = 76,6118$ m y se supone $H_6 = 80$ m para evaluar $f(e_6)$. Se obtienen los siguientes resultados (**Tabla 3.4**):

Tabla 3.4 Cálculo de la Energía en el Nodo 6 mediante la Técnica Hardy- Cross

| Iteración | H(6),m | fe(6) | J66 | $\delta H(6)$ |
|-----------|---------|-------------|---------|---------------|
| 1 | 80,0000 | 0,0247 | -0,0059 | 4,1786 |
| 2 | 84,1786 | 0,0171 | -0,0026 | 6,4638 |
| 3 | 90,6424 | 0,0088 | -0,0014 | 6,1707 |
| 4 | 96,8131 | 0,0026 | -0,0010 | 2,5836 |
| 5 | 99,3967 | 0,0002 | -0,0009 | 0,2684 |
| 6 | 99,6651 | 2,07311E-06 | -0,0009 | 0,0024 |

Obteniendo en la sexta iteración un valor de $H_6 = 99,6651$ m, lo cual genera una función error muy próxima a cero.

Evaluando ahora la $f(e_5)$, se fija $H_4 = 76,6118$ m y se supone $H_5 = 80$ m, obteniendo lo siguiente (**Tabla 3.5**).

Tabla 3.5 Cálculo de la Energía en el Nodo 5 mediante la Técnica Hardy- Cross

| Iteración | H(5), m | fe(5) | J55 | $\delta H(5)$ |
|-----------|---------|------------|---------|---------------|
| 1 | 80,0000 | 0,0162 | -0,0044 | 3,6671 |
| 2 | 83,6671 | 0,0101 | -0,0021 | 4,7676 |
| 3 | 88,4347 | 0,0043 | -0,0013 | 3,3785 |
| 4 | 91,8132 | 0,0008 | -0,0010 | 0,8543 |
| 5 | 92,6675 | 3,4886E-05 | -0,0009 | 0,0373 |
| 6 | 92,7048 | 6,0804E-08 | -0,0009 | 6,5235E-05 |

Obteniendo en la sexta iteración un valor de $H_5 = 92,7048$ m, lo cual genera una función error muy próxima a cero.



Evaluando ahora la $f(e_4)$, se fijan los niveles de energía $H_4= 76,6118$ m, $H_5=92,7048$ m, $H_6= 99,6651$ m, $H_7=81,3419$ m y se supone $H_2=90$ m, obteniendo lo siguiente (**Tabla 3.6**):

Tabla 3.6 Cálculo de la Energía en el Nodo 2 mediante la Técnica Hardy- Cross

| Iteración | H(2), m | fe(4) | J44 | $\delta H(2)$ |
|-----------|---------|-------------|-------------|---------------|
| 1 | 90,0000 | 0,1330 | -0,0311 | 4,2795 |
| 2 | 85,7205 | 0,1062 | -0,0314 | 3,3790 |
| 3 | 82,3415 | 0,0801 | -0,0321 | 2,4969 |
| 4 | 79,8446 | 0,0552 | -0,0334 | 1,6510 |
| 5 | 78,1936 | 0,0326 | -0,0367 | 0,8892 |
| 6 | 77,3044 | 0,0148 | -0,0448 | 0,3306 |
| 7 | 76,9738 | 0,0052 | -0,0580 | 0,0890 |
| 8 | 76,8848 | 0,0018 | -0,0670 | 0,0276 |
| 9 | 76,8572 | 7,1411E-04 | -7,1103E-02 | 1,0043E-02 |
| 10 | 76,8471 | 2,8563E-04 | -7,2843E-02 | 3,9211E-03 |
| 11 | 76,8432 | 1,1586E-04 | -7,3564E-02 | 1,5750E-03 |
| 12 | 76,8416 | 4,72665E-05 | -0,0739 | 6,3995E-04 |
| 13 | 76,8410 | 1,9328E-05 | -0,0740 | 2,6125E-04 |
| 14 | 76,8407 | 7,9111E-06 | -0,0740 | 1,0686E-04 |

Obteniendo en la décimo cuarta iteración un valor de $H_2= 76,8407$ m, el cual genera una función error muy próxima a cero.

Evaluando ahora la $f(e_3)$, se fijan los niveles de energía $H_2= 76,8407$ m y se supone $H_3= 80$ m, obteniendo lo siguiente (**Tabla 3.7**):

Tabla 3.7 Cálculo de la Energía en el Nodo 3 mediante la Técnica Hardy- Cross

| Iteración | H(3), m | fe(3) | J33 | $\delta H(3)$ |
|-----------|---------|------------|---------|---------------|
| 1 | 80,0000 | 0,0732 | -0,0190 | 3,8563 |
| 2 | 83,8563 | 0,0503 | -0,0086 | 5,8833 |
| 3 | 89,7396 | 0,0255 | -0,0047 | 5,4846 |
| 4 | 95,2242 | 0,0072 | -0,0033 | 2,2056 |
| 5 | 97,4298 | 0,0006 | -0,0029 | 0,2139 |
| 6 | 97,6437 | 4,8422E-06 | -0,0029 | 0,0017 |

Obteniendo en la sexta iteración un valor de $H_3= 97,6437$ m. Para obtener el valor del nivel de energía en el nodo1, es posible evaluar $f(e_1)$ o $f(e_2)$. Evaluando la función error $f(e_1)$, se fija el valor de $H_2= 76,8407$ m y se asume $H_1=80$ m, obteniendo lo siguiente (**Tabla 3.8**):

Tabla 3.8 Cálculo de la Energía en el Nodo 1 mediante la Técnica Hardy- Cross

| Iteración | H(1), m | fe(1) | J11 | $\delta H(1)$ |
|-----------|---------|------------|---------|---------------|
| 1 | 80,0000 | 0,0033 | -0,0158 | 0,2078 |
| 2 | 80,2078 | 0,0002 | -0,0148 | 0,0107 |
| 3 | 80,2184 | 3,7758E-07 | -0,0148 | 2,5507E-05 |



Obteniendo en la tercera iteración un valor de $H_1 = 80,2184$ m, lo cual genera una función error muy próxima a cero.

De esta manera, se conocen los niveles de energía en todos los nodos, mediante la técnica Hardy-Cross. Una vez conocidos los niveles de energía en cada nodo, se puede calcular la presión en cada nodo mediante la ecuación de energía en un punto (Ec. 2 26). La energía en el nodo (1) se puede escribir como:

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_{[1]}^2}{2g}$$

Despejando la presión en el nodo (4) se tiene (Ec. 3.20):

$$P_1 = \gamma \left(H_1 - z_1 - \frac{V_{[1]}^2}{2g} \right) \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$P_1 = 8.490,6938(80,2184 - 0 - 0,1987)$$

$$P_1 = 679,4219 \text{ KPa}(98,5415 \text{ psi})$$

Aplicando este mismo procedimiento para calcular el resto de los niveles de presión en los nodos, teniendo en cuenta la dirección del fluido, se obtienen los siguientes resultados (Tabla 3.9):

Tabla 3.9 Niveles de Energía y de Presión en cada Nodo (Hardy-Cross)

| Nodos | H(m) | P(KPa) | P(psi) |
|-------|---------|----------|----------|
| 1 | 80,2184 | 679,4227 | 98,5416 |
| 2 | 76,8407 | 650,7437 | 94,3821 |
| 3 | 97,6437 | 823,1311 | 119,3847 |
| 4 | 76,6118 | 649,3156 | 649,3156 |
| 5 | 92,7048 | 785,9563 | 113,9929 |
| 6 | 99,6651 | 844,1431 | 122,4322 |
| 7 | 81,3419 | 689,4780 | 100,0000 |

3.5 COMPARACIÓN DE LA TÉCNICA HARDY-CROSS CON LA ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA Y EL SIMULADOR PIPEPHASE.

Para conocer los niveles de energía en cada nodo se aplicará la ecuación general de la energía en los extremos de cada tubería de la Figura 3.3. Debido a que se conoce el nivel de energía en el nodo (7), ($H_{(7)}=81,3419$ m), se comenzará estudiando la tubería [6].



Siendo el punto 1 el nodo (7) y el punto 2 el nodo (4), se aplica la **ecuación 2.71** en dichos nodos, obteniendo:

$$H_7 - h_{L[6]} = H_4$$

En donde $h_{L[6]}$, se calcula mediante la **ecuación 2.28**, como sigue:

$$h_{L[6]} = 0,0196 * \frac{800}{0,4572} * \frac{1,6454^2}{2 * 9,81}$$

$$h_{L[6]} = 4,7301 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores de $H_{(7)}$ y $h_{L[6]}$, se tiene:

$$H_4 = 81,3419 - 4,7301$$

$$H_4 = 76,6119 \text{ m}$$

Aplicando la **ecuación 2.26** en el nodo (4), se tiene:

$$H_4 = \frac{P_4}{\gamma} + z_4 + \frac{V_{[6]}^2}{2g}$$

Despejando la presión en el nodo (4) queda:

$$P_4 = \gamma \left(H_4 - z_4 - \frac{V_{[6]}^2}{2g} \right)$$

$$P_4 = 8.490,6938 \left(76,6119 - 0 - \frac{1,6454^2}{2 * 9,81} \right)$$

$$P_4 = 649,3156 \text{ KPa} (94,1750 \text{ psi})$$

Se aplica este mismo procedimiento para calcular el resto de los niveles de energía en los nodos, las pérdidas de energía por fricción en cada tubería son las siguientes (**Tabla 3.10**):



Tabla 3.10 Pérdidas de Energía por Fricción en cada Tubería

| Tubería | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [6] |
|---------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|
| hL,m | 3,3777 | 20,8047 | 0,2287 | 16,0930 | 23,0557 | 4,7301 |

Los niveles de energía obtenidos y la presión en cada nodo se muestran en la **Tabla 3.11**.

Tabla 3.11 Niveles de Energía y de Presión en cada Nodo
(Ecuación General de la Energía)

| Nodos | H(m) | P(KPa) | P(psi) |
|-------|---------|----------|----------|
| 1 | 80,2183 | 679,4219 | 98,5415 |
| 2 | 76,8406 | 650,7429 | 94,3820 |
| 3 | 97,6453 | 823,1447 | 119,3866 |
| 4 | 76,6119 | 649,3156 | 94,1750 |
| 5 | 92,7049 | 785,9572 | 113,9931 |
| 6 | 99,6676 | 844,1643 | 122,4353 |
| 7 | 81,3419 | 689,4780 | 100,0000 |

En la **Tabla 3.12** se comparan los resultados obtenidos de niveles de energía y presión en cada nodo, mediante la técnica de Hardy-Cross y la Ecuación General de la Energía.

Tabla 3.12 Comparación de las Técnicas Hardy-Cross y la Ecuación General de la Energía

| Nodos | H(m) Hardy- Cross | H(m) (Ec. Gral. de la Energía) | P(psi) Hardy- Cross | P(psi) (Ec. Gral. de la Energía) |
|-------|----------------------|--------------------------------------|------------------------|--|
| 1 | 80,2184 | 80,2183 | 98,5416 | 98,5415 |
| 2 | 76,8407 | 76,8406 | 94,3821 | 94,3820 |
| 3 | 97,6437 | 97,6453 | 119,3847 | 119,3866 |
| 4 | 76,6118 | 76,6119 | 649,3156 | 94,1750 |
| 5 | 92,7048 | 92,7049 | 113,9929 | 113,9931 |
| 6 | 99,6651 | 99,6676 | 122,4322 | 122,4353 |
| 7 | 81,3419 | 81,3419 | 100, 0000 | 100,0000 |

Al simular la red en estudio en el simulador PIPEPHASE (**Figura B.3**) se obtuvieron los siguientes niveles de presión en cada nodo (**Tabla 3.13**).

Tabla 3.13 Niveles de Presión en cada Nodo (PIPEPHASE)



| Nodo | Presión, Kpa | Presión, psi |
|------|--------------|--------------|
| 1 | 679,7000 | 98,5818 |
| 2 | 650,6000 | 94,3612 |
| 3 | 829,8000 | 120,3519 |
| 4 | 648,6000 | 94,0712 |
| 5 | 787,1000 | 114,1588 |
| 6 | 847,2000 | 122,8756 |
| 7 | 689,5000 | 100,0000 |

En la **Tabla 3.14** se comparan los niveles de presión obtenidos por los tres métodos estudiados.

Tabla 3.14 Comparación de las Técnicas Hardy-Cross, Ecuación General de la Energía y el Simulador PIPEPHASE

| Nodos | P, psi (Hardy- Cross) | P, psi (Ec. Gral. de la Energía) | P, psi (PIPEPHASE) |
|-------|--------------------------|--|-----------------------|
| 1 | 98,5416 | 98,5415 | 98,5818 |
| 2 | 94,3821 | 94,3820 | 94,3612 |
| 3 | 119,3847 | 119,3866 | 120,3519 |
| 4 | 649,3156 | 94,1750 | 94,0712 |
| 5 | 113,9929 | 113,9931 | 114,1588 |
| 6 | 122,4322 | 122,4353 | 122,8756 |
| 7 | 100,0000 | 100,0000 | 100,0000 |

CAPÍTULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 Empleo de la Ecuación General de la Energía para el Estudio de Sistemas de Tubería en Serie.

El logro de este objetivo se orientó en la determinación de la pérdida de energía total del sistema, h_L , y la energía agregada al fluido, h_A , la cual representa la energía agregada por la bomba para transportar un fluido (**Figura 3.1**). Como método de análisis en dicho sistema se empleó la ecuación general de la energía la cual es una manera de tomar en cuenta toda la energía en el sistema entre los dos puntos de referencia. Para un diámetro en la línea de 12 pulgadas se originó una velocidad de 1,2603 m/s (**Tabla 4.1**) cuyo valor está cerca de la velocidad recomendable para la entrada de la bomba (aproximadamente 1,0 m/s), la cabeza de velocidad que se presenta para este diámetro es de 0,0810 m. En la tubería de descarga para un diámetro de 6 pulgadas se originó una velocidad de 4,9462 m/s, la cual se encuentra un poco alejada del valor recomendado para una línea de descarga de un sistema de distribución de fluido (aproximadamente 3,0 m/s) produciendo además una cabeza de velocidad de 1,2469 m. Sin embargo asumiendo un diámetro de 8 pulgadas en la línea de descarga, se genera una velocidad de 2,8524 m/s y una cabeza de velocidad de 0,4147 m, una reducción de aproximadamente tres veces.

Tabla 4.1 Comparación de Resultados para Diferentes Diámetros de Descarga

| Diámetro Nominal, pulg. | | Vs (m/s) | Vd (m/s) | hL (m) | hA (m) | Potencia (HP) |
|-------------------------|----|-------------|-------------|-----------|-----------|------------------|
| Ds | Dd | | | | | |
| 12 | 6 | 1,2603 | 4,9462 | 43,9588 | 59,1988 | 62,0124 |
| 12 | 8 | 1,2603 | 2,8524 | 19,5775 | 34,8175 | 36,4724 |

Debido a que la pérdida de energía total es la suma de las pérdidas individuales, ocurren pérdidas por fricción en la línea de succión y en la línea de descarga así como también en la salida y entrada de los tanques, la válvula y los codos. La pérdida de energía en la línea de succión de 12 pulgadas es de 0,1808 m y la pérdida de energía para una línea de descarga de 6 pulgadas es de 33,0143 m, estas dos pérdidas representan las pérdidas por fricción, las cuales son las pérdidas mayores del sistema, estas dos pérdidas se suman a las pérdidas



menores para dar una pérdida de energía total igual a 43,9588 m con lo cual se genera una cabeza total a ser agregada al fluido igual a 59,1988 m originándose con ésto una potencia requerida igual a 62,0124 HP. Sin embargo al usar un diámetro de descarga igual a 8 pulgadas se produce una pérdida de energía total de 19,5775 m, siendo ésta mucho menor que la originada con un diámetro de 6 pulgadas, resultando en una reducción de la energía que se tendría que agregar a la bomba de 59,1988 m a 34,8175 m. La potencia proporcionada a la bomba se reduciría de 62,0124 HP a 36,4724 HP, notando un ahorro considerable de energía para transportar el fluido, esto se debe a que en la trayectoria se pierde menos energía utilizando un diámetro de descarga de 8 pulgadas lo cual a su vez se debe a la disminución de la cabeza de velocidad asociada ya que estas pérdidas son proporcionales a la cabeza de velocidad.

4.1.2 Presentación de un Procedimiento de Solución para el Cálculo de la Velocidad y Caudal de Flujo Permitido en una Tubería.

Con la finalidad de determinar la velocidad o el caudal a través del sistema con una caída de presión establecida se ha presentado un método de solución del tipo prueba y error en el cual se asumió un valor de prueba para el factor de fricción desconocido, f , permitiendo el cálculo de una velocidad de flujo correspondiente. El procedimiento indicó el nuevo valor de prueba a utilizarse cuando se requirió de un ciclo de cálculo adicional (**Tabla 4.2**). En el primer ciclo de cálculo se obtuvo un valor de f igual a 0,0194 el cual es diferente al asumido inicialmente (0,0200) por lo tanto se repitieron los cálculos para este nuevo valor de f , obteniendo un nuevo valor de f igual a 0,0194, el cual es igual al valor asumido. Por lo tanto la velocidad que se encontró igual a 4,6618 m/s (15,2946 pie/s) es correcta. Conociendo la velocidad se determinó que el caudal es igual a 0,1506 m³/s (81,8420 MBD), el cual representa el máximo caudal que la tubería puede transportar, debido a que se limitó la pérdida de energía a un valor máximo de 180 KPa (26,1067 psi).

Tabla 4.2 Resultados del Método Iterativo para el Cálculo de Velocidad y Caudal

| f , Supuesto | V, (m/s) | Re | Nuevo f | Q, (m ³ /s) | Q, (MBD) |
|----------------|----------|--------------|-----------|------------------------|----------|
| 0,0200 | 4,5913 | 90. 505,2161 | 0,0194 | - | - |
| 0,0194 | 4,6618 | 91. 894,9353 | 0,0194 | 0,1506 | 81,8420 |

Mediante el método computacional se obtiene un caudal permisible que la tubería puede transportar igual a 0,1502 m³/s (81,6246 MBD). Al comparar este resultado con el caudal arrojado mediante el método de solución de tipo prueba y error se nota que ambos son bastante aproximados pudiendo así corroborar los resultados obtenidos. De esta manera



se puede conocer fácilmente la velocidad y caudal requerido mediante el método iterativo estudiado o de manera directa evitando utilizar iteración mediante el método computacional cuando solamente están involucradas pérdidas de energía debido a la fricción. Una velocidad por encima de 4,6618 m/s (15,2946 pie/s) ocasionaría una erosión excesiva, con el peligro de que la tubería falle y las partículas de virutas, arena o afines podrían convertirse en agentes de erosión pudiendo así erosionar la tubería y dar lugar al fracturamiento de la misma.

4.1.3 Análisis de una Técnica para la Determinación del Tamaño Adecuado de Tubería que Cumpla con los Requerimientos del Sistema.

La aplicación de esta técnica está fundamentada a partir de una caída de presión permitida o pérdida de energía establecida, un caudal deseado, las propiedades del fluido y el tipo de tubería que se utilizará. Con esto se determinó el tamaño de tubería adecuado que cumple con estos requerimientos, ver **Tabla 4.3**.

El procedimiento de solución ayudó a determinar el diámetro de la tubería a utilizar, por medio de la iteración. Debido a que se desconocía el tamaño de tubería entonces también se desconocía la velocidad de flujo, el número de Reynolds y la rugosidad relativa D/ϵ , por este motivo, el procedimiento consistió en realizar reducciones algebraicas del problema a una forma más simple. Al asumir el valor del factor de fricción igual a 0,020 se calculó el diámetro, el número de Reynolds y la rugosidad relativa con cuyos datos se obtuvo un factor de fricción de 0,0194 el cual es diferente al asumido, por lo cual se repitieron los cálculos para el nuevo valor de factor de fricción obteniendo un diámetro de 0,2026 m, un número de Reynolds igual a 91.842,7808 (flujo turbulento) y una rugosidad relativa de 4.404,7671, con cuyos valores se determinó el nuevo valor de factor de fricción igual a 0,0194, notando que no hubo cambio en el factor de fricción asumido entonces el diámetro calculado en esta última iteración es correcto.

Tabla 4.3 Resultados del Método Iterativo para el Cálculo del Tamaño de Tubería

| f , asumido | D_i , (m) | Re | D/ϵ | Nuevo f | D, nominal (pulg) |
|---------------|-------------|------------|--------------|-----------|-------------------|
| 0,0200 | 0,2038 | 91276,2998 | 4431,6822 | 0,0194 | - |
| 0,0194 | 0,2026 | 91842,7808 | 4404,7672 | 0,0194 | 8,0000 |

Con los resultados de la iteración se logró conocer el tamaño mínimo permitido para la tubería igual a 0,2026 m (7,9763 pulgadas). Con este resultado se puede seleccionar una tubería estándar cercana a este tamaño, para ello se utiliza la **Tabla A.3**. Una tubería de acero de 8 pulgadas tiene un diámetro interno de 0,2027 metros (7,981 pulgadas) y se selecciona para esta aplicación.

Al aplicar el método computacional para el cálculo del tamaño mínimo permitido en una tubería se obtiene un diámetro de 0,2049 metros (8,0669 pulgadas), seleccionando una tubería estándar cercana a este tamaño la cual es una tubería de acero de 8 pulgadas, con lo



cual se corrobora además el método iterativo antes descrito ya que ambos conllevan a la selección de una tubería de 8 pulgadas.

4.1.4 Definición del Método Hardy-Cross para el Análisis y Simulación de Redes de Fluido.

Con la aplicación de la técnica Hardy-Cross se resolvió el sistema de ecuaciones generado por la aplicación del balance de energía mecánica en los nodos de la red (**Figura 3.4**), usando además la metodología de Newton para acelerar el proceso de convergencia con el cual se fijo el nivel de energía en el nodo 7 igual a 80,3419 m, éste pudo conocerse ya que en ese nodo se conocían todos los términos para el cálculo de la cabeza total respectiva. El resto de los niveles de energía en cada nodo se asumieron siendo éstos de 80 m para los nodos 1, 3, 4 5 y 6 mientras que uno de 90 m para el nodo 2, estas suposiciones se hacen tomando en cuenta el sentido de flujo en la tubería, en el caso del nodo 4 por ser el punto final de la tubería 6 éste debe tener un nivel de energía menor que el nodo fijado en 7 debido a la consideración de las pérdidas de energía por fricción. Estos niveles de energía asumidos se corrigieron mediante los factores de corrección respectivos de dichos niveles de energía, que a su vez generaron que las ecuaciones de continuidad en cada nodo fuesen muy próximas a cero, lo cual indica que la solución fue alcanzada. La **Tabla 4.4** muestra los niveles de energía obtenidos con la aplicación de la técnica Hardy-Cross.

Tabla 4.4 Niveles de Energía en cada Nodo (Hardy-Cross)

| Nodos | H(m) |
|-------|---------|
| 1 | 80,2184 |
| 2 | 76,8407 |
| 3 | 97,6437 |
| 4 | 76,6118 |
| 5 | 92,7048 |
| 6 | 99,6651 |
| 7 | 81,3419 |

Ya que con el método Hardy-Cross se logra conocer la energía que posee el fluido por unidad de peso en cada nodo lo cual se interpreta en la obtención de una cabeza total de energía representado por una altura dada por la suma de la cabeza de presión (P/γ), la cabeza de elevación (z) y la cabeza de velocidad ($V^2/2g$), se pudo conocer la presión en cada nodo al despejar P de la **ecuación 2.26**, esta al ser aplicada en cada nodo se obtienen las presiones mostradas en la **Tabla 4.5**.



Tabla 4.5 Niveles de Presión en Cada Nodo (Hardy-Cross)

| Nodos | P(psi) |
|-------|----------|
| 1 | 98,5416 |
| 2 | 94,3821 |
| 3 | 119,3847 |
| 4 | 649,3156 |
| 5 | 113,9929 |
| 6 | 122,4322 |
| 7 | 100,0000 |

Con estos resultados se puede decir que con la técnica de Hardy-Cross es posible también conocer indirectamente la presión en cada nodo para el caso en estudio.

4.1.5 Comparación de la Técnica Hardy-Cross con la Ecuación General de la Energía y el Simulador PIPEPHASE.

Mediante la aplicación de la ecuación general de la energía para la solución de la red en estudio (**Figura 3.3**) se obtuvieron resultados de niveles de energía y presión en cada nodo. Se iniciaron los cálculos con la tubería seis puesto que ya se conocía el nivel de energía en el nodo inicial de dicha tubería, siendo este el nodo 7, con una energía conocida igual a 81,3419 m, procediendo a calcular la pérdida por fricción en la tubería (**Ec. 2.28**) la cual arrojó un valor de 4,7324 m, una vez conocidos estos valores de energía inicial y la pérdida por fricción se prosiguió a calcular la energía final (H_4) mediante la aplicación de la **ecuación 2.71** en donde se obtuvo un nivel de energía en el nodo 4 igual a 76,6119 m. Conociendo este valor de la energía en 4 se pudo aplicar la ecuación general de energía para las tuberías 3, 4 y 5, las pérdidas en dichas tuberías fueron de 0,2289 m, 16,0987 m y 19,62 m respectivamente. Los niveles de energía obtenidos fueron de 76,8406 m para el nodo 2, 92,7049 m para el nodo 5 y 99,6676 m para el nodo 6. (**Tabla 4.6**). Se aplicó el mismo procedimiento para el cálculo de la energía en el nodo 1 y 2, obteniendo valores de 80,2183 m y 76,8406 m respectivamente.



Tabla 4.6 Niveles de Energía cada Nodo
(Ecuación General de la Energía)

| Nodos | H(m) |
|-------|---------|
| 1 | 80,2183 |
| 2 | 76,8406 |
| 3 | 97,6453 |
| 4 | 76,6119 |
| 5 | 92,7049 |
| 6 | 99,6676 |
| 7 | 81,3419 |

Una vez aplicado este procedimiento para conocer los niveles de energía mediante la ecuación general de energía fue posible conocer las presiones en cada nodo mediante el despeje de la presión de la **ecuación 2.26**, las cuales están tabuladas en la **Tabla 4.7**.

Tabla 4.7 Niveles de Presión en cada Nodo
(Ecuación General de la Energía)

| Nodos | P(psi) |
|-------|----------|
| 1 | 98,5415 |
| 2 | 94,3820 |
| 3 | 119,3866 |
| 4 | 94,1750 |
| 5 | 113,9931 |
| 6 | 122,4353 |
| 7 | 100,0000 |

Conocidos los niveles de energía y presión en cada nodo por ambos métodos se pueden comparar los resultados en la **Tabla 4.8**, notando que tanto la técnica Hardy-Cross como la ecuación general de la energía arrojan valores de energía muy parecidos y por consiguiente similares valores de presión en los nodos lo cual favorece en la comprobación de la técnica de Hardy-Cross como método de análisis hidráulico de redes de fluido.

Tabla 4.8 Comparación de las Técnicas Hardy-Cross y la Ecuación General de la Energía



| Nodos | H(m) Hardy- Cross | H(m) (Ec. Gral. de la Energía) | P(psi) Hardy- Cross | P(psi) (Ec. Gral. de la Energía) |
|-------|----------------------|--------------------------------------|------------------------|--|
| 1 | 80,2184 | 80,2183 | 98,5416 | 98,5415 |
| 2 | 76,8407 | 76,8406 | 94,3821 | 94,382 |
| 3 | 97,6437 | 97,6453 | 119,3847 | 119,3866 |
| 4 | 76,6118 | 76,6119 | 649,3156 | 94,175 |
| 5 | 92,7048 | 92,7049 | 113,9929 | 113,9931 |
| 6 | 99,6651 | 99,6676 | 122,4322 | 122,4353 |
| 7 | 81,3419 | 81,3419 | 100,0000 | 100,0000 |

Para corroborar la técnica Hardy-Cross también se evaluó la red mediante un simulador de sistemas de flujo de fluido llamado PIPEPHASE con el cual se obtuvieron los resultados de presión mostrados en la **Tabla 4.9**.

Tabla 4.9 Niveles de Presión en cada Nodo (PIPEPHASE)

| Nodo | Presión, psi |
|------|--------------|
| 1 | 98,5818 |
| 2 | 94,3612 |
| 3 | 120,3519 |
| 4 | 94,0712 |
| 5 | 114,1588 |
| 6 | 122,8756 |
| 7 | 100,0000 |

Estos resultados de presión se pueden comparar con los arrojados mediante la aplicación de la ecuación general de la energía y la técnica Hardy-Cross, en la **Tabla 4.10** en donde se corrobora que los tres métodos de análisis de red arrojan resultados muy próximos lo cual indica que la técnica Hardy-Cross es capaz de simular redes de tuberías de una manera efectiva y confiable mediante el uso de sustituciones sucesivas.

Tabla 4.10 Comparación de las Técnicas Hardy-Cross, Ecuación General de la Energía y el Simulador PIPEPHASE



CAPÍTULO IV: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| Nodos | P, psi (Hardy- Cross) | P, psi (Ec. Gral. de la Energía) | P, psi (PIPEPHASE) |
|-------|--------------------------|--|-----------------------|
| 1 | 98,5416 | 98,5415 | 98,5818 |
| 2 | 94,3821 | 94,3820 | 94,3612 |
| 3 | 119,3847 | 119,3866 | 120,3519 |
| 4 | 649,3156 | 94,1750 | 94,0712 |
| 5 | 113,9929 | 113,9931 | 114,1588 |
| 6 | 122,4322 | 122,4353 | 122,8756 |
| 7 | 100,0000 | 100,0000 | 100,0000 |



4.2 CONCLUSIONES

1. Con la ecuación general de la energía es posible realizar un análisis hidráulico para sistemas de tuberías.
2. Con el método iterativo para la determinación del máximo caudal transportado por una tubería se puede planificar los requerimientos de infraestructura.
3. El método computacional para la determinación del máximo caudal permitido en una tubería representa una forma directa para corroborar el método iterativo.
4. Tanto el método iterativo como el método computacional para el cálculo del tamaño de tubería ayudan a determinar los requerimientos de infraestructura.
5. El método Hardy-Cross arroja resultados similares a los obtenidos con la ecuación general de la energía y el simulador PIPEPHASE.
6. El método Hardy-Cross puede ser aplicado para simular redes de flujo de fluidos.



4.3 RECOMENDACIONES

1. Aplicar del Método Hardy-Cross en el nuevo sistema de planificación.
2. Continuar el estudio de la técnica Hardy-Cross mediante su aplicación en redes de gas.
3. Continuar el modelo de simulación incorporando los estimados de costos de los principales equipos de superficie.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PDVSA N° SGDC-GRAL-MA-001. **“Manual del Sistema de Gestión de la Calidad”**. (2010).
- [2] Velásquez C., **“Análisis y Mejoras del Sistema de Manejo de Crudo de Oriente”**. Universidad de Oriente. Puerto La Cruz, Venezuela (2008).
- [3] García M., **“Visualización de la Infraestructura Requerida para el Almacenamiento, Manejo y Disposición en Terminales de la Producción de Crudo de la División Oriente”**, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. (2007).
- [4] Gómez A., **“Evaluación del Manejo de Fluidos Transportados en la Estación de Flujo Orocual EF-ORC-04 del Campo Orocual, PDVSA Distrito Norte. Estado Monagas”**. Universidad de Oriente, Puerto La Cruz, Venezuela. (2007).
- [5] Bastardo A., **“Elaboración de la Ingeniería Conceptual para la Infraestructura Requerida en el Proceso de Manejo de los Fluidos de Producción del Área Nueva de Orocual”**. Maturín, Venezuela. (2004).
- [6] Barberii E., **“El Pozo Ilustrado”**. Programa de Educación Petrolera. PDVSA. Segunda Edición, Caracas, Venezuela. (2001).
- [7] Wales J., **“La Enciclopedia Libre”**. Disponible en: www.es.wikipedia.org/wiki/Fluido. (2010).
- [8] González P. J. **“Análisis y Simulación de Redes de Fluidos”**. JAGP 1805. Venezuela (2006).
- [9] Mott R., **“Mecánica de Fluidos Aplicada”**. Cuarta Edición. México. (1996).
- [10] Saldarriaga J., **“Hidráulica de Tuberías”**. Editorial Alfaomega. Universidad de los Andes. Colombia. (2007).
- [11] PDVSA N° 90616.1.024., **“Manual de Ingeniería de Diseño. Guía de Ingeniería. Dimensionamiento de Tuberías de Proceso”**. Volumen 13–III. Noviembre (1993).
- [12] Guerra O., **“Fundamentos Teóricos de Fraccionamiento de Hidrocarburos”**. Puerto La Cruz, Venezuela. (2003).
- [13] Guillen C., **“Sistemas de Recolección”**. Disponible en: www.woodgroupnews.com. (2007).
- [14] Castillo O., **“Estudio de Almacenamiento del Crudo”**. Disponible en: <http://www.oriconsult.com>. (2008).



- [15] PDVSA N° MDP-02-FF-02. **“Manual de Diseño de Proceso. Flujo de Fluidos. Principios Básicos”**. Venezuela, Febrero (1996).
- [16] PDVSA MEC-400-04-01. **“Manual de Estimación de Costos Clase V (Tipo Curvas). Facilidades Superficiales de Producción”** Volumen 3. Enero. Venezuela. (1994).
- [17] Palacios A., **“Recolección de Fluidos de Producción”**. Disponible en: <http://intranet.pdvsa.com>. (2006).
- [18] PDVSA N° MDP-03-S-01. **“Manual de Diseño de Proceso. Separación Física. Tambores Separadores. Principios Básicos”**. (1983).
- [19] Matos J., **“Equipos a Presión”**. Disponible en: www.gigas.com.ve. (2010).
- [20] Rodríguez P., **“Ingeniería de Gas (Nivel I)”**. Asesores Termo Petróleos, S. C. (2000).
- [21] PDVSA N° MDP-05-E-01. **“Manual de Diseño de Proceso. Transferencia de Calor. Intercambiadores de Calor. Principios Básicos”**. Venezuela. Agosto (1995).
- [22] PDVSA N° MDP-02-K-02 **“Manual de Diseño de Compresores. Principios Básicos”**. Venezuela. Mayo (1996).
- [23] Greene R., **“Compresores”**. Editorial McGraw Hill. (1990).
- [24] Contreras C., Marvin J. **“Evaluación y Diagnóstico de las Condiciones de Operación de la Estación de Tratamiento de Crudo BARED-10-Distrito San Tomé”**. Informe de Pasantías. Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo. (2004).
- [25] Escobar L., **“Medición de Crudo en Tanques”**. Consultores Esconpet, S.A.(1996).
- [26] PDVSA N° MEC-400-06-01. **“Manual de Estimación de Costos Clase V (Tipo Curvas). Facilidades Superficiales de Producción. Plantas de Inyección de Agua”** Volumen 3. Venezuela. Enero (1994).
- [27] PDVSA Exploración y Producción División Oriente. **“Guías Portafolio de Oportunidades”**. Planificación Oriente. Maturín, Venezuela (2008).
- [28] Salazar P., **“Curso de PIPEPHASE”**. Versión 8.1. (2003).



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

| | |
|------------------|---|
| TITULO | EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE FLUJO, PARA EL DISEÑO DE LAS TUBERÍAS DE RECOLECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS FLUIDOS DE PRODUCCIÓN, PARA SU INCORPORACIÓN EN EL NUEVO SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE PDVSA EYP ORIENTE |
| SUBTITULO | |

AUTOR (ES):

| APELLIDOS Y NOMBRES | CDIGO CULAC / E MAIL |
|----------------------------------|---|
| García Serrano, Carmeli Carolina | CVLAC: 18.581.165 E_MAIL: carmeligs@gmail.com |
| | |

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Metodologías

Tuberías

Recolección

Distribución

Fluidos

Sistema de planificación



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

| ÁREA | SUBÁREA |
|---------------------------------|------------------------|
| Ingeniería y Ciencias Aplicadas | INGENIERÍA DE PETRÓLEO |
| | |
| | |

RESUMEN (ABSTRACT):

Este trabajo de grado consiste en brindar un aporte en cuanto al estudio de metodologías que ayudan a conocer las condiciones operacionales que se presentan en los sistemas de flujo de fluidos, con el objeto de su evaluación para su incorporación como base de cálculo en el nuevo sistema de planificación. Con la aplicación de la ecuación general de la energía en la Estación de Flujo Orocual 1 se pudo determinar que para transportar 50 MBD de petróleo por una línea de succión de 12 pulgadas y 30 metros de largo y una línea de descarga de 8 pulgadas y 200 metros de largo se requiere una bomba con una potencia de 36,4724 HP, dicha potencia resultó ser menor a la requerida en caso de usar un diámetro de descarga de 6 pulgadas. También se establecen procedimientos para calcular el caudal máximo permitido en una tubería de dicha estación, en donde se obtuvo un caudal máximo de 81,8420MBD para una tubería de descarga de 8 pulgadas y 200 metros de largo, comprobándolo luego con el método computacional, el cual arroja un caudal máximo permitido muy cercano. Se estudia también el método iterativo para calcular el tamaño mínimo de tubería en la Estación de Flujo Orocual 1 para transportar 81,6246 MBD de petróleo en 200 metros de tubería, obteniendo una tubería de 8 pulgadas, este resultado fue corroborado por un método computacional. Se aplica la metodología de Hardy-Cross para una red de flujo de fluidos del Patio de Tanques Orocual en la que, a partir de un algoritmo de cálculo basado en sustituciones sucesivas de niveles de energía, logra alcanzar la solución. Con la determinación del nivel de energía en cada nodo se conocen las presiones en los nodos. Los resultados obtenidos mediante el método de Hardy-Cross fueron comparados con los arrojados mediante la aplicación de la ecuación general de la energía y con el simulador PIPEPHASE, obteniendo resultados similares. Con esto se puede afirmar que la técnica Hardy-Cross sirve como herramienta para la representación de cualquier estructura de una red de una manera sencilla en la memoria del computador.



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

CONTRIBUIDORES:

| APELLIDOS Y NOMRES | ROL/CÓDIGO CVLAC/ E_MAIL | | | | |
|---------------------------|---------------------------------|--|----|---------|---------|
| Lorenzo Arditi | ROL | CA | AS | TU X | JU |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | larditi@hotmail.es | | | |
| Wilmer Moreno | ROL | CA | AS | TU X | JU |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | morenows@pdvsa.com | | | |
| Rafael Barrueta | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | Rafaelbarrueta1112@hotmail.com | | | |
| José Rodríguez | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | jrodriguez@udo.edu.ve | | | |

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

| AÑO | MES | DIA |
|------------|------------|------------|
| 2011 | 03 | 11 |

LENGUAJE: SPA



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

| NOMBRE DE ARCHIVO | TIPO MIME |
|----------------------------|---------------------|
| TESIS. Redes de fluido.doc | Aplication / msword |
| | |

**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: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero de Petróleo

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre – Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería de Petróleo

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente – Núcleo de Anzoátegui



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS:

De acuerdo al Artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, el cual lo notificará al Consejo Universitario”.

Carmeli Carolina García Serrano
AUTOR

Lorenzo Arditi
TUTOR

Rafael Barrueta
JURADO

José Rodríguez
JURADO

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS