

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FLUIDOS EN LA LÍNEA DE SUPERFICIE DEL BLOQUE 31 HASTA EL CAMPO EDÉN YUTURI, PARA EL ASEGURAMIENTO DE FLUJO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIEROS EN PETRÓLEOS

LUIS WILFRIDO BARRENO CARVAJAL

fitorasbc@hotmail.com

ROBERT ISMAEL LOOR GARZÓN

rois_logan90@hotmail.com

DIRECTOR: ING. JOSÉ FRANCISCO PAZ VILLARROEL

francisco_pazv@yahoo.com

Quito, abril 2016

DECLARACIÓN

Nosotros, Luis Wilfrido Barreno Carvajal, Robert Ismael Loor Garzón, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

LUIS BARRENO C.

ROBERT LOOR G.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente Proyecto de Titulación fue desarrollado por los señores Luis Wilfrido Barreno Carvajal, Robert Ismael Loor Garzón, bajo mi supervisión.

ING. FRANCISCO PAZ VILLAROEL
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por ser mi guía en cada paso que doy, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por darme la oportunidad de dar este paso importante en mi vida.

Les doy gracias a mis padres por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por haberme dado una excelente educación en el trascurso de mi vida y por ser mi ejemplo de lucha, trabajo y perseverancia.

A mi esposa Gabriela Espín y mi hija Sara Barreno por ser la fuerza para luchar y levantarme cada día para dar lo mejor de mí.

Al Ingeniero Francisco Paz por habernos dado la oportunidad de desarrollar este Proyecto bajo su tutoría y a Schlumberger que junto a Erick Gómez nos brindaron su apoyo al realizar el Proyecto.

A mis profesores por cada una de sus enseñanzas, consejos y apoyo que siempre me brindaron a lo largo de mi carrera, en especial a los Ingenieros Vinicio Melo y Jaime González por su paciencia y dedicación en la revisión del Proyecto de Titulación.

A Dianita y Ximenita por su gran apoyo, confianza y voluntad.

A la Matemática Ruth Cueva y su esposo Jaime Calderón quienes me dieron la oportunidad de trabajar con ellos para salir adelante en mis estudios y con mi familia.

Agradezco a mi gran amigo y compañero de este Proyecto de Titulación Robert Looor por siempre haber estado ahí cuando lo necesite y por brindarme siempre su amistad incondicional.

Luis Barreno

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la salud y vida, y ser uno de los pilares para alcanzar y hacer realidad mis sueños.

A mis padres, abuelita, hermano y tío (Gonzalo Carrera), por ser mi apoyo incondicional y enseñarme que el esfuerzo, la constancia, la perseverancia y la lucha diaria son herramientas para alcanzar el éxito y que la felicidad radica en hacer lo que uno ama.

Al Ingeniero Francisco Paz por darnos la oportunidad y la confianza de realizar este Proyecto junto a él. A Schlumberger por darnos todas las facilidades para el desarrollo del Proyecto, al Ingeniero Erick Gómez por su dedicación y paciencia al transmitirnos su conocimiento y experiencia en el manejo del simulador y a el Ingeniero Fabián Heredia por brindarnos el soporte técnico para el correcto funcionamiento del simulador.

A los Ingenieros Vinicio Melo y Raúl Valencia, los cuales con sus enseñanzas, consejos y paciencia, supieron inculcarme y guiarme a lo largo de mi formación profesional y fortalecer mis valores como persona.

A Dianita y Ximenita por haberme brindado su amistad, apoyo y confianza a lo largo de mis estudios y su gran voluntad al ayudarme en este Proyecto.

Y a todos mis amigos que estuvieron a lo largo de mi camino por la Escuela Politécnica Nacional.

Mil Gracias a todos

Robert Loor G.

DEDICATORIA

Dedico este Proyecto de Titulación a todas las personas que me apoyaron y siempre confiaron en mí.

A mis padres Enrique Barreno y Clara Carvajal quienes han sido mi soporte moral y económicamente.

A mi hija Sara Barreno quien se convirtió en la fuerza para alcanzar mis metas.

A mi esposa Gabriela Espín quien me ha acompañado día a día en este camino.

A mis hermanos, Dora Carvajal mi tía y Marcelo Llerena mi primo que de una u otra manera siempre me han apoyado.

Para ellos es esta dedicatoria de este Proyecto de Titulación, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Luis Barreno

DEDICATORIA

Este Proyecto de Titulación está dedicado a mis padres Norma Garzón y Vinter Loor, a mi abuelita Carmen Soria y a mi hermano Miguel, a quienes les debo todo lo que soy y lo que seré.

Que a pesar de las dificultades que se presenta en el hermoso camino de la vida siempre han encontrado la fortaleza y el camino para superar cada obstáculo.

Y a todos mis amigos, con los cuales nos unen las experiencias compartidas.

“Confía en el tiempo, que suele dar dulces salidas a muchas amargas dificultades”

Miguel de Cervantes.

Robert Loor G.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	V
TABLA DE CONTENIDO.....	VII
LISTA DE GRÁFICAS	X
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS.....	XIII
SIMBOLOGÍA.....	XIV
RESUMEN	XVI
PRESENTACIÓN	XVII
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE FLUJO.....	3
1.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS PRODUCIDOS.....	5
1.3.1. PRODUCCIÓN DEL BLOQUE 31.....	8
1.3.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN	9
1.4. ASEGURAMIENTO DE FLUJO.....	10
1.5. FLUJO MULTIFÁSICO EN TUBERÍAS HORIZONTALES	11
1.5.1. REGÍMENES DE FLUJO	12
1.5.1.1. Flujo intermitente	12
1.5.1.2. Flujo distribuido.....	12
1.5.1.3. Flujo segregado	13
1.5.2. PARÁMETROS Y PROPIEDADES DE FLUJO MULTIFÁSICO	14
1.5.2.1. Colgamiento (Hold Up)	14
1.5.2.2. Colgamiento del líquido sin deslizamiento (No slip liquid Hold Up)	15
1.5.2.3. Velocidades superficiales	15
1.5.2.4. Velocidades reales	16
1.5.2.5. Velocidad de deslizamiento	17
1.5.2.6. Densidad.....	18
1.5.2.7. Viscosidad	19

1.6. SOFTWARE A UTILIZARSE.....	20
CAPÍTULO 2: MODELO MATEMÁTICO PARA EVALUAR EL FLUJO	
MULTIFÁSICO HORIZONTAL	
2.1. INTRODUCCIÓN	22
2.2. ECUACIÓN GENERAL DEL GRADIENTE DE PRESIÓN.....	23
2.3. CORRELACIONES DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA TUBERÍAS	25
2.3.1. LOCKHART Y MARTINELLI	26
2.3.2. BAKER	26
2.3.3. DUKLER ET AL.....	27
2.3.4. EATON ET AL.	28
2.3.5. BEGGS Y BRILL	30
2.3.6. OTROS AUTORES	30
2.4. SELECCIÓN DE LA CORRELACIÓN A SER UTILIZADA	31
2.4.2. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LAS PERDIDAS DE PRESIÓN.....	34
CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS POR MEDIO DEL SOFTWARE EN LA LÍNEA DE FLUJO	
3.1. METODOLOGÍA	36
3.1.1. MODELOS DE SIMULACIÓN DE OLGA.....	37
3.1.1.1. Modelo gráfico	37
3.1.1.2. Modelo geométrico	38
3.1.1.2.1. Filtración del perfil.....	39
3.1.1.2.2. Discretización del perfil.....	39
3.1.1.3. Modelo térmico	40
3.1.1.4. Caracterización de la composición de los fluidos	42
3.1.1.5. Condiciones iniciales y variables de medición	43
3.2. GENERACIÓN DE LOS MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA LÍNEA DE FLUJO APAIKA-EPF	44
3.2.1. CASO BASE	44
3.2.1.1. Validación y Verificación del Modelo de Simulación	56
3.3. SIMULACIÓN DE LA LÍNEA DE FLUJO APAIKA-EPF.....	57
3.3.1. MÉTODO BEGGS Y BRILL	57
3.3.1.1. Flujo monofásico.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.1.2. Análisis del Método de Beggs y Brill: Flujo monofásico.....	59
3.3.1.3. Caso especial, considerando el transporte de dos fases.....	59

3.3.1.4. Análisis del Método de Beggs y Brill: Flujo bifásica	62
3.3.2. SIMULACIÓN CASO BASE SISTEMA APAIKA-EPF	63
3.3.2.1. Problema del caso base: Flujo monofásico	69
3.3.3. SIMULACIÓN SISTEMA APAIKA-EPF FLUJO MULTIFÁSICO	69
CAPÍTULO 4: ALTERNATIVAS PARA MEJORAR EL TRANSPORTE DE FLUIDOS	76
4.1. INTRODUCCIÓN	76
4.2. INCREMENTO DE LA VELOCIDAD	77
4.2.1. ESCENARIO 1: INYECCIÓN DE AGUA EN LA BOMBA MULTIFÁSICA.....	77
4.2.1.1.Comparación de las velocidades caso real e inyección de agua.....	82
4.2.2. ESCENARIO 2: INCREMENTO DE PRODUCCIÓN	85
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
5.1. CONCLUSIONES	89
5.2. RECOMENDACIONES	92
GLOSARIO	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS.....	99

LISTA DE GRÁFICAS

No	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	Perfil de Apaika-EPF	4
1.2	Perfil de Nenke-Apaika	5
3.1	Perfil Sistema Apaika-EPF, Olga	49
3.2	PERFIL NENKE-APAIKA, OLGA	49
3.3	Comparación del perfil real y simplificado Apaika-EPF	51
3.4	Discretización del perfil Apaika-EPF	52
3.5	Discretización del perfil Nenke-Apaika	52
3.6	Pérdidas de presión flujo monofásico Sistema Apaika-EPF	58
3.7	Pérdidas de presión flujo monofásico Sistema Apaika-EPF	61
3.8	Perfil de presión de P_1 , Apaika-Unión AN, flujo monofásico	63
3.9	Perfil de presión de P_3 , Unión AN-ECB, flujo monofásico	64
3.10	Perfil de presión de P_4 , ECB-EPF, flujo monofásico	64
3.11	Perfil de caudal de P_3 , Unión AN-ECB, flujo monofásico	65
3.12	Perfil de caudal de P_4 , ECB-EPF, flujo monofásico	66
3.13	Perfil de velocidad de P_3 , Unión AN-ECB, flujo monofásico	66
3.14	Perfil de velocidad de P_4 , ECB-EPF, flujo monofásico	67
3.15	Perfil de temperaturas Sistema Apaika-EPF, flujo monofásico	68
3.16	Patrón de flujo Sistema Apaika-EPF, flujo monofásico	68
3.17	Perfil de presión P_1 , Apaika-Unión AN, flujo multifásico	70
3.18	Perfil de presión P_3 , Unión AN-ECB, flujo multifásico	70
3.19	Perfil de presión de P_4 , ECB-EPF, flujo multifásico	71
3.20	Perfil de velocidad P_3 , Unión AN-ECB, flujo multifásico	72
3.21	Perfil de velocidad P_4 , ECB-EPF, flujo multifásico	72
3.22	Patrón de flujo de P_3 , Unión AN-ECB, flujo multifásico	73
3.23	Patrón de flujo de P_4 , ECB-EPF, flujo multifásico	73
3.24	Hold up de P_3 , Unión AN-ECB, flujo multifásico	74
3.25	Hold up de P_4 , Unión AN-ECB, flujo multifásico	74
3.26	Relación colgamiento y velocidad P_3 , flujo multifásico	75
4.1	Perfil de presión de P_1 , Apaika-Unión AN, inyección de agua	79
4.2	Perfil de presión de P_4 , ECB-EPF, inyección de agua	79
4.3	Perfil de caudales de P_3 , Unión AN-ECB, inyección de agua	80
4.4	Perfil de caudales de P_4 , ECB-EPF, inyección de agua	80
4.5	Perfil de velocidad de P_3 , Unión AN-ECB, inyección de agua	81
4.6	Perfil de velocidad de P_4 , ECB-EPF, inyección de agua	82
4.7	Comparación de velocidades caso base e inyección de agua tramo P_3	83
4.8	Comparación de velocidades caso base e inyección de agua tramo P_4	84
4.9	Perfil de presión de P_1 , producción experimental Apaika-Unión AN	85
4.10	Perfil de presión de P_4 , producción experimental ECB-EPF	86
4.11	Perfil de caudales de P_3 , producción experimental Unión AN-ECB	86

No	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
4.12	Perfil de caudales de P ₄ , producción experimental ECB-EPF	87
4.13	Perfil de velocidad de P ₃ , P ₄ , producción experimental Unión AN-ECB y ECB-EPF	87

LISTA DE FIGURAS

No	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	Ubicación geográfica del Bloque 31	2
1.2	Diagrama del Sistema Apaika-EPF	3
1.3	Mapa de patrones de flujo	14
2.1	Regímenes de flujo de Baker	26
2.2	Curva del factor de fricción normalizado	28
2.3	Correlación para el Hold Up de Dukler	28
2.4	Correlación del factor de fricción de Eaton et al.	29
2.5	Correlación para el Hold up de Eaton et al.	29
2.6	Mapa de patrones de flujo horizontal	31
3.1	Tipos de nodos Olga	37
3.2	Tubería dividida en tubos y secciones	38
3.3	Proceso de filtrado	39
3.4	Representación de las paredes de las tuberías	40
3.5	Proceso térmico de tubería enterrada y un riser	41
3.6	Espesor equivalente de una tubería enterrada	42
3.7	Modelo gráfico Sistema Apaika-EPF	45
3.8	Creación de los materiales	45
3.9	Creación de las paredes de las tuberías	47
3.10	Editor de geometría	48
3.11	Valores del filtrado del Sistema Apaika-EPF	50
3.12	Valores de discretización Sistema Apaika-EPF	51
3.13	Transferencia de calor Sistema Apaika-EPF	53
3.14	Fuente de masa de Apaika	53
3.15	Caracterización de los fluidos Sistema Apaika-EPF	54
3.16	Caracterización de los fluidos a presión de saturación y viscosidad del líquido	55
3.17	Tabla de propiedades fluidos del Sistema Apaika-EPF	55
3.18	Modelo de producción del Sistema Apaika-EPF	56
4.1	Incremento de caudal de líquido	77
4.2	Fuente de masa caudal de líquido	78

LISTA DE TABLAS

No	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	Características de la línea de flujo del Sistema Apaika-EPF.	3
1.2	Propiedades de los materiales de la línea de flujo del Sistema Apaika-EPF.	4
1.3	Composición de los fluidos Campo Apaika.	6
1.4	Propiedades de las fases C_7^+ y C_{20}^+ Campo Apaika.	7
1.5	Composición de los fluidos Campo Nenke.	7
1.6	Propiedades de las fases C_7^+ , C_{12}^+ , C_{20}^+ y C_{30}^+ Campo Nenke.	8
1.7	Datos de producción del Bloque 31.	9
1.8	Parámetros de operación del Sistema Apaika-EPF.	10
2.1	Clasificación de los patrones de flujo.	32
2.2	Factores para determinar los patrones de flujo.	33
3.1	Espesor equivalente, Sistema Apaika-EPF.	48
3.2	Comparación del perfil real y simplificado, Sistema Apaika-EPF.	50
3.3	Validación y verificación del modelo de simulación, Sistema Apaika-EPF.	56
3.4	Parámetros calculados flujo monofásico, Sistema Apaika-EPF.	57
3.5	Parámetros calculados de la mezcla, flujo monofásico, Sistema Apaika-EPF.	58
3.6	Parámetros calculados flujo bifásico, Sistema Apaika-EPF.	59
3.7	Parámetros calculados flujo bifásico mezcla de los fluidos Sistema Apaika-EPF.	60
3.8	Colgamiento con y sin resbalamiento y regímenes de flujo, flujo bifásico Sistema Apaika-EPF.	61
4.1	Incremento de caudal de líquido.	78
4.2	Producción experimental.	85

SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSIONES
A	Área	L^2
API	Instituto Americano del Petróleo	
BSW	Contenido de agua y sedimentos	
cp	Centipoises	M/Lt
D	Diámetro de la tubería	L
d_i	Diámetro interno de la tubería	L
E	Espesor del material tomando en cuenta la tubería	L
ECB	Estación central de bombeo	
EPF	Facilidades de producción en Edén Yuturi	
f_o	Fracción de petróleo	
f_w	Fracción de agua	
f_{tp}	Factor de fricción de la mezcla	
g	Constante gravitacional	L/t^2
g/cm^3	Gramos masa por centímetro cúbico	M/L^3
GOR	Relación gas-petróleo	
H	Intervalo de profundidad	L
H_a	Hectáreas	L^2
H_g	Colgamiento de gas	
H_l	Colgamiento de líquido	
in	Pulgadas	L
J	Joule	ML^2/t^2
kg/m^3	Kilogramos masa por metro cúbico	M/L^3
km	Kilómetro	L
lbm/pie^3	Libra masa por pie cúbico	
$L_1, L_2,$ $L_3, L_4.$	Factores de Beggs y Brill, que dependen del colgamiento de líquido sin deslizamiento	
m	Metro	L
M	Abreviatura utilizada para indicar miles	
NFOGM	Sociedad noruega para la medición de petróleo y gas	
N_{FR}	Número de Froude	
OCP	Oleoducto de Crudos Pesados	
OTA	Oleoducto Transandino	
P	Presión	M/Lt^2
P_p	Pérdidas de presión	M/Lt^2
P_1	Tramo 1 (Piping 1), Apaika-Unión Apaika - Nenke	
P_2	Tramo 2 (Piping 2), Nenke-Unión Apaika - Nenke	
P_3	Tramo 3 (Piping 3), Unión Apaika-Nenke - ECB	
P_4	Tramo 4 (Piping 4), ECB - EPF	
ft	Pie	L
ppm	Partes por millón	
psi	Libras fuerza por pulgada cuadrada	M/Lt^2
psia	Libras fuerza por pulgada cuadrada absolutas	M/Lt^2
psig	Libras fuerza por pulgada cuadrada manométricas	M/Lt^2

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSIONES
PNY	Parque Nacional Yasuní	
PVT	Presión, volumen y temperatura	
Q_g	Tasa de producción de gas	L^3/t
Q_o	Tasa de producción de petróleo	L^3/t
Q_w	Tasa de producción de agua	L^3/t
Q_{it}	Tasa de producción de líquido total	L^3/t
stb/d	Barriles a condiciones estándar por día	
scf/d	Pies cúbicos estándar por día	
SOTE	Oleoducto Transecuatoriano	
T	Temperatura	T
t_{eq}	Espesor equivalente	L
TEKNA	La sociedad noruega de profesionales técnicos y científicos	
UAN	Unión Apaika-Nenke	
V	Velocidad	L/t
V_g	Velocidad real del gas	L/t
V_l	Velocidad real del líquido	L/t
V_m	Velocidad de la mezcla	L/t
V_s	Velocidad de deslizamiento	L/t
V_{sg}	Velocidad superficial del gas	L/t
V_{sl}	Velocidad superficial del líquido	L/t
W	Vatio	ML^2/t^3
λ_g	Colgamiento de gas sin deslizamiento	
λ_l	Colgamiento de líquido sin deslizamiento	
ρ_k	Densidad por pérdidas de presión y número de Reynolds	M/L^3
ρ_l	Densidad del líquido	M/L^3
ρ_m	Densidad sin deslizamiento	M/L^3
ρ_o	Densidad del petróleo	M/L^3
ρ_w	Densidad del agua	M/L^3
ρ_s	Densidad con deslizamiento	M/L^3
μ_g	Viscosidad del gas	M/Lt
μ_l	Viscosidad del líquido	M/Lt
μ_o	Viscosidad del petróleo	M/Lt
μ_m	Viscosidad de la mezcla	M/Lt
μ_w	Viscosidad del agua	M/Lt
°C	Grados Celsius	T
°F	Grados Farenheit	T
°API	Grados API	
%	Tanto por ciento	
θ	Ángulo que forma la dirección de flujo con la horizontal	

RESUMEN

En el capítulo uno se describió el Bloque 31, las características de la línea de flujo y de los fluidos producidos, para dicho estudio se tomó las producciones de 20 pozos, 16 pozos en Apaika y 4 en Nenke, los parámetros operacionales describieron las condiciones de operación. En este capítulo se describe el aseguramiento de flujo, el flujo multifásico en tubería horizontal y los tipos de softwares que se utilizan para analizar el comportamiento del flujo.

En el capítulo dos se describieron los modelos matemáticos que permiten calcular las pérdidas de presión en tuberías horizontales y predecir los patrones de flujo que puedan presentarse.

En el capítulo tres se definió los modelos que sirven para realizar la simulación de los fluidos utilizando el software Olga. Una vez generados los modelos que utiliza el software se efectuó la simulación, de los resultados obtenidos se puede observar bajas velocidades de trabajo a lo largo del Sistema Apaika-EPF.

El capítulo cuatro establece alternativas de solución, el Sistema Apaika-EPF debe trabajar en flujo monofásico mientras el sistema lo permita para evitar alteraciones en el comportamiento de los fluidos, EPF debe mantener la presión de llegada en 500 psig, ya que al bajar la presión a 400 psig el sistema presenta flujo multifásico. Para mejorar la movilidad de los fluidos se debe aumentar la producción del Bloque 31 a una tasa mayor a 80000.00 stb/d o a su vez la inyección de agua en la línea a una tasa proporcional a la producida.

Finalmente en el capítulo 5 se establecen las conclusiones y se sugieren las recomendaciones posibles para que el flujo de fluidos del Sistema Apaika-EPF no presente complicaciones.

PRESENTACIÓN

El presente Proyecto permitirá conocer el sistema de transporte y los fluidos producidos de uno de los Bloques más importantes que aportan a la producción de petróleo en el Ecuador, siendo uno de los Bloques con mayor potencial de producción y de desarrollo en los siguientes años, con reservas estimadas de 249 millones de barriles. (PETROAMAZONAS, 2013)

Después de 3 años de producción en el Bloque 31 surge la necesidad de investigar el transporte de los fluidos por parte de Petroamazonas.

Uno de los principales objetivos de esta investigación es identificar los principales problemas en el transporte de los fluidos producidos del Bloque 31 y sugerir posibles medidas preventivas y correctivas para mitigar posibles inconvenientes que afecten al transporte de los fluidos.

Con dicho estudio Petroamazonas evitará parar las operaciones por problemas de mantenimiento en la línea de flujo y con esto reducir gastos significativos que en un futuro estos trabajos conllevarían.

El estudio se realizara con los datos proporcionados por Petroamazonas hasta diciembre del 2015, con una producción total de 28284 stb/d, con un BSW de 55,74% y un °API promedio de 17,7.

Este proyecto queda como referencia para realizar futuras investigaciones en el Bloque 31 como depositación de sólidos.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

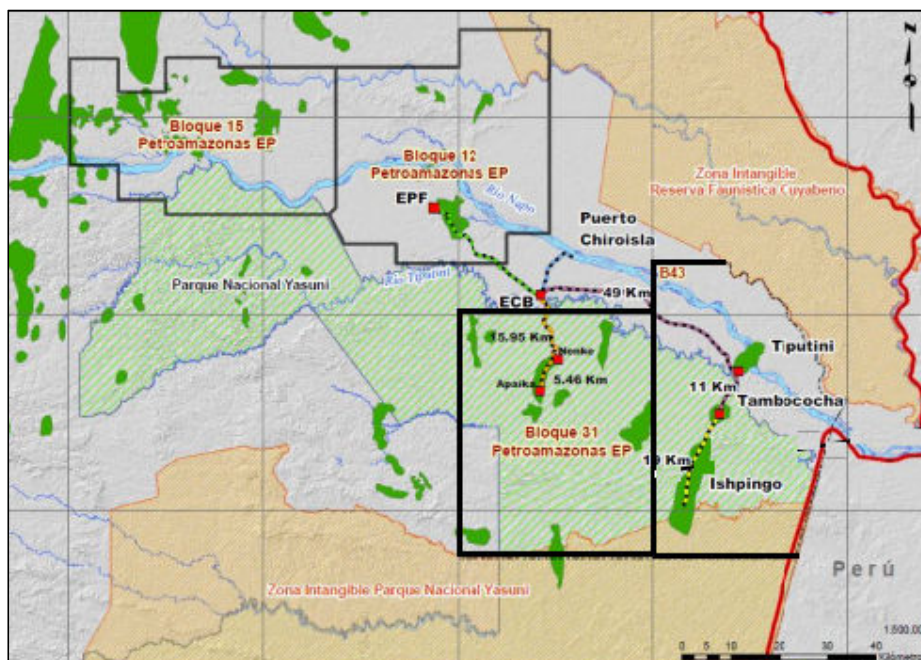
El transporte de hidrocarburos es una de las etapas más importantes en la industria hidrocarburífera, consiste en transportar los fluidos desde los pozos hasta las estaciones de producción donde se realiza la separación de sus fases, luego el petróleo obtenido es transportado hacia terminales marítimas para su comercialización o hacia refinerías para la obtención de productos derivados.

Los sistemas de transporte de hidrocarburos en el Ecuador se dividen en terrestres y marítimos, los primeros a su vez se subdividen en principales y secundarios, los sistemas principales son SOTE, OCP y OTA, denominados así por transportar la producción total desde la Amazonía hasta las estaciones de comercialización, los sistemas secundarios o ramales son Villano, Edén Yuturi y Apaika, considerados así por transportar las producciones de los pozos hasta las estaciones de producción. (PETROECUADOR, 2013)

El Bloque 31 se encuentra localizado al oeste del Bloque 43 y sus principales Campos son Apaika, Nenke, Obe, Nashiño, Minta, Kuwatai y Pimare, los cuales se enmarcan en el nuevo contexto de producción petrolera en la Amazonía ecuatoriana, en la figura 1.1 se observa la ubicación geográfica del Bloque 31.

La mayor parte del Bloque 31 se halla ubicada dentro del Parque Nacional Yasuní, constituye una de las áreas protegidas más grandes de la Amazonía, tiene una extensión de 982,000 Ha, ocupando territorios de pueblos en aislamiento voluntario y de pueblos aun no contactados, el desarrollo de los Campos ocupan parte PNY y de su zona de amortiguamiento. (PETROBRAS, 2006)

FIGURA 1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL BLOQUE 31



Fuente: Ministerio de Recursos No Renovables, 2014.

En zonas sensibles Petroamazonas EP no cuenta con generación eléctrica distribuida, ni plantas de procesamiento de crudo, el Bloque 31 al ser considerada una zona altamente sensible las operaciones hidrocarburíferas deben ser ejecutadas tomando en consideración el Plan de Manejo Ambiental. (PETROAMAZONAS 2013)

