

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



**Determinación de gradientes de presión para el estudio del
comportamiento de una línea de flujo multifásico mediante el empleo de
correlaciones en tuberías horizontales e inclinadas.**

Realizado por:

**GUILARTE PEREZ MARIA GABRIELA
LISCANO CORDERO VICEYNI DEL VALLE**

**Trabajo de Grado Presentado ante la Universidad de Oriente como
Requisito Parcial para Optar al Título de:**

INGENIERO QUIMICO

BARCELONA, OCTUBRE DE 2011

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



Determinación de gradientes de presión para el estudio del comportamiento de una línea de flujo multifásico mediante el empleo de correlaciones en tuberías horizontales e inclinadas.

ASESOR ACADÈMICO:

Ing. Rondón José

BARCELONA, OCTUBRE DE 2011

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



Determinación de gradientes de presión para el estudio del comportamiento de una línea de flujo multifásico mediante el empleo de correlaciones en tuberías horizontales e inclinadas.

JURADO PRINCIPAL:

Ing. Cermeño José

BARCELONA, OCTUBRE DE 2011

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo 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 el Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

A **dios y a la virgen** que me permitieron culminar un ciclo y realizar esta meta trazada a pesar de todas las piedras con las que tropecé.

A **mi padre Luis E**, quien me da empujones y apoya con los ojos cerrados pase lo que pase.

A **mi madre y sobre todo mejor amiga Maritza**, te amo mami por ser la persona con la que podre contar en todo lugar y en todo momento, eres el pilar que me mantiene de pie.

A **mis hermanos Gabriel y Alvaro** que son lo máximo, los amo my brothers.

A **mis sobrinas Alvanys, Xavielis y Rose** que las adoro y que me estresan pero alegran mi vida con sus tremenduras.

A **Lexis**, que sé que esté donde esté se siente tan contento como yo de este logro en mi vida.

A todas **las personas** que de una u otra forma aportaron su granito de arena para hacer de ésta una meta uno se mis sueños hechos realidad.

Guilarte María Gabriela

Gracias Señor **DIOS**, padre Jesucristo, por siempre estar conmigo en todos los momentos de mi vida y no abandonarme cuando más te necesite, te dedico mi monografía y todos mis logros futuros.

A mis padres: **Ynirida Cordero de Liscano e Inocente Liscano**, por su apoyo incondicional y por darme todo su amor de padres, este éxito es de ustedes. ¡LOS AMO!

A mis hermanos: **Vicente J., Jhoan J., Jesus E. y Ronni A.**, para que mi triunfo los motive y que el próximo en celebrar sea el de uno de ustedes. ¡Los quiero muchísimo!

A mi gran e incondicional amiga **Olitza Solórzano**, para servirle de ejemplo en su futuro desarrollo profesional y vea que cuando uno quiere puede. ¡Te adoro amiga!

A mi gran amiga y compañera de estudio, (desde el primer semestre), **María G. Guilarte** te dedico mi triunfo porque también es tuyo. Te quiero mucho.

A mis compañeras y amigas, **Mayerli Cedeño y Rosmary Barrios**, para que sirva de estímulo a seguir luchando por alcanzar sus objetivos. Las quiero.

Liscano Cordero Viceyni

AGRADECIMIENTO

A **dios y a la virgen del valle** por guiarme, darme salud, fortaleza y tesón para luchar por esta meta.

A mis padres **Luis Guilarte y Maritza Perez** por el apoyo incondicional, consejos ante las caídas y amor por sobre todas las cosas.

A mi **hermano mayor (Gabriel)** por su amor, dedicación, regaños y consejos; gracias por estar siempre hermano, te amo.

A mi **loquito hermano (Alvaro)**, que siempre tiene un chiste para alegrarme y con el que puedo contar. Te adoro.

A mis amigos: **Albert, Juan, Samuel, Mary** y a mi **amorsote Balito** por entenderme cada vez q debía invernar para estudiar.

A mis amigas de la universidad: **Mayerlin y Roosmary** por su apoyo e incondicional cariño.

A todos **mis profesores** por compartir día a día durante todos estos años su conocimiento y experiencias.

A todos **mis compañeros de clase** de los cuales aprendí de todo un poquito.

A la **universidad de oriente** por abrirme sus puertas y permitirme formarme como profesional, fueron los años más especiales de toda mi vida.

Y por último, pero no menos importante, a mi fiel amiga y compañera durante toda la carrera **Viceyni Liscano**; sin su compañía, locuras, regaños y consejos no hubiera sido igual. Gracias por todos y cada uno de los momentos vividos, te quiero mucho fea.!!

***Muchas gracias..!!
Guilarte María Gabriela.***

Gracias Señor **DIOS**, padre de Jesucristo, por ser mi guía en todos los caminos de mi vida.

A mis padres: **Ynirida Cordero de Liscano e Inocente Liscano**, por apoyarme siempre y en todo momento, gracias por sus esfuerzos para que yo pudiese alcanzar hoy esta meta. Les voy a estar agradecida por siempre. ¡Gracias por amarme!

A mi gran amiga y hermana de corazón **Olitza Solórzano**, porque siempre estuviste ahí escuchando, apoyando y viviendo conmigo mis penas y alegría, animándome para poder alcanzar esta meta. Gracias amiga. ¡Te adoro!

A **María G. Guilarte** porque en ti conseguí a una sincera y verdadera amiga, gracias por ser mi compañera en los momentos buenos y no tan buenos durante nuestra carrera. Amiga te deseo todo el éxito del mundo.

A mis compañeras de estudio, **Mayerli Cedeño y Rosmary Barrios** por su colaboración para culminar esta meta juntas.

A la **Universidad de Oriente**, la casa de estudios más alta, por permitirme entrar para formarme como profesional, nunca olvidare todos los días vividos ahí. Gracias.

A todos mis compañeros de **áreas de grado** por hacer de este curso una experiencia inolvidable, realmente aprendí mucho profesional y personalmente de cada uno de ustedes.

A todos los **profesores** que durante mis estudios me guiaron para conseguir la culminación de mi carrera.

¡¡¡¡¡ GRACIAS!!!!!!

Liscano Cordero Viceyni

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto consistió en Determinación de gradientes de presión para el estudio del comportamiento de una línea de flujo multifásico mediante el empleo de correlaciones en tuberías horizontales e inclinadas. Para efectuar este trabajo se revisó toda la información correspondiente al tema en estudio y se determinó un sistema de manera que permita comparar los perfiles de presión obtenidos por el software Pipephase con el problema propuesto. Con el propósito de lograr este objetivo se diseñó un sistema con cierta información desde el cabezal del pozo al separador, para establecer comparaciones con los valores generados a través del simulador y de la hoja de cálculo Excel. El simulador utilizado fue el Pipephase versión 8.1 en el cual se encuentran inmersas las correlaciones de flujo multifásico horizontal e inclinadas seleccionadas para llevar a cabo este estudio: Beggs & Brill y Eaton & Colaboradores. Para la evaluación de las correlaciones se utilizaron parámetros estadísticos comunes como el error porcentual. Como producto de la investigación se deriva que la correlación que se ajusta a las condiciones del sistema estudiado fue Eaton & Colaboradores por ser la que mejor cotejo los datos para las caídas de presión con un % de error promedio de 11,86 cuando la línea es seccionada en tramos cortos, siendo este caso el más aceptado por ser de todos los casos evaluados el menor.

TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN.....	ix
TABLA DE CONTENIDO	x
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Introducción.....	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetvo general	4
1.3.2 Objetivos especificos	4
CAPITULO II.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Fluidos.....	7
2.3 Flujo.....	8
2.4 Propiedades físicas de los fluidos:	8
2.4.1 Viscosidad:	8
2.4.1.1 Viscosidad absoluta o dinámica	9
2.4.1.2 Viscosidad cinemática.....	9
2.4.2 Densidad:.....	10
2.4.3 Volumen Especifico:	11
2.4.4 Gravedad especifica:	11
2.4.5 Compresibilidad:	11

2.5 Variables que Intervienen en el Flujo multifásico	12
2.5.1 Factor de entrapamiento del líquido (H_L):	12
2.5.2 Velocidad superficial:	14
2.5.3 Velocidad real:	14
2.5.4 Tensión superficial	15
2.5.5 Viscosidad:	16
2.5.6 Densidad:	16
2.6 Tipos de flujos en tuberías horizontales	18
2.6.1 Flujo Simple:	19
2.6.2 Flujo Bifásico:	19
2.6.3 Flujo Multifásico:	19
2.7 Patrones de flujo en tuberías horizontales	20
2.7.1 Flujos segregados	21
2.7.1.1 Flujo estratificado:	21
2.7.1.2 Flujo anular:	22
2.7.2 Flujos intermitentes	23
2.7.2.1 Flujo Intermitente Tipo Tapón:	23
2.7.3 Flujos distribuidos	23
2.7.3.1 Flujo niebla:	23
2.7.3.2 Flujo burbuja:	24
2.8 Caída de presión	24
2.9 Variables que afectan la caída de presión en tuberías horizontales	26
2.9.1 Diámetro de la tubería:	26
2.9.2 Tasa de flujo:	26
2.9.3 Relación Gas-Líquido:	26
2.9.4 Viscosidad líquida:	26
2.9.5 Relación Agua-Petróleo:	27
2.10 Correlaciones para caída de presión en tuberías horizontales.....	27

2.10.1 Beggs & Brill:	27
2.10.2 Baker:	37
2.10.3 Lockhart & Martinelli	42
CAPITULO III	45
DESARROLLO DEL PROYECTO	45
3.1 Metodología:.....	45
3.2 Revisión bibliográfica.....	45
3.3 Descripción del sistema para obtener la caída de presión de una línea de flujo.	46
3.4 Definición de las condiciones y características del sistema en estudio.....	47
3.5 Aplicación de las herramientas de evaluación.....	48
3.5.1 Cálculo de las caídas de presión a través de correlaciones en el sistema de tubería horizontal e inclinada con flujo multifásico con la hoja de cálculo Microsoft Excel.....	48
3.5.2 Cálculo de las caídas de presión a través de correlaciones en el sistema de tubería horizontal e inclinada con flujo multifásico con el simulador Pipephase versión 8.1	58
3.6 Cotejo del Sistema	60
CAPITULO IV.....	62
ANALISIS DE RESULTADOS.....	62
4.1 Tablas de resultados Microsoft Excel	62
4.1.1 Correlación de Flujo Multifásico de Beggs & Brill:	62
4.1.2 Correlación de Flujo Multifásico de Eaton y Colaboradores.	64
4.2 Gráficos de Microsoft Excel.....	67
4.2.1 Correlación de Flujo Multifásico de Beggs & Brill:	67
4.2.2 Correlación de Flujo Multifásico de Eaton y Colaboradores:	68
4.3 Gráficos del simulador Pipephase versión 8.1	68
CONCLUSIONES.....	73

RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	76

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El denominado flujo multifásico es encontrado en un gran número de industrias, y es simplemente la presencia de más de dos fases en una misma línea de flujo. Los sistemas bifásicos son el caso más reducido del gran bloque mencionado arriba, y pueden presentarse en varias combinaciones, de las cuales el caso más problemático es el flujo líquido-gas.

La necesidad de entender el comportamiento de una mezcla líquido-gas dentro de una tubería se ha hecho más imperativa en los últimos años, debido a que la industria petrolera en particular avanzaría en gran medida si se pudiese manejar eficientemente el flujo bifásico proveniente de un pozo antes de llegar a la refinería. Las ventajas de transportar el crudo sin separarlo antes son considerables ya que la cantidad de gas presente en el crudo tiene un efecto interesante: disminuye la viscosidad y densidad del mismo, facilitando así su transporte.

Hasta ahora, se han diseñado tuberías capaces de manejar flujos multifásicos pero no se sabe con exactitud lo que sucede adentro y por ende se tiende a sobredimensionar el sistema de tuberías y accesorios que vayan a manejar el flujo. Dentro del tubo, la mezcla de fluidos puede presentar diversos arreglos que dependen de las velocidades superficiales y propiedades de cada sustancia así como de la inclinación de la tubería, arreglos que son conocidos como patrones de flujo y tienen gran influencia en la caída de presión que experimenta la mezcla, así como en el radio de

volúmenes de cada fluido en el sistema; factores que afectan directamente en las propiedades físicas de la mezcla. En particular, al trabajar con flujo bifásico líquido-gas, el radio volumétrico o *holdup* representa el volumen de líquido o gas presente en una sección volumétrica de tubería. Si se conociera extensivamente el comportamiento detallado de las sustancias dentro de la tubería, sería posible manipular las condiciones de trabajo para aprovechar al máximo la presión del flujo, la cantidad de gas, y/o el patrón de flujo presente, para así economizar en equipos de transporte, red de tuberías y accesorios, medidores equipos de separación y otros, de acuerdo con las características del sistema y la topografía de la región considerada.

Al igual que sucede con las tuberías de flujo homogéneo, existen variantes en cuanto a la dirección de tubería y la dirección del flujo que hay que tomar bajo consideración: las tuberías pueden ser horizontales, verticales o inclinadas; y el flujo puede ser paralelo ascendente, paralelo descendente o contracorriente. Para cada caso el modelaje de la situación física es distinto, y por ende, la obtención de un modelo riguroso para cada una de estas situaciones es complicado y es el objeto de los estudios que involucran este tipo de flujo.

Pero antes de llegar a modelar los diversos escenarios, los investigadores tuvieron la tarea de observar y clasificar los patrones de flujo para las posiciones de tubo más comunes: horizontal, vertical e inclinada.

Entonces es lógico pensar que los investigadores se hayan dedicado a experimentar con equipos de tuberías y a idear maneras para relacionar las diferentes variables, de forma que pudiesen obtener ecuaciones para predecir ciertos comportamientos. Esto es cierto, a partir de 1980 aproximadamente, los investigadores hicieron a un lado los modelos

empíricos para fundamentar el cálculo en relaciones experimentales, aunque todavía se hace uso de algunas correlaciones empíricas generales, para facilitar el uso de los modelos mecanísticos. El modelaje matemático de este fenómeno, basado en balances de momento, masa y energía, es bastante complicado, por lo que ha resultado en una serie de correlaciones empíricas que describen el proceso de una manera más sencilla. Los estudios realizados sobre el comportamiento de flujos multifásicos en tuberías horizontales intentan predecir el gradiente de presión que presentan estos flujos dentro de la tubería de producción, debido a la importancia que ello representa en la industria petrolera y por esto en el presente trabajo de investigación se realizara un estudio comparativo de dos correlaciones para flujo multifásico horizontal e inclinado el cual se comparara con datos arrojados por el simulador PIPEPHASE versión 8.1.

1.2 Introducción

En la industria petrolera y del gas natural, el término fase alcanza otra dimensión, ya que además de las fases conocidas como gas y líquido en el flujo bifásico, se incluye también la fase de crudo o petróleo. Al hablar de flujo multifásico podemos pensar en una mezcla multicomponentes, y no muy lejos de esta realidad en el lenguaje petrolero y gasífero, esta terminología está referida al flujo de gas libre, agua y petróleo a través de pozos petrolíferos ó de agua , líquido condensado y gas en pozos gasíferos.

El flujo multifásico representa el movimiento de gas libre y líquido que ocurre en el interior de la tubería de producción. La fase gaseosa puede encontrarse de forma homogénea con el líquido o coexistir formando un oleaje donde el gas empuja al líquido desde atrás o encima de él, originando crestas en algunos casos en la superficie del líquido. Estas características de

flujo son correlacionadas mediante grupos adimensionales tales como: el Número de Reynolds que le permiten diferenciar el flujo laminar (Número de Reynolds menores a 2.000) y al flujo turbulento (Número de Reynolds mayores a 2.000).

El problema del flujo horizontal multifásico se considera tan complejo y para el diseño de las tuberías de gran longitud es necesario conocer las caídas de presión que se producen a lo largo de ellas, por ello, el propósito de este trabajo consiste en evaluar algunas de las correlaciones de flujo multifásico horizontal contenidas en el simulador (PIPEPHASE Versión) y determinar mediante análisis estadístico las correlaciones más representativas de los gradientes de presión de una tubería para ciertas condiciones de operación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objeto general

Determinar el gradiente de presión para el estudio del comportamiento de una línea de flujo multifásico mediante el empleo de correlaciones en tuberías horizontales e inclinadas.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Describir el sistema donde se observara el comportamiento de las caídas de presión.
2. Definir las condiciones y características del sistema en estudio.
3. Calcular las caídas de presión a través de correlaciones en el sistema de tubería horizontal e inclinada con flujo multifásico con la hoja de cálculo Microsoft Excel.

4. Comparar los resultados de la caída de presión por medio de las correlaciones usando una hoja de cálculo Microsoft Excel y con el simulador Pipephase versión 8.1.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

El flujo multifásico es definido como el flujo simultáneo de numerosas fases, siendo el flujo bifásico el caso más simple. Las variables más importantes manejadas en este estudio son: flujo volumétrico de gas y líquido, propiedades físicas de las fases, diámetro e inclinación de la tubería, presión de operación, holdup, caída de presión y régimen de flujo. Este último ha sido la variable más importante de estudio, debido a que ésta afecta directamente los valores de holdup y caída de presión. El holdup se define como la relación de volumen ocupado por un gas en un segmento de tubería y el volumen total del segmento de la misma. El uso, medida y cálculo del holdup ha tenido profundos cambios durante el tiempo. De todos los métodos que existen el más usado, simple y preciso, ha sido el método de cierre rápido de válvula de bola.

La existencia de flujo Multifásico y los problemas asociados fueron reconocidos desde 1797. Numerosas correlaciones y ecuaciones fueron presentadas en el estudio del flujo horizontal y vertical en la literatura técnica pero las contribuciones más importantes se presentaron separadamente para cada tipo de flujo desde 1945.

La necesidad de entender el comportamiento de una mezcla multifásica dentro de una tubería se ha hecho más imperativa en los últimos años, debido a que la industria petrolera en particular avanzaría en gran medida si

se pudiese manejar eficientemente el flujo bifásico proveniente de un pozo antes de llegar a la refinería.

A partir de entonces diferentes correlaciones son presentadas para cada uno de los regímenes de flujo. Las correlaciones existentes para el cálculo de las transiciones entre patrones de flujo son muchas y muy variadas. Las primeras relaciones mecánísticas que fueron utilizadas ampliamente para el diseño de tuberías de flujo bifásico inclinado fueron la de Beggs y Brill (1973) y la de Barnea (1987). Posteriormente Lockhart y Martinelli (1949), Baker (1954), Dukler (1969), Eaton (1966), entre otros. Todos ellos con un solo fin y es estimar gradientes de presión para así poder analizar el comportamiento que pudiese presentar este tipo de flujo dentro de una tubería; trabajando con datos experimentales en el laboratorio con algunos parámetros conocidos mediante pruebas PVT.

A lo largo de los años, estos investigadores obtuvieron resultados positivos a través de sus experiencias y estudios; y que aun en estos tiempos siguen siendo aplicados.

2.2 Fluidos

Son agregaciones de moléculas, muy separadas en los gases y próximas en los líquidos, siendo la distancia entre las moléculas mucho mayor que el diámetro molecular, no estando fijas en una red, sino que se mueven libremente. Existen un gran número de definiciones de fluido, pero de forma genérica podríamos decir que, fluido es toda sustancia fácilmente deformable, es decir, al aplicarle un esfuerzo cortante, por muy pequeño que este sea, siempre aparecerá una deformación continua en el fluido en forma de gradiente de velocidades como reacción frente al esfuerzo.

2.3 Flujo

Movimiento de un fluido por un lugar.

2.4 Propiedades físicas de los fluidos:

Antes de diseñar los equipos y tuberías usadas en el proceso, es necesario definir algunas propiedades básicas de los fluidos, así como también analizar los procedimientos de cálculos, conversiones y operaciones usadas para los fluidos.

2.4.1 Viscosidad:

Es una propiedad dinámica, es medida cuando el fluido esta en movimiento. La viscosidad expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. El coeficiente de viscosidad absoluta, o simplemente la viscosidad absoluta de un fluido, es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas. Los gases son menos viscosos en comparación con el agua, esto es debido a las distancias intermoleculares de los mismos.

Se puede predecir la viscosidad de la mayor parte de los fluidos; en algunos la viscosidad depende del trabajo que se haya realizado sobre ellos.

Existe gran confusión respecto a las unidades que se utilizan para expresar la viscosidad; de ahí la importancia de utilizar las unidades adecuadas cuando se sustituyen los valores de la viscosidad en las fórmulas.

2.4.1.1 Viscosidad absoluta o dinámica

La unidad de viscosidad dinámica en el (SI) es el pascal segundo (Pa s) o también newton segundo por metro cuadrado (N s/m²), o sea kilogramo por metro segundo (kg/ms). El poise es la unidad correspondiente en el sistema CGS de unidades y tiene dimensiones de dina segundo por centímetro cuadrado o de gramos por centímetro segundo. El submúltiplo centipoise (Cp), 10m² poises, es la unidad más utilizada para expresar la viscosidad dinámica.

$$g = K * 10^{-4} * \exp(X * y) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$K = \frac{(9.376 + 0.01607 * Mg) (T \exp 1.5)}{209.2 + 19.26 * Mg + T} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$x = 3.448 + \frac{986.4}{T} + 0.01009 Mg \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$y = 2.4447 - 0.2224 * x \quad (\text{Ec. 2.4})$$

2.4.1.2 Viscosidad cinemática

Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. En el (SI) la unidad de viscosidad cinemática es el (m²/s). La unidad CGS correspondiente es el stoke (St), con dimensiones de centímetro cuadrado por segundo y el centistoke (CSt), 10e² Stokes, que es el submúltiplo más utilizado.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Por otro lado, se puede utilizar un instrumento muy simple, como es un viscosímetro de tubo, para medir la viscosidad cinemática de los aceites y otros líquidos viscosos. Con este tipo de instrumentos se determina el tiempo que necesita un volumen pequeño de líquido para fluir por un orificio y la medida de la viscosidad cinemática se expresa en términos de segundos.

Se observa que al aumentar la temperatura, la viscosidad de los líquidos disminuye, y la viscosidad de los gases aumenta, esto se debe al incremento de la actividad molecular.

2.4.2 Densidad:

Es una propiedad intensiva de la materia definida como la relación de la masa de un objeto dividida por su volumen. La masa es la cantidad de materia contenida en un objeto y el volumen es la cantidad de espacio ocupado por este. Se expresa de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{\textit{masa}}{\textit{volumen}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

A diferencia de la masa o el volumen, que dependen de cada compuesto, su cociente depende únicamente del tipo de material del cual está constituido y no de la forma o el tamaño del mismo. Por ello se dice que la densidad es una propiedad característica de cada sustancia.

En los sólidos, la densidad es relativamente constante, pero en los líquidos y particularmente en los gases varía con las condiciones de medida. Se debe especificar la temperatura y presión a la que se refiere el valor dado. Su masa viene dada por la relación del número de moles y el peso molecular.

2.4.3 Volumen Especifico:

El volumen específico es el inverso de la densidad, su unidad correspondiente en el sistema SI es el metro cúbico por kilogramo (m³/kg) (pie³/lib). El volumen específico se utiliza a menudo en los cálculos de flujo de vapor de agua y sus valores se dan en las tablas de vapor.

2.4.4 Gravedad específica:

La gravedad específica de un líquido (γ_l), se define como la relación de la densidad del líquido a la densidad del agua, ambas a la misma presión y temperatura.

$$\gamma_l = \frac{\rho_l}{\rho_{agua}} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

En términos de la industria petrolera, también se puede expresar:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{131,5 + \gamma_{\circ}} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

2.4.5 Compresibilidad:

Representa la relación entre los cambios de volumen y de presión a que está sometido un fluido. Las variaciones de volumen pueden relacionarse directamente con variaciones de la masa específica si la cantidad de masa permanece constante. En general se sabe que en los fluidos la masa específica depende tanto de la presión como de la temperatura.

2.5 Variables que Intervienen en el Flujo multifásico

2.5.1 Factor de entrapamiento del líquido (H_L):

Se define como la fracción del volumen de la tubería ocupado por el líquido.

$$H_L = \frac{\text{Volumen de líquido en un elemento de tubería}}{\text{Volumen del elemento de tubería}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

H_L = Factor de deslizamiento.

De lo anterior se tiene que si el volumen de elemento de tubería ocupado es que su valor varía entre cero y uno (0-1), cero para flujo de gas y uno para flujo de líquido.

La importancia de este factor radica en la determinación de propiedades de las mezclas como la densidad, velocidad real del gas y del líquido, viscosidad efectiva y transferencia de calor.

Este parámetro es función de propiedades del gas y del líquido, patrones de flujo, diámetro e inclinación de la tubería. El volumen relativo in-

situ es, en algunos casos, expresado en función del volumen ocupado por el gas, denominado Factor de atrapamiento del gas (λ_G) o fracción vacía. Dicho factor viene expresado como:

$$H_G = 1 - H_L \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

H_G y H_L : factor de atrapamiento del gas y líquido respectivamente, adim.

Este factor puede ser determinado directamente, utilizando la siguiente expresión:

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_G} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde:

λ_L : Es el factor de atrapamiento líquido sin deslizamiento, adim.

q_L : Es la suma de las tasas de agua y petróleo "In-situ", BN/d.

q_G : Es la tasa de gas "In-situ", PCN/d.

El factor de atrapamiento del gas sin deslizamiento o fracción vacía está definido por:

$$\lambda_G = \frac{q_G}{q_G + q_L} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

λ_G : Factor de atrapamiento del gas sin deslizamiento, adim.

q_L : Es la suma de las tasas de agua y petróleo "In-situ", BN/d.

q_G : Es la tasa de gas "In-situ", PCN/d.

2.5.2 Velocidad superficial:

Se define como la velocidad a desarrollar por una fase a través del área transversal de la tubería.

$$V_{SG} = \frac{q_G}{A} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

$$V_{SL} = \frac{q_L}{A} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Donde:

V_{SG} : velocidad superficial del gas, pie/s.

V_{SL} : velocidad superficial del líquido, pie/s.

q_G y q_L : caudal de gas y líquido respectivamente, pie³/s.

A : área transversal de la tubería, pie².

2.5.3 Velocidad real:

En este caso, el área a través de cual fluye una de las fases de la mezcla es reducida por la presencia de la otra fase. De tal manera, la velocidad real es:

$$V_L = \frac{q_E}{A_H} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde:

V_G y V_L : velocidad real del gas y líquido respectivamente, pie/s.

La velocidad de la mezcla se expresa como:

$$V_m = V_{SL} + V_{SG} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde:

V_m : velocidad de la mezcla, pie/s.

Si existe deslizamiento entre fases, la ecuación de velocidad de deslizamiento de la mezcla queda de la siguiente manera:

$$\sigma_L = \sigma_o * f_o + \sigma_w * f_w \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:

σ_L : tensión superficial de la mezcla, dinas/cm².

σ_o y σ_w : tensión superficial del petróleo y agua respectivamente, dinas/cm².

2.5.4 Tensión superficial

Es la tendencia de un líquido a ofrecer la mínima superficie libre, es decir la superficie líquida en contacto con un gas tiende a contraerse. Es una medida del inequilibrio en las fuerzas moleculares interfaciales para dos fases en contacto. En el flujo multifásico en tuberías el valor de tensión superficial o interfacial, gas-líquido y líquido-líquido, son usados para determinar los patrones de flujo y colgamiento de líquido.

$$\sigma_L = \sigma_O * \left(\frac{1}{1+WOR} \right) + \sigma_W * \left(\frac{WOR}{1+WOR} \right) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

2.5.5 Viscosidad:

La viscosidad de la mezcla ha sido utilizada para determinar tanto el número de Reynolds como otros números adimensionales empleados como parámetros en correlaciones. La ecuación a continuación, expresada en centipoise, ha sido usada por muchos investigadores para calcular la viscosidad del gas y del líquido en un flujo bifásico.

$$\mu_m = \mu_L * \lambda_L + \mu_G * \lambda_G \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

μ_N : Viscosidad sin deslizamiento, cps.

μ_S : Viscosidad con deslizamiento, cps.

μ_M : Viscosidad de la mezcla, cps.

μ_G, μ_l : Viscosidad del gas y del líquido, respectivamente adimensional.

2.5.6 Densidad:

La densidad es un valor para toda ecuación de flujo de fluidos. Interviene en la evaluación de los cambios totales de energía debido a la energía potencial y a la energía cinética.

La presencia del flujo de dos fluidos inmiscibles, como por ejemplo agua y petróleo, complican la definición de densidad. Del mismo modo, la influencia de la gravedad en la separación de las fases y el deslizamiento entre ellas, dificultan la evaluación de la densidad de la mezcla gas-líquido.

Mediante el conocimiento de las densidades del agua y el petróleo y de las tasas de flujo se puede conocer la densidad de una mezcla agua-petróleo, siempre y cuando se asuma que no existe deslizamiento entre las fases, haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$P_L = P_o * f_o + p_w * f_w \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde:

$$f_o = \frac{q_o}{q_o + q_w} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

$$f_w = 1 - f_o \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Para el cálculo de la densidad de una mezcla gas-líquido se necesita el conocimiento del factor de entrampamiento del líquido. Se han utilizado tres ecuaciones para el cálculo de la densidad en flujo bifásico.

$$\rho_m = \rho_L * H_L + \rho_G * H_G \quad (\text{Ec. 2.23})$$

$$\rho_m = \rho_L * \lambda_L + \rho_G * \lambda_G \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$\rho k = \frac{\rho_l * \lambda_l^2}{H_L} + \frac{\rho_G * \lambda_G^2}{H_G} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Donde:

f_w, f_o : Fracción de agua y petróleo, respectivamente, adim.

q_o, q_w : Tasa de petróleo y agua, respectivamente, BN/d.

H_L, H_G : Factor de atrapamiento del líquido y gas, respectivamente, adim.

λ_L : Es el factor de atrapamiento líquido sin deslizamiento, adim.

λ_G : Es el factor de atrapamiento gas si deslizamiento, adim.

ρ_L : Densidad del líquido, lbm/pe³.

La primera ecuación es usada para determinar el gradiente de presión con cambios de elevación. La segunda ecuación permite calcular la densidad en caso de que no se considere el deslizamiento entre las fases.

La tercera ecuación se usa para calcular la densidad de una mezcla donde requiere el cálculo de la caída de presión por fricción para efectos del número de Reynolds.

2.6 Tipos de flujos en tuberías horizontales

2.6.1 Flujo Simple:

Es un tipo de flujo que se da cuando una sola fase de fluido, bien sea líquido o gas, fluye bajo condiciones de presión y temperatura dadas.

2.6.2 Flujo Bifásico:

Es el flujo simultáneo de líquido y gas en una tubería. Por ejemplo, los pozos petroleros producen una mezcla de hidrocarburos, los cuales se separan parcialmente en gas y líquido cuando se reduce la presión. Además la producción de gas y crudo generalmente viene acompañada de agua y de partículas sólidas. Esta mezcla puede estudiarse como un flujo bifásico cuyos componentes son básicamente gas y líquido.

2.6.3 Flujo Multifásico:

Es el flujo de dos o más fases fluidas a través de una tubería, el flujo multifásico tiene especial interés para la industria petrolera, a la hora de simular el gradiente de presión en tuberías, así como el adimensionamiento de éstas, que transportan gas y líquido de manera simultánea.

Se define como el movimiento que ocurre en el interior de una tubería, de gas libre y líquidos. La fase gaseosa puede encontrarse de dos maneras: mezclada en forma homogénea con el líquido o formando un oleaje donde el gas empuja el líquido desde atrás o encima de él, originando crestas en algunos casos en la superficie del líquido.

Las diferencias fundamentales entre flujo bifásico y el de una sola fase son:

- Para flujo monofásico, la caída de presión depende del flujo, las propiedades físicas del fluido y la geometría del sistema.
- Para flujo bifásico, además de las consideraciones expuestas en el punto anterior, la caída de presión también depende del grado de vaporización.
- Para flujo bifásico, se presentan diferentes regímenes, dependiendo del grado de vaporización presente.
- Para flujo bifásico, la mayoría de los datos disponibles están basados en el sistema aire-agua.
- El flujo bifásico no se puede considerar como una ciencia exacta.
- El patrón de flujo bifásico gas-líquido se define como la distribución espacial que adoptan estas dos fases al fluir simultáneamente en un conjunto cerrado. La importancia de identificar el patrón de flujo en el diseño de tuberías y equipos, es la de evitar elevadas caídas de presión y flujos inestables en la entrada de los mismos. Por ejemplo, un *slug* (*Tapón*) puede ocasionar daños en tuberías y fallas mecánicas de las unidades, además de disminuir la efectividad de los inhibidores de corrosión.

2.7 Patrones de flujo en tuberías horizontales

La existencia de patrones de flujo en un sistema bifásico dado depende de las siguientes variables:

- Parámetros operacionales, es decir, tasas de flujo de gas y líquido.
- Variables geométricas incluyendo diámetro de la tubería y ángulo de inclinación.
- Las propiedades físicas de las dos fases, tales como; densidades, viscosidades y tensiones superficiales del gas y del líquido.

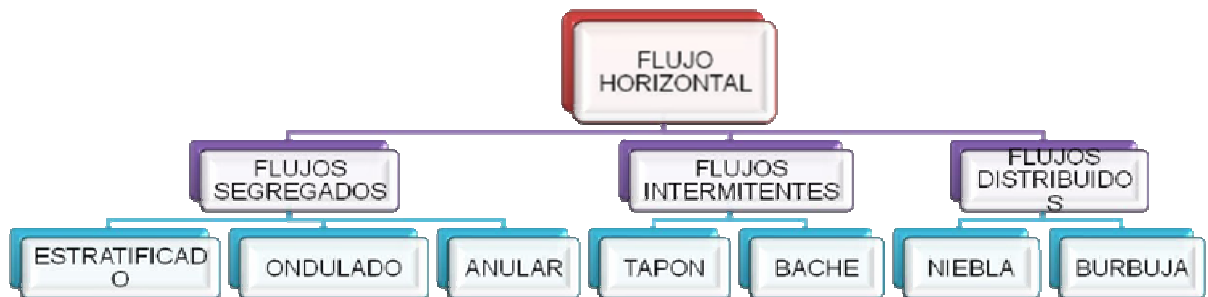


Figura Nro. 1 Diagrama de patrones de flujo.

2.7.1 Flujos segregados

2.7.1.1 Flujo estratificado:

El flujo Estratificado es sencillo de observar ya que se separan las fases y el gas corre por la parte superior del tubo, mientras el líquido corre por la inferior. Hay dos tipos:

Ondulado, que se caracteriza por la aparición de una especie de olas en la interfaz líquida por efecto de la velocidad del gas; Como el flujo de vapor aumenta aun más, el vapor se mueve apreciablemente más rápido que el líquido y la fricción resultante en la interfase forman olas de líquido. Y el Liso que presenta una interfaz gas-líquido calmada.

El patrón de flujo estratificado es una de las configuraciones más difíciles de obtener, solo se observa en flujo horizontal para valores bajos de velocidades superficiales de gas y de líquido. Para la inclinación 10° el patrón estratificado desaparece.

Esto es debido a que en flujo ascendente, el líquido tiende a retornar por efecto de la gravedad lo cual propicia el bloqueo de la tubería por tapones de líquido.



Figura Nro. 2 Patrón de flujo ondulante.

2.7.1.2 Flujo anular:

Se caracteriza por la continuidad en la dirección axial del núcleo y la fase gaseosa. El líquido fluye hacia arriba de una película delgada alrededor de una película de gas mojando las paredes de la tubería o conducto. Además, una película de líquido cubre las paredes de la tubería, y el gas fluye por el interior, llevando las partículas de líquido en suspensión.

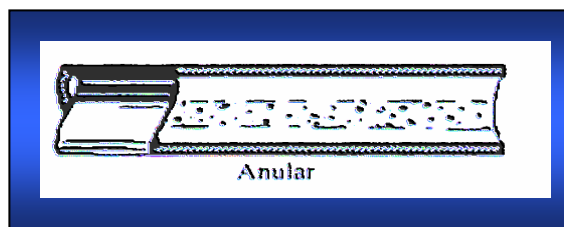


Figura Nro. 3 Patrón de flujo anular.

2.7.2 Flujos intermitentes

2.7.2.1 Flujo Intermitente Tipo Tapón:

El flujo tipo tapón se da cuando el caudal de gas es aumentado y las burbujas coalescen para formar burbujas más grandes y alargadas (siempre en la parte superior de la tubería) sin forma definida, separadas por un tapón líquido. La velocidad de estos tapones es mayor que la velocidad promedio del líquido.



Figura Nro. 4 Patrón de flujo tapón de líquido.



Figura Nro. 5 Patrón de flujo tapón de gas.

2.7.3 Flujos distribuidos

2.7.3.1 Flujo niebla:

El líquido está completamente "disuelto" en el gas; es decir, la fase continua es el gas y lleva en "suspensión" las gotas de líquido. Entre las

correlaciones de flujo multifásico horizontal, que cubren todos los rangos de tasas de producción y tamaño de tubería se tienen las siguientes.

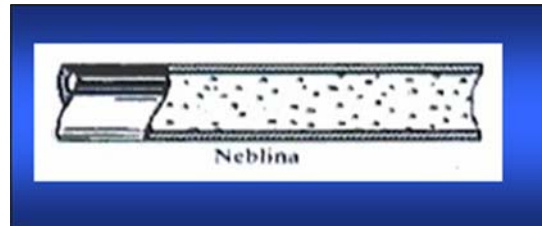


Figura Nro. 6 Patrón de flujo neblina.

2.7.3.2 Flujo burbuja:

El flujo Burbuja se caracteriza por contener pequeñas burbujas de gas flotando por la parte superior del flujo de líquido por ser la fase de menor densidad. En este tipo de flujo las velocidades del vapor y el líquido son aproximadamente igual.



Figura Nro. 7 Patrón de flujo burbuja

2.8 Caída de presión

Es la pérdida de la presión entre dos puntos de tubería (P1 y P2), que se produce dentro de un sistema de tuberías.

Ecuación General de Gradiente de Presión:

La ecuación que se aplica para todo tipo de flujo de fluidos en una tubería vertical u horizontal a cualquier ángulo de inclinación, es derivada de la ecuación general de energía y tiene la siguiente forma.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right) = \frac{\rho^* g^* \text{sen}\alpha}{g_c} + \frac{f^* \rho^* v^2}{2^* g_c^* d} + \frac{\rho^* v^* dv}{g_c^* dl} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Donde:

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)$: Caída de presión total del sistema lpc/pie.

$\left(\frac{dv}{dl}\right)$: Componente de aceleración pie/seg².

ρ : Densidad del fluido, lbm/pie³.

g : Aceleración de la gravedad, pie/seg².

g_c : Factor de conversión de unidades, adim.

α : Ángulo de inclinación, grados (°).

f : Factor de fricción, adim.

d : Diámetro de la tubería de producción, pulg.

v : Velocidad del fluido, pie/seg.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{TOTAL} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{ELEVACION} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{FRICCION} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{ACELERACION} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

2.9 Variables que afectan la caída de presión en tuberías horizontales

2.9.1 Diámetro de la tubería:

A menor diámetro mayor será la pérdida de presión a lo largo de la tubería.

2.9.2 Tasa de flujo:

A mayor tasa de flujo, mayor será la velocidad de los fluidos transportados, lo que provoca un aumento en las pérdidas por fricción.

2.9.3 Relación Gas-Líquido:

En tuberías horizontales, contrariamente a lo que ocurre en tuberías verticales, a mayor relación gas-líquido, mayor la pérdida de presión, ello se debe a que la tubería debe transportar un fluido adicional, en otras palabras, a mayor relación gas-líquido mayor será la velocidad de la mezcla por lo que las pérdidas de presión por fricción serán mayores.

2.9.4 Viscosidad líquida:

A mayor viscosidad de la fase líquida mayor será la resistencia que dicha fase opone a fluir, por lo que mayores serán las pérdidas de energía en la tubería.

2.9.5 Relación Agua-Petróleo:

Excepto para crudos viscosos la relación agua petróleo no tiene un marcado efecto sobre las curvas de gradiente horizontal.

2.10 Correlaciones para caída de presión en tuberías horizontales

Hay mucha literatura disponible sobre flujo multifásico en tuberías horizontales, lo cual hace muy complicado determinar cuál de estas publicaciones ha contribuido más al desarrollo de información relacionada para este tipo de flujo. El objeto de los estudios realizados acerca del comportamiento del flujo multifásico en tuberías es predecir el gradiente de presión a través de la tubería de producción.

Entre las correlaciones más utilizadas tenemos:

2.10.1 Beggs & Brill:

La correlación de Beggs and Brill (1973) fue desarrollada en 584 pruebas tomadas de datos obtenidos experimentalmente de pruebas de arreglos a pequeña escala. La prueba consistió en una tubería de acrílico de 1 y 1,5 pulgadas de diámetro y 90 pies de longitud, la cual tenía un mecanismo que lograba inclinar la tubería de horizontal a vertical y los fluidos utilizados en aire y agua.

Los parámetros estudiados y sus rangos de variación son:

- Gasto de gas, 0 a 300 Mpies³/ día.
- Gasto de liquido, 0 a 30 gal/min (0 a 1,635.10⁶ litros/día).

- Presión promedio del sistema, 35 a 95 psia.
- Diámetro de la tubería, 1 a 1,5 pulg.
- Colgamiento de líquido, 0 a 0,870.
- Gradiente de presión, 0 a 0,8 psi/pie.
- Angulo de inclinación, -90° a +90°.
- Patrón de flujo horizontal.

Ecuación general para el gradiente de presión:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right) = \frac{43.539 \cdot f_{TP} \cdot V_m^2}{\ell_{ns} \cdot d^5 \cdot (1 - EK)}$$

(Ec. 2.32)

Donde:

f_{TP} : Factor de fricción

V_m : velocidad de la mezcla, pie/seg.

ℓ_{ns} : densidad sin desplazamiento, lb/pie³.

d : diámetro de la tubería, pie.

EK : energía cinética

Donde:

$$EK = \frac{7.2557 \cdot \ell_m \cdot V_g \cdot V_m}{\ell_{nd} \cdot d^3 \cdot P \cdot \ell_g}$$

(Ec. 2.33)

Donde:

ℓ_g : densidad del gas, lb/pie³.

P : presión del sistema, Psia.

V_g : velocidad del gas, pie/seg.

ℓ_{nd} : densidad con desplazamiento, lb/pie³.

ℓ_m : densidad de la mezcla, lb/pie³.

Definición de cada parámetro:

$$f_{TF} = \left(\frac{f_{TF}}{f_n} \right) f_n \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Donde:

$$f_n = \left[2 * \log \left(\frac{N_{Re}}{45223 * \log N_{Re} - 3.8215} \right) \right]^{-2} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

$$N_{Re} = \frac{124 * d * V_m * \rho_n}{\mu_n} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

$$\mu_n = \mu_L * \lambda_L + \mu_g * (1 - \lambda_L) \quad (\text{Ec. 2.37})$$

$$\frac{f_{TF}}{f_n} = e^S \quad (\text{Ec. 2.38})$$

$$S = \frac{\ln X}{-0.0523 + 3.182 \ln X - 0.8725 (\ln X)^2 + 0.01853 (\ln X)^3} \quad (\text{Ec. 2.39})$$

$$X = \frac{\lambda_L}{[H_L(\theta)]^2} \quad (\text{Ec. 2.40})$$

En el intervalo $1 \leq X \leq 1.2$ la función S es calculada por:

$$S = \text{Ln}(2.2 X - 1.2) \quad (\text{Ec. 2.41})$$

Tabla Nro. 1 Limites de régimen de flujo horizontal.

REGIMEN DE FLUJO	LIMITE
SEGREGADO	$\square \text{ EMBED Equation. 3 } \square \square \square < 0.01 \text{ Y } N_{FR} < L_1$ o $\square \text{ EMBED Equation. 3 } \square \square \square \geq 0.02 \text{ Y } N_{FR} < L_2$
TRANSICION	$\square \text{ EMBED Equation. 3 } \square \square \square \geq 0.01 \text{ Y } L_2 < N_{FR} < L_3$
INTERMITENTE	$0.01 \leq \square \text{ EMBED Equation. 3 } \square \square \square < 0.4 \text{ Y } L_3 < N_{FR} \leq L_1$ o $\square \text{ EMBED Equation. 3 } \square \square \square \geq 0.4 \text{ Y } L_3 < N_{FR} \leq L_4$
DISTRIBUIDO	$\square \text{ EMBED Equation. 3 } \square \square \square < 0.4 \text{ Y } N_{FR} \geq L_1$ o $\square \text{ EMBED Equation. 3 } \square \square \square \geq 0.4 \text{ Y } N_{FR} > L_4$

$$N_{FR} = 7734,9 \frac{V_m^2}{\ell_{ns}^2 \cdot d^3} \quad (\text{Ec. 2.42})$$

$$\lambda_L = \frac{V_{SL}}{V_m} \quad (\text{Ec. 2.43})$$

Con N_{FR} y λ_L , se obtienen las constantes L gráficamente.

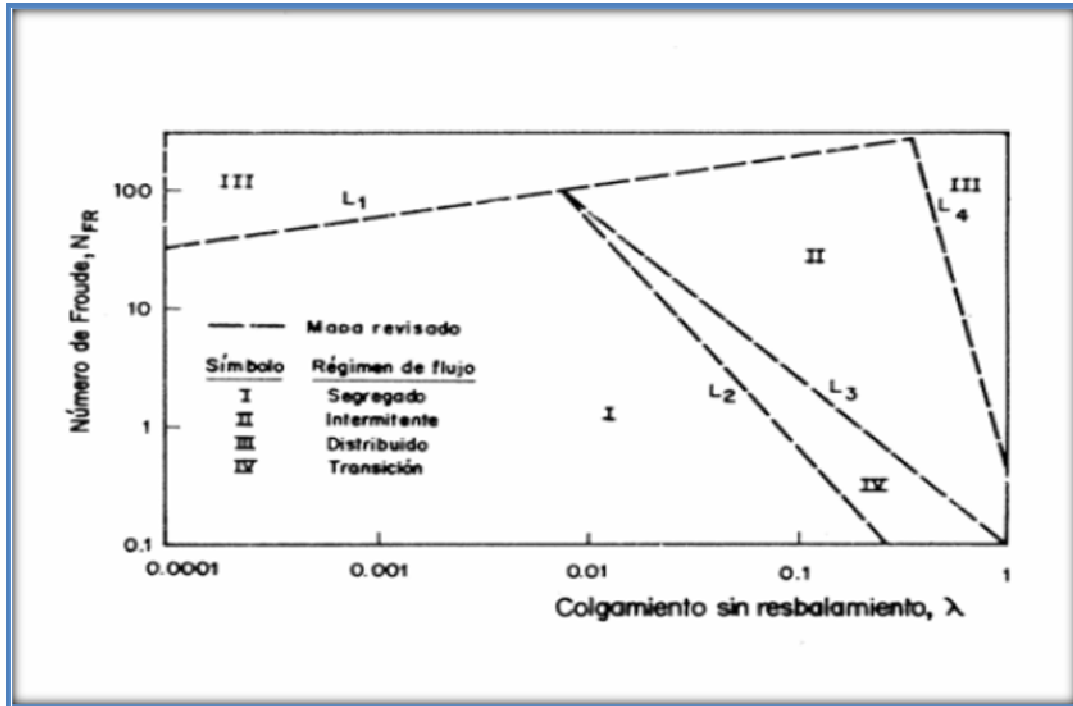


Figura Nro. 8 Grafica para obtener las constantes L.

Análiticamente:

$$L_1 = 316 * \lambda_L^{0.302} \quad (\text{Ec. 2.44})$$

$$L_2 = 0.9252 \times 10^{-3} * \lambda_L^{-2.4684} \quad (\text{Ec. 2.45})$$

$$L_3 = 0.1 * \lambda_L^{-1.4516} \quad (\text{Ec. 2.46})$$

$$L_4 = 0.5 * \lambda_L^{-6.738} \quad (\text{Ec. 2.47})$$

$$H_{L(0)} = \frac{a \cdot \lambda_L^2}{N_{FR}}$$

(Ec. 2.48)

Tabla Nro. 2 Valores de las constantes para los regímenes de flujo

PATRON DE FLUJO	A	B	C
SEGREGADO	0.98	0.4846	0.0868
INTERMITENTE	0.845	0.5351	0.0173
DISTRIBUIDO	1.065	0.5824	0.0609

Quando el flujo cae en el régimen de transición, el factor de entrapamiento de líquido debe ser calculado usando la ecuación del régimen intermitente y segregado con el siguiente factor de peso:

$$H_{L(TRANS)} = A * H_{L(SEGR)} * (1 - A) * H_{L(INTER)} \quad (\text{Ec. 2.49})$$

Donde:

$$A = \frac{L_1 - N_{FR}}{L_2 - L_1} \quad (\text{Ec. 2.50})$$

$$\rho_n = \rho_L * \lambda_L + \rho_g * (1 - \lambda_L) \quad (\text{Ec. 2.51})$$

Si existe inclinación en la tubería, el H_L debe ser corregido utilizando:

$$H_L(\theta) = H_L(0) * \Psi \quad (\text{Ec. 2.52})$$

Donde:

$$\Psi = 1 - C (\text{Sen}(1,8 \theta) - 0.333 \text{Sen}^3(1,8)) \quad (\text{Ec. 2.53})$$

Donde θ es el ángulo de inclinación de la tubería en relación a la horizontal, y

$$C = (1 - \lambda_L) \ln (d^* \lambda_L^E N_{LV}^f N_{FR}^g) \quad (\text{Ec. 2.54})$$

Donde:

λ : Factor de entrapamiento sin deslizamiento.

N_{LV} : Numero de velocidad del liquido.

d,e,f y g: constantes del régimen de flujo.

Tabla Nro. 3 Constantes para los regímenes de flujo

PATRÓN DE FLUJO	θ	D	E	f	G
SEGREGADO	> 0	0.011	- 3.768	3.539	-1.614
INTERMITENTE	> 0	2.96	0.305	-0.4473	0.0978
DISTRIBUIDO	> 0			C=0	$\Psi=1$
TODOS	< 0	4.70	-0.3692	0.1244	-0.5056

Eaton y colaboradores:

Esta correlación fue propuesta en 1966 y está basada en datos de campo. Las pruebas fueron realizadas en tuberías de 2 pulg y 4 pulg de diámetro, cada una de ellas con 1700 pies de longitud. Los parámetros estudiados fueron:

- Variación de tasa de liquido entre 50 y 5500 BN.
- Variación de la tasa de gas entre 0 y 10 MMPCN/D.
- Variación de la viscosidad del liquido entre 1 y 13.5 Cps.
- Presión media del sistema entre 70 y 950 Lpc.

- Entrampamiento del líquido entre 0 y 1.
- Patrón de flujo.
- Caída de presión.

Ecuación general para el gradiente de presión:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right) = \frac{43.539 * f_{TP} * V_m^2}{l_{ng} * d^5 * (1-EK)} \quad (\text{Ec. 2.55})$$

Donde:

$$EK = \frac{V_L * \Delta(V_L^2) + V_g * (V_g^2)}{9266.1 * \left[\frac{V_L}{l_L} + \frac{V_g}{l_g}\right] * \Delta P} \quad (\text{Ec. 2.56})$$

Definición de parámetros:

$$Y = \left(\frac{V_L}{V_m}\right)^{0.1} * f_{TP} \quad (\text{Ec. 2.57})$$

Donde:

$$X = \frac{22737 * (V_g * V_m)^{0.5}}{\mu_g * d^{2.25}} \quad (\text{Ec. 2.58})$$

Con X e Y se obtiene f_{TP} gráficamente:

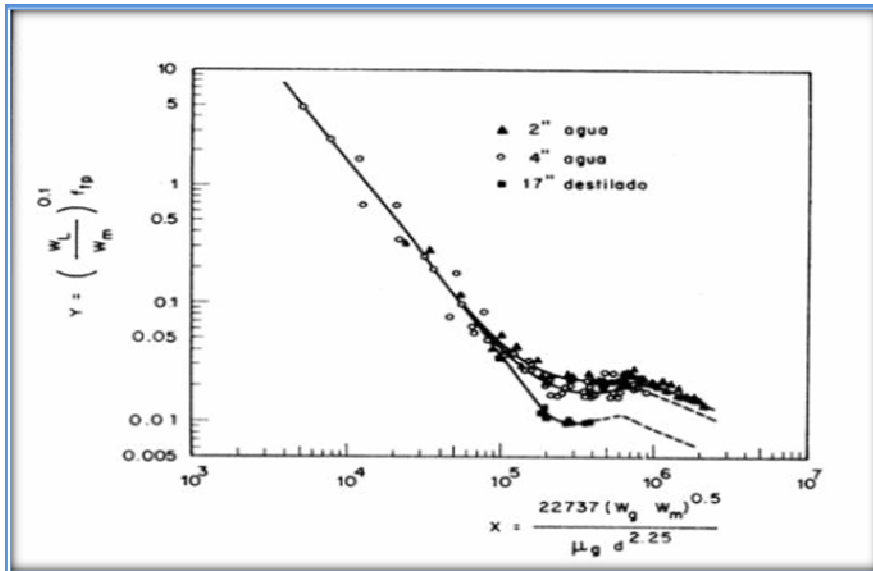


Figura Nro. 9 Grafica para la obtención de f_{TP}

Análíticamente:

Para obtener las velocidades reales de líquido (V_L) y del gas (V_g), es necesario conocer el colgamiento del líquido (HL) en cualquier parte de la tubería.

Se requiere determinar primero el valor de ψ mediante la siguiente ecuación:

$$\psi = \left[\frac{N_{LV}^{0.575}}{N_{gV} * N_d^{0.0277}} * \left(\frac{P}{14.7} \right)^{0.05} * \left(\frac{N_L}{0.00226} \right)^{0.1} \right] \quad (\text{Ec. 2.59})$$

Para:

$$0.001 \leq \psi \leq 0.11$$

$$H_L = 0.109992 + 0.030058 X - 0.001376 X^2 \quad (\text{Ec. 2.60})$$

$$X = 100\Psi - 3.3 \quad (\text{Ec.2.61})$$

Para:

$$0.11 < \Psi \leq 10.0$$

$$H_L = 0.787768 + 0.038268X - 0.002135X^2 - 0.000027X^3 + 7 * 10^{-6}X^4 \quad (\text{Ec. 2.62})$$

$$X = \frac{(\log\Psi - 0.1063)}{0.1} \quad (\text{Ec. 2.63})$$

Para obtener los Δ de las velocidades:

$$\Delta(V_L^2) = V_{L2}^2 - V_{L1}^2 \quad (\text{Ec. 2.64})$$

$$\Delta(V_g^2) = V_{g2}^2 - V_{g1}^2 \quad (\text{Ec. 2.65})$$

Si las pérdidas por fricción son despreciables no es necesario determinar H_L :

Si $X \leq 60000$

$$Y = 6677920X^{-1.64941} \quad (\text{Ec. 2.66})$$

Si $60000 < X \leq C$

$$Y = 0.01C_1 \quad (\text{Ec. 2.67})$$

$$C = 819194 - 39981.7d + 2838.8d^2 - 73.26d^3 \quad (\text{Ec. 2.68})$$

$$\begin{aligned} \text{Log } C_1 = & 2.37354 - 2.10458r + 0.5757r^3 - 0.14189r^4 + S(0.46 - 0.9373r + \\ & 0.45966r^3 - 0.15975r^4) + S^2(0.451 - 0.3629r - 0.1994r^3 + 0.12835r^4) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.69})$$

$$r = \log(0.0001X) \quad (\text{Ec. 2.70})$$

$$S = \log d \quad (\text{Ec. 2.71})$$

Si $X > C$

$$Y = (21.525 - 1.55934d + 0.02278d^2 + 0.00131d^3) X^{-0.49} \quad (\text{Ec. 2.72})$$

2.10.2 Baker:

Esta corrección está basada en el trabajo de Lockhart y Martinelli, pero incorporando una ecuación para cada uno de los regímenes de flujo propuestos por Baker.

Los parámetros de correlación de Lockhart y Martinelli Φ_L , Φ_g y X fueron definidos como:

$$\Phi_L = \left(\frac{[\Delta P / \Delta L]_m}{[\Delta P / \Delta L]_L} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.73})$$

$$\Phi_g = \left(\frac{[\Delta P / \Delta L]_m}{[\Delta P / \Delta L]_g} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.74})$$

$$X = \left(\frac{[\Delta P / \Delta L]_L}{[\Delta P / \Delta L]_g} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.75})$$

Baker propuso la siguiente ecuación general para los siguientes patrones de flujo, suponiendo que ambas fases fluyen en forma turbulenta:

$$X = \frac{a^* X^b}{L^c} \quad (\text{Ec. 2.76})$$

Tabla Nro. 4 constantes del régimen de flujo

Patrón de flujo	A	B	C
BURBUJA	14.2	0.75	0.1
TAPON	27.315	0.855	0.17
ESTRATIGRAFICADO	15400	1.0	0.8
ONDULADO	15400	0.75	0.65
DISPERSO	4.8- 0.3125 Φ t	0.343- 0.021 Φ T	0

Para identificar el patrón de flujo será necesario analizar las condiciones de límite, las cuales se presentan a continuación:

Tabla Nro. 5 Limites de patrón de flujo

PATRON DE FLUJO	LIMITE
BURBUJA	$N_Y \geq L_1$ $N_X \geq 264$ Y $N_Y \geq 18000$
TAPON	$N_Y \leq L_3$ Y $L_1 > N_Y \geq L_2$
ESTRATIFICADO	$L_2 > N_Y \leq L_4$
ONDULADO	$L_2 > N_Y > L_4$
DISPERSO	$N_X < 264$ Y $L_3 < N_Y \geq L_2$

Donde:

$$L_1 = 10^{3.87 - 0.667 \log N_X} \quad (\text{Ec. 2.77})$$

$$L_2 = 10^{4.2675 - 0.687 \log N_X} \quad (\text{Ec. 2.78})$$

$$L_3 = 10^{3.02 + 0.51 \log N_X} \quad (\text{Ec. 2.79})$$

$$L_4 = 10^{3.78 - 0.2199 \log N_X} \quad (\text{Ec. 2.80})$$

Con

$$N_X = \frac{W_L * \lambda * \Psi}{W_g} \quad (\text{Ec. 2.81})$$

$$N_Y = \frac{W_g}{\lambda} \quad (\text{Ec. 2.82})$$

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_s}{0.0764} \right) * \left(\frac{\rho_L}{624} \right) \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.83})$$

$$\Psi = \left(\frac{72}{\sigma_L} \right) \left[\mu_L * \left(\frac{624}{\rho_L} \right) \right]^{1/3} \quad (\text{Ec.2.84})$$

Donde:

W_L : velocidad de la masa de liquido, Lb/h.

W_g : velocidad de la masa de gas, Lb/h.

Las velocidades de masa de los fluidos, en Lb/ h, se obtiene mediante las ecuaciones:

$$W_L = 0.234 * Q_o * \left(B_o + \frac{f_w * B_w}{1 - f_w} \right) \left[\rho_o + f_w * (\rho_w - \rho_o) \right] \quad (\text{Ec. 2.85})$$

$$W_g = 0.234 * Q_o * \rho_g * (RGP - R_S) * B_g \quad (\text{Ec. 2.86})$$

BAKER expreso las perdidas por fricción en términos de ecuación de Fanning.

Así, los gradientes de presión para cada fase vienen dados por:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta H} \right)_L = \frac{f_L * \rho_L * Q_L^2}{3.38 * 10^{11} * \phi_t^5} \quad (\text{Ec. 2.87})$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta H} \right)_g = \frac{f_g * \rho_g * Q_g^2}{3.38 * 10^{11} * \phi_t^5} \quad (\text{Ec. 2.88})$$

Donde:

ϕ_t : Diámetro interno de la tubería, pies.

Q_L y Q_g : tasas de producción de líquido y gas a condiciones de flujo, BN/día.

ρ_L y ρ_g : Densidades del liquido y del gas, Lb/pie².

$$Q_L = Q_o * \left(B_o + \frac{f_w * B_w}{1 - f_w} \right) \quad (\text{Ec. 2.89})$$

$$W_g = Q_o * (RGP - R_s) * B_g \quad (\text{Ec. 2.90})$$

El gradiente de presión bifásico se obtiene mediante:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta H} \right)_f = \Phi_m^2 \left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_g \quad (\text{Ec. 2.91})$$

Los factores de fricción de ambas fases f_L y f_g son calculados mediante la ecuación de Jain o de Colebrook, a pesar de que los gradientes de presión son expresados en la formula de Fanning.

Los números de Reynolds para cada fase en flujo simple son obtenidos mediante:

$$NRE_{(L)} = 0.1231 * \frac{\rho_L * Q_L}{\mu_L * \phi_t} \quad (\text{Ec. 2.92})$$

$$NRE_{(L)} = 0.1231 * \frac{\rho_g * Q_g}{\mu_g * \phi_t} \quad (\text{Ec. 2.93})$$

Para incluir el efecto de elevación en tuberías inclinadas se propone anexar el factor correspondiente a la energía potencial. Entonces. La caída de presión total, excluyendo las perdidas debida al movimiento, es expresada por la ecuación:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta H} \right)_f = \frac{\rho_m}{144} * Sen\theta * \left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_f \quad (\text{Ec. 2.94})$$

ρ_m : densidad de la mezcla, Lb/pie³.

θ : ángulo de inclinación.

El factor de entrapamiento del líquido, H_L , puede ser calculado mediante la expresión por Flanigan:

$$H_L = \frac{1}{1 + 0.3264 * v_{Sg}^{1.006}} \quad (\text{Ec. 2.95})$$

2.10.3 Lockhart & Martinelli

Lockhart y Martinelli fueron los primeros en presentar una correlación práctica, desarrollada en la Universidad de California en 1949. El estudio fue llevado a efecto en tuberías pequeñas, con diámetros entre 0.0586pulg y 1 pulg.

Los autores propusieron cuatro correlaciones de pérdidas de presión para cuatro mecanismos de flujo diferentes, a saber:

- Ambas fases fluyendo viscosamente.
- Flujo turbulento de ambas fases.
- Una fase fluyendo viscosamente y la otra de manera turbulenta.

Lockhart y Martinelli definieron tres parámetros de correlación, en función de las caídas de presión de cada fase suponiendo que ellas fluyeran solas y de la caída de presión ocurre prácticamente en las secciones de tubería con flujo hacia arriba y que la caída de presión total en la línea disminuye a medida que aumenta el flujo de gas.

El cálculo de gradiente se da a través de las siguientes ecuaciones:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = \Phi_L^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_L \quad (\text{Ec. 2.96})$$

O

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = \Phi_g^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_g \quad (\text{Ec. 2.97})$$

y

$$X = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_L}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_g}} = \sqrt{\frac{(\Delta P)_L}{(\Delta P)_g}} \quad (\text{Ec. 2.98})$$

Donde:

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_L$: Gradiente de presión que existiera si solo fluyera líquido.

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_g$: Gradiente de presión que existiera si solo fluyera gas.

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T$: Gradiente total de presión.

Calculo del gradiente de presión suponiendo que solo fluye líquido:

$$\Delta P_L = 1.1476 \times 10^{-5} \frac{f_{NL} \cdot q^2 \cdot \gamma_L}{d^5} \quad (\text{Ec. 2.99})$$

Donde:

f : Factor de fricción.

γ_l : Gravedad específica del líquido.

q : Caudal, pie³/seg.

L : Longitud, pie.

d : Diámetro de la tubería, pie.

$$f = \frac{0.32}{d^{1/3}}$$

(Ec. 2.100)

De igual forma se trabaja con el gas si existiese.

CAPITULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Metodología:

Este Trabajo fue llevado a cabo con la finalidad de realizar un análisis estadístico de algunas de las correlaciones de flujo multifásico horizontal e inclinado, para así comparar la correlación que mejor presente resultados con respecto a el simulador seleccionado Pipephase versión 8.1 a utilizar de acuerdo a las condiciones del sistema dado, siendo para ello necesario utilizar la metodología que a continuación se describe:

- ✓ Revisión bibliográfica.
- ✓ Descripción del sistema para obtener la caída de presión de una línea de flujo.
- ✓ Definición de las condiciones y características del sistema en estudio.
- ✓ Aplicación de las herramientas de evaluación.
- ✓ Cotejo del sistema.

3.2 Revisión bibliográfica.

Durante esta primera etapa se revisaron las bibliografías relacionadas con el tema en estudio, a fin de explicar la importancia y dar el primer y mejor enfoque en la elaboración del trabajo. Esta revisión es continua y se extiende durante el desarrollo de todo el proyecto, siendo más intensa al comienzo de la investigación, debido a que es en esta etapa donde se logra la familiarización con el tema, con el fin de establecer posibles correlaciones de flujo multifásico horizontal e inclinado a utilizar para luego hacer la

comparación con el simulador. Toda la información teórica referente a la investigación se obtuvo a través de material bibliográfico relacionado con el tema gradientes de presión, correlaciones de flujo multifásico horizontal e inclinado, etc. Este material bibliográfico obedece a tesis de grado encontradas en la biblioteca central de la Universidad de Oriente, información vía electrónica recopilada desde internet, informes técnicos entre otros.

3.3 Descripción del sistema para obtener la caída de presión de una línea de flujo.

En este objetivo se conocerá el proceso para el cálculo de caída de presión el cual juega un rol muy importante en la línea de flujo multifásico horizontal e inclinado para el transporte del mismo.

El sistema a estudiar consta de 4 tramos de tuberías que van desde el cabezal del pozo A-10 hasta el separador. El primer tramo es una línea de flujo horizontal el cual tiene una longitud de 4921,2 pies, seguido de una línea de flujo con un ángulo de inclinación negativo de $0,5588^\circ$ con 3280,84 pies de longitud. Posteriormente unido a estas hay una línea de flujo con una longitud de 3280,84 pies con un ángulo de inclinación positivo de $0,8732^\circ$, por último se tiene un tramo que consta de 4921,2 pies de longitud horizontal.

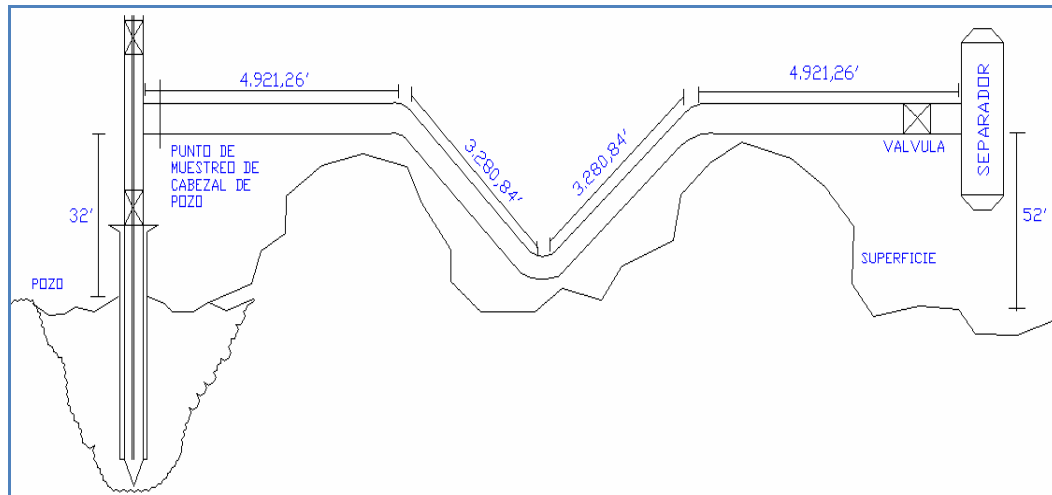


Figura Nro. 10 Diagrama del sistema en estudio

3.4 Definición de las condiciones y características del sistema en estudio.

En esta etapa se procede a establecer rangos operacionales y recopilar la información requerida para crear la línea de flujo multifásico horizontal e inclinado de igual manera aplicar los métodos requeridos para tener el cálculo de la caída de presión correspondiente de cada uno.

El sistema en estudio parte del cabezal del pozo A-10 a unas condiciones de temperatura y presión de 120°F Y 500 psi respectivamente y maneja un fluido multifásico el cual presenta una serie de condiciones las cuales se muestran en la tabla siguiente:

Tabla Nro. 6 Datos del sistema en estudio

Presión entrada (Psig)	500
Temperatura (°F)	120
Diámetro (pulg)	4
g	0,65
°API	42
q_o (BPD)	2000
RGP(PC/BN)	1000
L (pie)	16404.08
θ₁	-0,5588
θ₂	0,8732

3.5 Aplicación de las herramientas de evaluación

3.5.1 Cálculo de las caídas de presión a través de correlaciones en el sistema de tubería horizontal e inclinada con flujo multifásico con la hoja de cálculo Microsoft Excel.

Por medio de las correlaciones se elaborara una hoja de cálculo Microsoft Excel, el cual contiene la siguientes correlaciones de flujo multifásico horizontal e inclinado: “Beggs & Brill” y “Eaton & Colaboradores”, esta herramienta nos permite obtener de manera práctica los gradientes de presión de un pozo dado del cabezal al separador mediante dichas correlaciones, además de reflejar el comportamiento de las curvas de gradiente de presión para cada caso.

A continuación se presentan las ventanas o componentes que integran el programa desarrollado en el presente estudio

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

DATOS:			
Presion entrada (Psi)	414,1998	428,8998	psia
Temperatura (°F)	120	580	°R
Diametro (pulg)	4	0,3333333	Pie
γ_g	0,65		
°API	42		
qo (BPD)	2000		
ROG(PC/BN)	1000		
Area (pul ²)	12,56636		
β_c	32,2		
L (pie)	1640,4		

Horizontal	
Caída de Presion	
$\Delta p =$	11,6388 psia
Presión 2	
P2 =	417,2610 psia

1.- Se asume Δp	11,6388 Psi	5.- Densidades
-------------------------	-------------	----------------

Figura Nro. 11 Representación del programa realizado en Microsoft Excel 2007 por ambos métodos de correlación.

Procedimiento Aplicado:

La determinación de dicha correlación se realizó mediante la herramienta Microsoft Excel. Una vez introducidos los datos del sistema en el programa, se procede a realizar los cálculos con las diferentes correlaciones de flujo multifásico horizontal e inclinado que ofrece la hoja de cálculo. En las figuras siguientes se muestra el paso a paso del cálculo de la caída de presión para cada correlación:

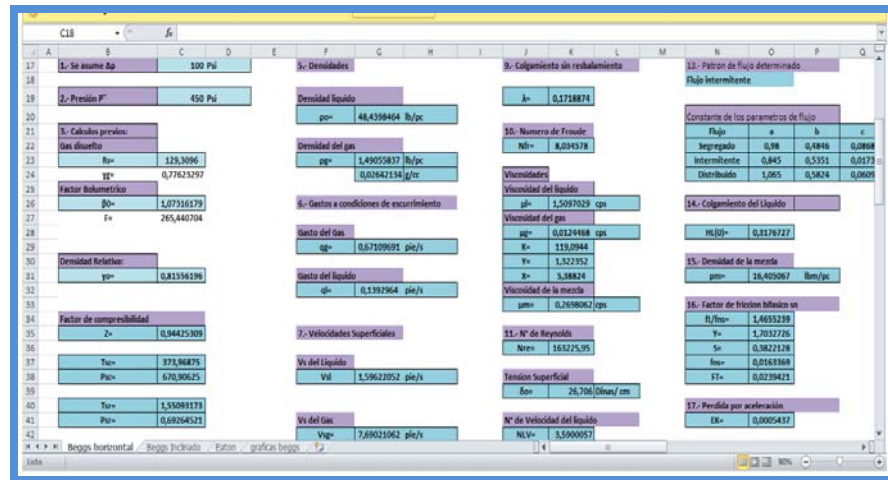


Figura Nro. 12 Representación del procedimiento de cálculo realizado en Microsoft Excel 2007 para Beggs and Brill.

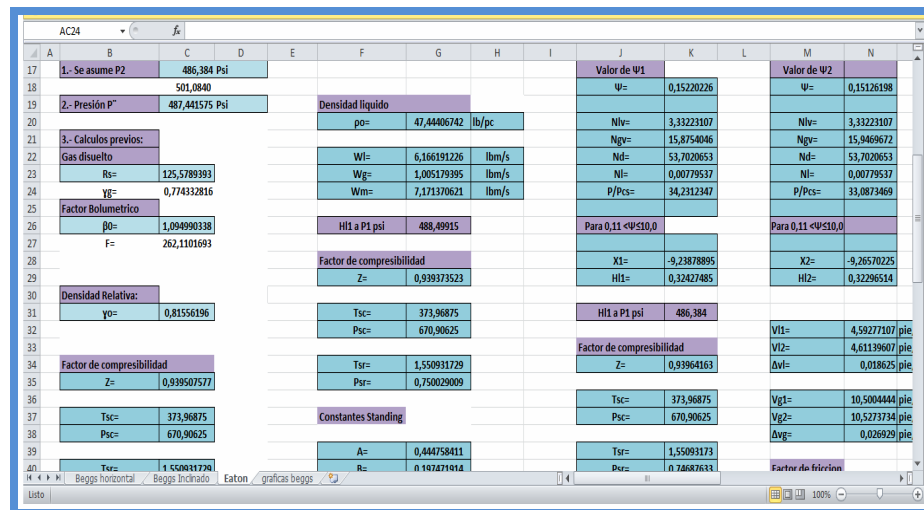


Figura Nro. 13 Representación del procedimiento de cálculo realizado en Microsoft Excel 2007 para Eaton & Colaboradores.

Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas de presión con profundidad, las cuales permiten comparar las diferentes curvas con el comportamiento de acuerdo al tramo establecido (línea completa, por tramos

cortos y según la premisa correspondiente). Se escogerá la correlación que más se ajuste a las condiciones reales de perfil de presión dada.

A continuación se puede apreciar la muestra de cálculo para los métodos Beggs & Brill y Eaton & colaboradores para obtener la caída de presión en una línea de flujo.

Muestra de cálculo:

Beggs & Brill

ESCENARIO 1: Horizontal 1

1. Se supone un $\Delta p = 100 \text{ psi}$
2. Se calcula la $P'' = P_{\text{prom}}$ en el intervalo

$$P'' = P_1 - \Delta p / 2 = 450 \text{ psi}$$
3. Con el análisis PVT o con las correlaciones apropiadas (mostrada en este mismo capítulo) se calcula:
 $R_s, \beta_o, \beta_w, \mu_o, \mu_g, \mu_w, \sigma_o, \sigma_w, Z_g$ a condiciones de P'' y T .
4. Calcular la densidad relativa:

$$\rho_{API} = \frac{141,5}{131,5 + 42} = 0,82$$

Con la ecuación 2.8

5. Calcular las densidades del líquido y del gas:
 Usando la ecuación 2.20 se tiene que:

$$\rho_l = \frac{(350 * 0,82) + (0,0764 * 104 * 0,65)}{5,615 * 1,064} = \frac{48,44 \text{ lbm}}{\text{pie}^3}$$

$$\rho_g = \frac{0,0764 * 0,65 * 464,7 * 520}{14,7 + 580 + 0,94} = 1,4905 \text{ lbm/pie}^3$$

6. Calcular los gastos de gas y líquido:

$$q_g = \frac{3,27 * 10 - 7 * 0,94 * 2000 * (1000 - 104) * 580}{\dot{P} + 14,7} = \frac{0,1392 \text{ pie}^3}{\text{s}}$$

$$q_l = 6,49 * 10 - 5 * 2000 * 1,064 = 0,1381 \text{ bm/pie}^3$$

7. Calcular las velocidades superficiales del gas, líquido y de la mezcla:

Utilizando las ecuaciones 2.13, 2.14 y 2.15:

$$V_{SG} = \frac{0,6894 * 144}{12,56} = 7,6902 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

$$V_{SL} = \frac{0,1381 * 144}{12,56} = 1,5962 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

$$V_m = 7,6902 + 1,5962 = 9,2864 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

8. Calcular el flujo total del gasto másico del líquido y gas:

$$G_l = 48,44 * 1,5962 = 77,3206 \frac{\text{lbm}}{\text{Spie}^2}$$

$$G_g = 1,4905 * 7,6902 = 11,4627 \frac{\text{lbm}}{\text{Spie}^2}$$

$$G_T = 88,7833 \frac{\text{lbm}}{\text{Spie}^2}$$

9. Calcular el contenido de líquido de entrada:

$$\lambda_G = \frac{0,1381}{0,1382 + 0,1392} = 0,1718$$

Usando la ecuación 2.12

10. Utilizando la ecuación 2.43 se tiene que:

$$NFr = \frac{9,2864^2}{32,2 * 0,3333} = 8,0345$$

11. Calcular el número de Reynolds si resbalamiento, usando la ecuación 2.37 y 2.36:

$$\mu_m = (1,509 \times 0,1718 + 0,01244 \times (1 - 0,1718)) = 0,2698 \text{ cps }]$$

$$NRe = \frac{88,78 \times 0,3333}{0,2698 \times 5,72 \times 10^{-4}} = 163225,$$

Numero de velocidad del líquido:

$$NLv = 1,938 \times 1,5962 \left(\frac{48,43}{26,706} \right)^{0,25} = 3,5900$$

12. Determinar el patrón de flujo que existe en el flujo horizontal, usando las ecuaciones 2.45, 2.46, 2.47 y 2.48.

$$L_1 = 316 \times 0,1718^{0,302} = 185,6653$$

$$L_2 = 0,9252 \times 10^{-3} \times 0,1718^{-2,4684} = 0,0714$$

$$L_3 = 0,1 \times 0,1718^{-1,4516} = 1,2886$$

$$L_4 = 0,5 \times 0,1718^{-6,738} = 71104,259$$

13. Determinar el patrón de flujo de acuerdo a la tabla 1.
Se determinó un flujo intermitente.

14. Colgamiento horizontal:

Usando la ecuación 2.49 se tiene que:

$$HL(0) = \frac{0,845 \times 0,1718^{0,8331}}{8,0345 \times 0,0178} = 0,3176$$

15. Factor de fricción:

Usando las ecuaciones 2.34, 2.35, 2.39, 2.40 y 2.41.

$$f_{TP}' = 1,4655 * 0,01633 = 0,0239$$

Donde:

$$f_n = \left[2 * \log \left(\frac{390387,11}{45223 * \log 390387,11 - 3,8215} \right) \right]^{-2} = 0,01633$$

$$\frac{f_{TP}}{f_n} = e^{0,3826} = 1,4655$$

$$S = \frac{\ln 1,7032}{-0,0523 + 3,182 \ln 1,7032 - 0,8725 (\ln 1,7032)^2 + 0,01853 (\ln 1,7032)^3} = 0,3822$$

$$X = \frac{0,1668}{0,3123} = 1,7032$$

16. Calculo de la caída de presión:

Usando la ecuación 2.32

$$(\Delta p) = \frac{43,539 * f_{TP} * V_m^2}{\ell_{nz} * d^5 * (1 - EK)} = 31,4429 \text{ psia}$$

Como el Δp calculado no es parecido al Δp supuesto, se repite el procedimiento con el Δp calculado, hasta que estos sean muy cercanos.

De igual forma se procede a realizar los cálculos para los tres escenarios restantes y los resultados se mostraran en capítulo IV, tablas Nro. 7,8 y 9

Nota: para los escenarios 2 y 3 se debe tomar en cuenta el ángulo de inclinación y las ecuaciones a utilizar son 2.53, 2.54 y 2.55.

Eaton & Colaboradores

Escenario 1: Horizontal 1

1. Conociendo P1, suponer el valor de P2

$$P2=450\text{psi}$$

2. Presión promedio (P''):
 1. Conociendo P1, suponer el valor de P2

$$P'' = \frac{500 + 450}{2} = 475\text{psi}$$

3. Con el análisis PVT o con las correlaciones apropiadas (mostrada en este mismo capítulo) se calcula:

R_s , β_o , β_w , μ_o , μ_g , μ_w , σ_o , σ_w , Z_g a condiciones de P'' y T. También se deben calcular a condiciones de P'' y T los pasos 4 y 5 utilizados para la muestra de cálculo de Beggs and Brill en el escenario 1.

4. Calculo de flujo:

$$W_l = \frac{5,6146 * 2000 * 47.40}{86400} = 6,1607\text{lbm/s}$$

$$W_g = \frac{0,0764 * 0,65 * 2000 (1000 - 129.39)}{86400} = 1,00089\text{ lbm/s}$$

5. Calculo del colgamiento del líquido a la P1 y P2:

4.1 Para la P1:

$$q_{g1} = \frac{3,27 * 10 - 7 * 0,94 * 2000 * (1000 - 129,39) * 580}{500 + 14,7} = 0,6018 \frac{\text{pie}^3}{\text{s}}$$

Calcular las velocidades superficiales del gas, líquido y de la mezcla:

Utilizando las ecuaciones 2.13, 2.14 y 2.15:

$$V_{SG1} = \frac{0,6018 * 144}{12,56} = 6,8965 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

$$V_{SL1} = \frac{0,1381 * 144}{12,56} = 1,4893 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

$$V_{m1} = 6,8965 + 1,4893 = 8,3858 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

Valor de Ψ , mediante la ecuación 2.60:

$$\psi = \left[\frac{N_{LV}^{0.575}}{N_{gV} * N_d^{0.0277}} * \left(\frac{P}{14,7} \right)^{0.05} * \left(\frac{N_L}{0,00226} \right)^{0.1} \right]$$

Donde:

$$N_{gV} = 1,938 * 6,8965 * \left(\frac{47,40}{26,706} \right)^{0,25} = 15,42$$

$$N_{LV} = 1,938 * 1,4893 * \left(\frac{47,40}{26,706} \right)^{0,25} = 3,33$$

$$N_d = \frac{120,872}{12} * 4^n * \left(\frac{47,40}{26,706} \right)^{0,5} = 53,6782$$

$$N_L = 0,15726 * 1,5097 * \left(\frac{1}{47,40 * 26,706^3} \right)^{0,25} = 0,00770$$

$$\frac{P_1}{P_{cs}} = \frac{514,7}{14,7} = 35,015$$

Se introducen todos los valores en la ecuación 2.60 y $\Psi = 0,15659$

Y de acuerdo a las ecuaciones 2.61, 2.62, 2.63 y 2.64 se obtiene el
 $H_{11} = 0,330329$

De igual forma se repiten los cálculos del paso 4 para la P2, los resultados se mostraran en el capítulo IV en las tablas Nro. 8,9 y 10

6. Calculo de los Δ de velocidades:

Se utilizan las ecuaciones 2.65 y 2.66

$$\Delta(v_t)^2 = 0,3559 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

$$\Delta(v_g)^2 = 0,7850 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

7. Calculo del factor de Fricción:

Usando la ecuación 2.58 se determina el factor de fricción.

$$f = 0,005649$$

8. Calculo de la caída de presión:

Usando la ecuación 2.55, se sustituyen todos los valores

$$\left(\frac{\Delta p}{\frac{43.539 * f_{TP} * V_m^2}{l_{ms} * d^5 * (1 - EK)}} \right) = \Delta L$$

$$\Delta p = 36403,3459 \text{ pies}$$

Nota: si el Δx calculado no es parecido a la longitud del tramo, se asume otra P2 hasta que se cumpla la condición.

De igual forma se procede a realizar los cálculos para los tres escenarios restantes y los resultados se mostraran en capítulo IV, tabla Nro. 10,11 y 12.

3.5.2 Cálculo de las caídas de presión a través de correlaciones en el sistema de tubería horizontal e inclinada con flujo multifásico con el simulador Pipephase versión 8.1

El PIPEPHASE versión 8.1 es un programa de simulación de flujo de fluidos en redes de tuberías y en tuberías simples en estado estacionario, el cual fue desarrollado por la empresa “Simulation Sciences, Inc.”, (SimSci).

El programa de simulación PIPEPHASE versión 8.1 maneja los siguientes conceptos:

a) **Tramo o link:** es un tramo largo de tubería entre dos nodos. Un link está formado por uno o más equipos, tales como equipos de flujo o tuberías, o equipos de proceso (bombas, compresores, válvulas, etc.)

b) **Tubería o pipe:** es un elemento que forma parte del link, es decir un tramo de tubería.

c) **Nodo o junction:** Es la conexión entre los equipos que conforman un sistema de tubería.

d) **Fuente o source:** es un extremo de la red o link, de donde proviene el fluido, también se considera nodo.

e) **Destino o sink:** es un extremo de la red o link, donde llega el fluido, también se considera nodo.

Estructura del Programa PIPEPHASE: La entrada (INPUT) del programa está conformada por las siguientes ventanas o categorías que van apareciendo en el siguiente orden:

a) Descripción de la simulación (Simulation Description): Esta es la primera ventana que se muestra, al momento de iniciar una simulación nueva.

En esta ventana se especifican los siguientes datos:

- PROJECT (Nombre del Proyecto).
- PROBLEM (Nombre del Problema).
- USER (Nombre del Usuario).
- DATE (Fecha).
- SITE (Lugar).

b) Definición de la simulación (Simulation Definition): En esta ventana se define el tipo de simulación y el tipo de fluido. Según el tipo de simulación se pueden clasificar en:

- NETWORK (Cálculo de Redes de Tubería).
- SINGEL (Cálculo de líneas simples)
- GASLIFT (Cálculo de Sistema Gas Lift)
- PVTGEN (Usado para generar tabla de datos PVT)

Según el tipo de fluido se puede clasificar en:

- BLACKOIL: Dos o tres fases: crudo, gas y agua, donde el crudo es dominante (por defecto).
- CONDENSATE: Dos o tres fases: crudo, gas y/o agua donde el gas es dominante.
- LIQUID: Líquido fase simple. (Hidrocarburos o agua).
- GAS: Gas fase simple (hidrocarburo dominante).
- COMPOTITIONAL: El fluido es representado por componentes definidos, donde la definición es con componentes de librería.

c) Dimensiones (Input Dimention): Esta ventana permite definir el sistema de unidades dimensionales de entrada y de salida del problema. El sistema de

unidades que se encuentran en él la base de datos de programa son los siguientes:

- PETROLEUM (Sistema que usa el simulador por defecto).
- ENGLISH
- METRIC
- SI

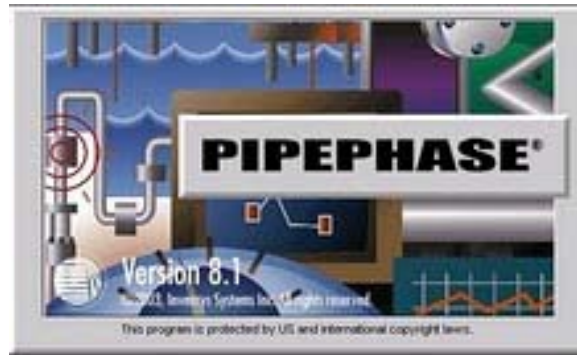


Figura Nro. 14 Pantalla principal del simulador Pipephase versión 8.1

3.6 Cotejo del Sistema

El cotejo o simulador del sistema (del cabezal al separador) se comenzó una vez finalizada la recopilación y revisión de la información, todo esto unido a la selección de las correlaciones correspondientes. Inicialmente se cotejo los datos del sistema en estudio con en el programa realizado en Microsoft Excel; de acuerdo a los resultados arrojados por cada correlación se generaron varias curvas representando el comportamiento de la caída de presión en función de la profundidad, luego se realizó la simulación con las correlaciones Beggs & Brill y Eaton & Colaboradores a través del software PIPEPHASE versión 8.1 reproduciendo las condiciones reales del sistema.

3.6.1 Error Porcentual

Luego de analizar las graficas se procedió al cálculo del porcentaje de desviación. Se escoge la correlación que más se ajuste a las condiciones reales del sistema con respecto al simulador.

$$\% E = \frac{V_t - V_c}{V_t} * 100$$

(Ec. 3.1)

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se muestra una serie de tablas que definen el comportamiento de la presión a lo largo de la línea de flujo en estudio, para las dos correlaciones seleccionada en los tramos: completos, cortos y de acuerdo las premisas, por medio del programa Microsoft Excel, el cual permitió la obtención de la variación de presiones en el sistema.

4.1 Tablas de resultados Microsoft Excel

4.1.1 Correlación de Flujo Multifásico de Beggs & Brill:

Tabla Nro. 7 Variación de la presión de la línea completa del sistema en estudio para Beggs & Brill.

Longitud (Pie)	Presión (Psia)
0	514,7
8202,04	484,8467
11482,88	467,6654
16404,08	440,3252

Tabla Nro. 8 Variación de la presión de la línea completa dividida en tramos cortos para Beggs & Brill.

Longitud (Pie)	Presión (Psia)
0	514,7
1968,5	499,77335
2952,75	496,75613
3937	493,72176
4921,25	490,39218
5577,42	484,8467
6233,59	483,1509
6889,76	481,44765
7546,93	479,736825
8202,04	478,018363
8858,21	467,6654
9514,38	464,9614
10170,55	462,24785
10826,72	459,524575
11482,88	456,791438
12467,13	440,3252
13451,38	436,9313
14435,63	433,51295
15419,88	430,06963
16404,08	426,60076

Tabla Nro. 9 Variación de la presión de la línea completa dividida en tramos según las normas PDVSA Para Beggs & Brill.

Longitud (Pie)	Presión (Psia)
0	514,7
3280,84	509,79385
4921,2	504,84348
6561,6	484,8467
8202,04	480,58945
9842,4	467,6654
11482,8	460,87805
13123,2	440,3252
14763,6	434,6472
16404,08	428,8998

4.1.2 Correlación de Flujo Multifásico de Eaton y Colaboradores.

Tabla Nro. 11 Variación de la presión de la línea completa del sistema en estudio para Eaton y Colaboradores.

Longitud (Pie)	Presión (Psia)
0	514,7
8202,04	508,455
11482,88	504,2543
16404,08	500,0191

Tabla Nro. 12 Variación de la presión de la línea completa dividida en tramos cortos para Eaton & Colaboradores.

Longitud (Pies)	Presión (Psia)
0	514,7000
1968,5	514,0807
2952,75	513,4608
3937	512,8399
4921,25	512,2184
5577,42	508,4550
6233,59	508,0369
6889,76	507,6184
7546,93	507,1997
8202,04	506,7798
8858,21	504,2543
9514,38	503,8320
10170,55	503,4110
10826,72	502,9886
11482,88	502,5658
12467,13	500,0191
13451,38	499,3814
14435,63	498,7429
15419,88	498,1036
16404,08	497,4634

Tabla Nro.13 Variación de la presión de la línea completa dividida en tramos según la norma PDVSA Eaton y Colaboradores.

Longitud (Pie)	Presión (Psia)
0	514,7000
3280,84	513,6665
4921,2	512,6310
6561,6	508,4550
8202,04	507,4085
9842,4	504,2543
11482,8	503,1991
13123,2	500,0191
14763,6	498,9545
16404,08	497,8877

El estudio realizado con la correlación Beggs & Brill a través del programa Microsoft Excel arrojó unos valores de caída de presión ver tablas Nro. 7,8 y 9 que son mayores con respecto a los obtenidos Eaton y Colaboradores ver tabla Nro 10, 11 y 12; los que nos hace comprobar que es el método de Eaton y Colaboradores el que se ajusta a las condiciones del sistema evaluado. Todo esto es de suma importancia tanto para el diseño de equipos como accesorios que conforman una línea de flujo, no solo para manejar flujos multifásico provenientes del pozo hasta el separador sino para cualquier otro tipo de sistema.

4.2 Gráficos de Microsoft Excel

Se puede observar en las siguientes graficas de manera más clara la tendencia del comportamiento de las presiones dentro del sistema de tubería, tanto por el método Beggs & Brill como Eaton and Colaboradores las cuales reflejan tres curvas la figura Nro. 15 representa los casos planteados anteriormente, se observa que las líneas presentan fluctuaciones, es decir su tendencia no es lineal por lo cual las caídas de presión que se generan son significativas con la figura Nro. 16, donde dicho comportamiento es lineal a comparación con el anterior, y esto lleva a inferir que la correlación Eaton & colaboradores se ajusta más a los parámetros y condiciones del sistema ya que su rango de presión, longitud, de diámetro de tubería son más amplios lo que da una mejor precisión en cuanto a la selección de la correlación adecuada.

4.2.1 Correlación de Flujo Multifásico de Beggs & Brill:

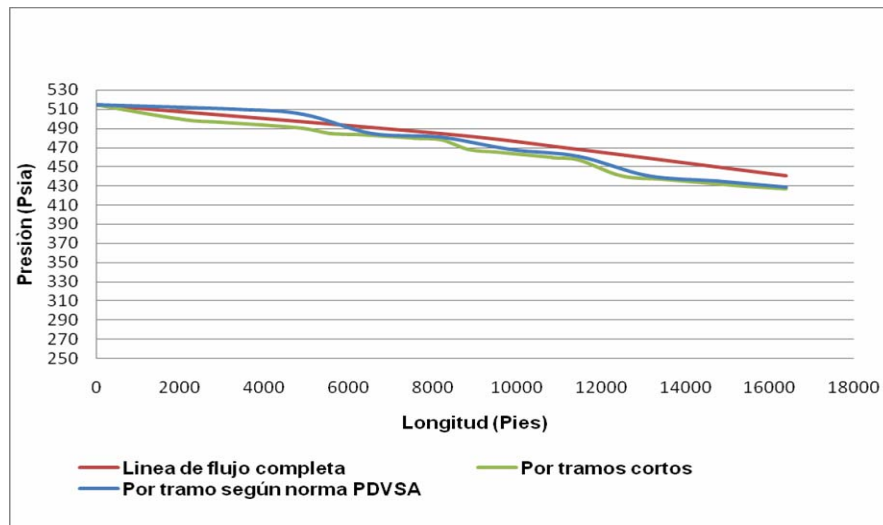


Figura Nro.15 Comportamiento de la presión del sistema en estudio para la correlación de flujo multifásico de Beggs & Brill por medio del programa de Excel.

4.2.2 Correlación de Flujo Multifásico de Eaton y Colaboradores:

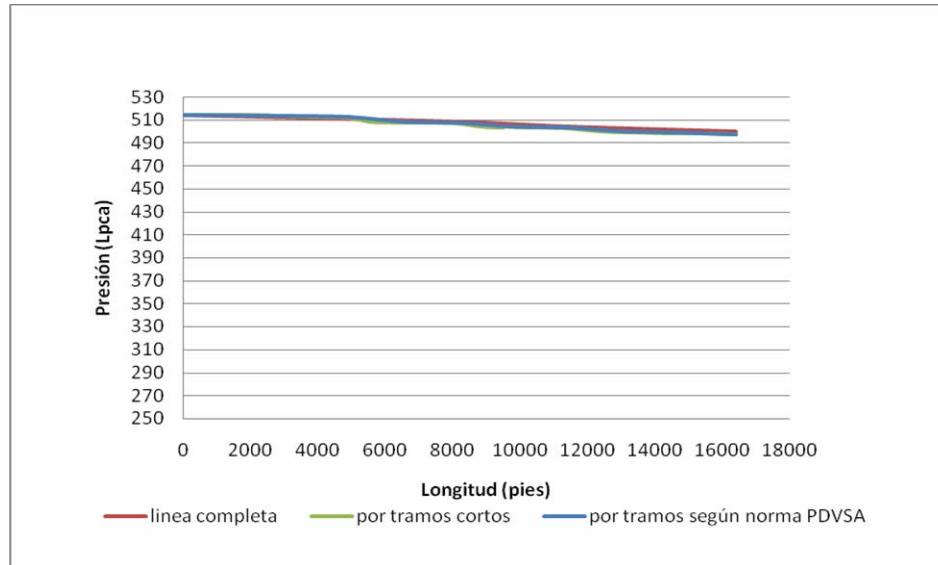


Figura 16: Comportamiento de la presión del sistema en estudio para la correlación de flujo multifásico de Eaton y Colaboradores.

4.3 Gráficos del simulador Pipephase versión 8.1

En estos gráficos se puede observar el comportamiento de las presiones dentro del sistema de tubería, tanto por el método Beggs & Brill como Eaton & Colaboradores mostradas tanto por Excel como por el simulador utilizado, las cuales reflejan cuatro curvas, ver figura Nro. 18 y 20.

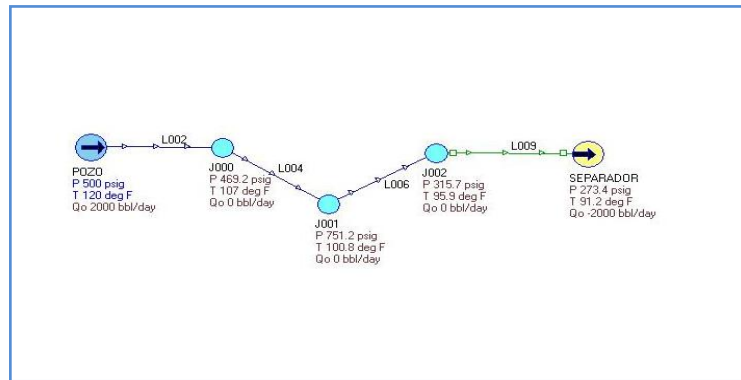


Figura 17: Diagrama de la línea de flujo por Beggs & Brill.

Tabla Nro.15 Variación de la presión de la línea de flujo arrojada por el simulador Pipephase versión 8.1 por Beggs & Brill.

Longitud (Pie)	Presión (Psia)
0	514,7000
8202,04	382,8071
11482,88	356,1181
16404,08	288,1294

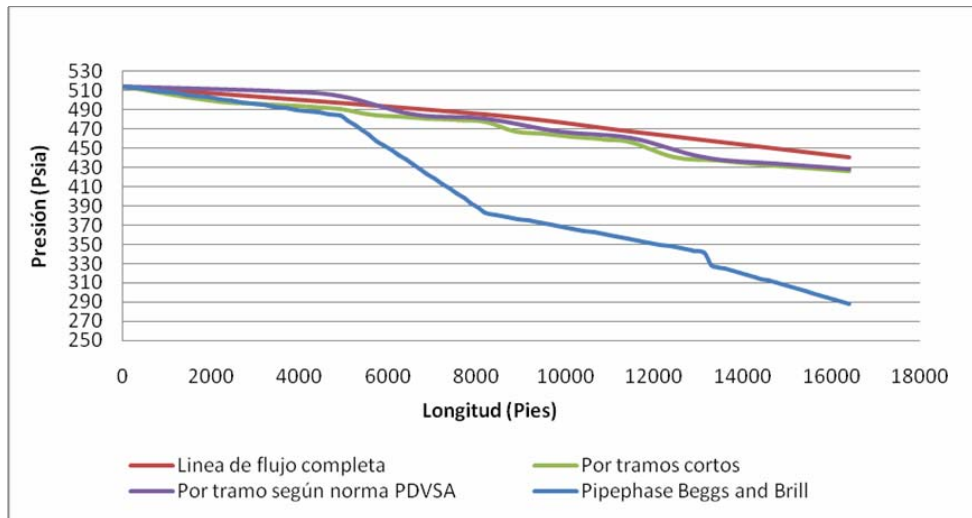


Figura 18: Comportamiento de la presión del sistema en estudio para la correlación de flujo multifásico de Beggs & Brill por medio de Excel y el simulador.

Porcentaje de desviación:

Tabla Nro. 16: Porcentaje de desviación Beggs & Brill de Excel con respecto al simulador.

	Presión (Psia)	Presión (Psia)	Presión (Psia)
Excel	Tramo completo	Tramos cortos	Norma PDVSA
	440,3252	426,6007	428,8998
Simulador	288,1294	288,1294	288,1294
% Error	52,82	48,06	48,86

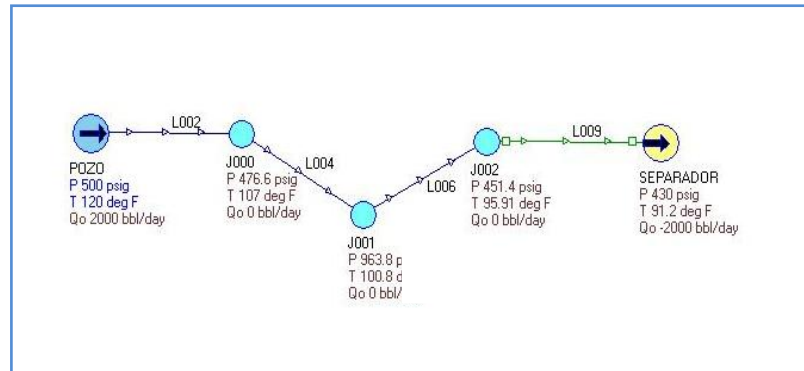


Figura 19: Diagrama de la línea de flujo por Eaton & Colaboradores.

Tabla Nro.17 Variación de la presión de la línea de flujo arrojada por el simulador Pipephase versión 8.1 por Eaton & Colaboradores.

Longitud (Pie)	Presión (Psia)
0	514,7000
8202,04	474,8000
11482,88	464,7000
16404,08	444,7280

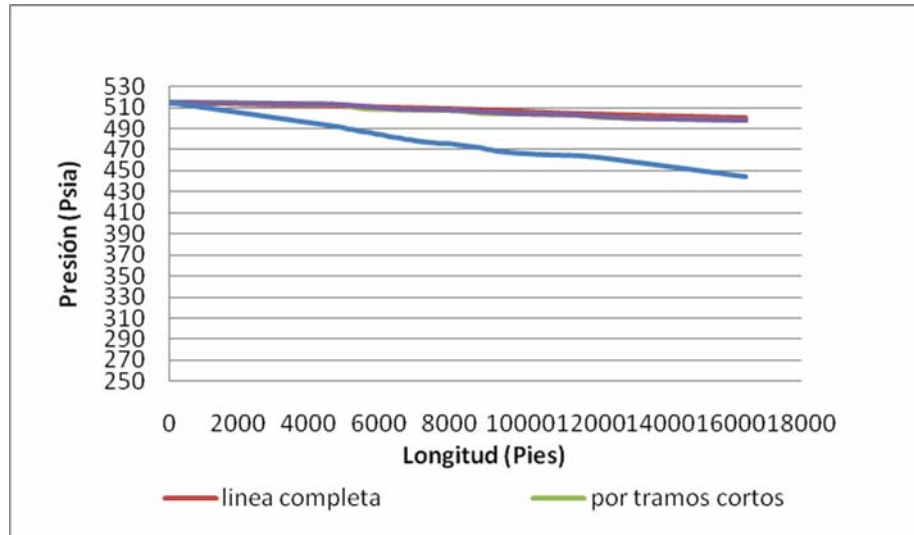


Figura 20: Comportamiento de la presión del sistema en estudio para la correlación de flujo multifásico de Eaton y Colaboradores.

Porcentaje de desviación:

Tabla Nro. 18: Porcentaje de desviación Eaton & Colaboradores de Excel con respecto al simulador.

	Presión (Psia)	Presión (Psia)	Presión (Psia)
Excel	Tramo completo	Tramos cortos	Norma PDVSA
	500,0191	497,4634	497,8877
Simulador	444,7280	444,7280	444,7280
% Error	12,43	11,86	11,95

Una vez realizada la simulación se observó que la correlación que más se ajusta a las condiciones del sistema en estudio es la de Eaton & colaboradores, presentando un porcentaje de desviación menor a la de Beggs & Brill. Siendo de este mismo modo el caso de seccionamiento por

tramos cortos el que apporto un porcentaje de desviación de 11,86% menor a los demás casos estudiados. Lo que comprueba que tanto por el programa de Excel como por la simulación es el método de Eaton la correlación que se adapta o da mejores resultados a la hora de evaluar caídas de presión en una línea de flujo multifásico.

CONCLUSIONES

- 1) El método de Eaton y Colaboradores genero una menor caída de presión por en programa de Microsoft Excel como en el simulador Pipephase versión 8.1.
- 2) De acuerdo a los casos estudiados se reflejo que mientras más dividido este el tramo menor será la caída de presión.
- 3) Los métodos de forma iterativa generan grandes desviaciones a la hora del cálculo de la caída de presión.
- 4) El porcentaje de error arrojado por el método de Eaton fue de 11,86 para los tramos cortos.

RECOMENDACIONES

- 1) Se debe seleccionar las correlaciones adecuadas para el cálculo de las propiedades del fluido.
- 2) Seleccionar tramos mas corto para determinar la caída de presión de la línea de flujo por medio de las correlaciones en Excel.
- 3) Utilizar la correlación de flujo mutlifásico de Eaton y Colaboradores para la estimación de gradientes de presión.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) MARTINEZ, Marcías. **“Curso avanzado de ingeniería de gas”**. 1990.
- 2) ESCOBAR M, Freddy H. **“Fundamento de ingeniería de yacimiento”**. Editorial Surcolombia. Colombia 2005.
- 3) ANDARCIA G, Lulimar V. **“Estudio de los diferentes métodos utilizados para la determinación del gradiente de presión en pozos de gas cerrado y pozos productores de gas con flujo multifásico”**. Trabajo de grado. Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Agosto 2010.
- 4) PARIS de F, Magdalena. **“Fundamentos de ingeniería de yacimientos”**. Ediciones Astro Data S.A. 2009.
- 5) GONZALO Rojas. **“Ingeniería de yacimientos de gas condensado”**. Octubre 2003.
- 6) BERTUCCI V, Miguel A. **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE CRUDO, EN EL CAMPO URACOA, UNIDAD MONAGAS SUR, HARVEST VINCCLER; C.A.”**. Trabajo de grado. Universidad de Monagas, Febrero 2006.
- 7) HURTADO D, Ernesto L. **“Simulación de las Redes de Producción del CPF y EPF del Bloque 15”**. Trabajo de grado. Escuela Superior Politécnica del litoral, Facultad de Ingenierías en Ciencias de la Tierra. Guayaquil – Ecuador 2007.

- 8) TORRES C, Juan M. **“Flujo multifasico en tuberías”**. Trabajo de grado. Universidad Autónoma de México, México – D.F 2008.
- 9) VELASQUES, J. **“FLUJO MULTIFASICO”**. Instituto de investigaciones petroleras, Universidad del Zulia. Febrero 1999.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	DETERMINACIÓN DE GRADIENTES DE PRESIÓN PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE FLUJO MULTIFÁSICO MEDIANTE EL EMPLEO DE CORRELACIONES EN TUBERÍAS HORIZONTALES E INCLINADAS
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Guilarte P, Maria G.	CVLAC: 17.221.262 E MAIL: mgguilarte_2509@hotmail.com
Liscano C, Viceyni del V.	CVLAC: 17.212.919 E MAIL: viceliscano@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Correlaciones

Flujo multifásico

Tuberías horizontales

Tuberías inclinadas

Caída de presión

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

El objetivo principal de este proyecto consistió en Determinación de gradientes de presión para el estudio del comportamiento de una línea de flujo multifásico mediante el empleo de correlaciones en tuberías horizontales e inclinadas. Para efectuar este trabajo se revisó toda la información correspondiente al tema en estudio y se determinó un sistema de manera que permita comparar los perfiles de presión obtenidos por el software Pipephase con el problema propuesto. Con el propósito de lograr este objetivo se diseñó un sistema con cierta información desde el cabezal del pozo al separador, para establecer comparaciones con los valores generados a través del simulador y de la hoja de cálculo Excel.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Rondón M, José G.	ROL	CA	AS(X)	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Cermeño Z, José L.	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	08	12
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS: Correlaciones de flujos multifasicos.doc	Application/ 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 Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de ingeniería química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Guilarte P, María G.

AUTOR

Liscano C, Viceyni del V.

AUTOR

Rondón José

TUTOR

Cermeño José

JURADO

Ing. Yraima Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS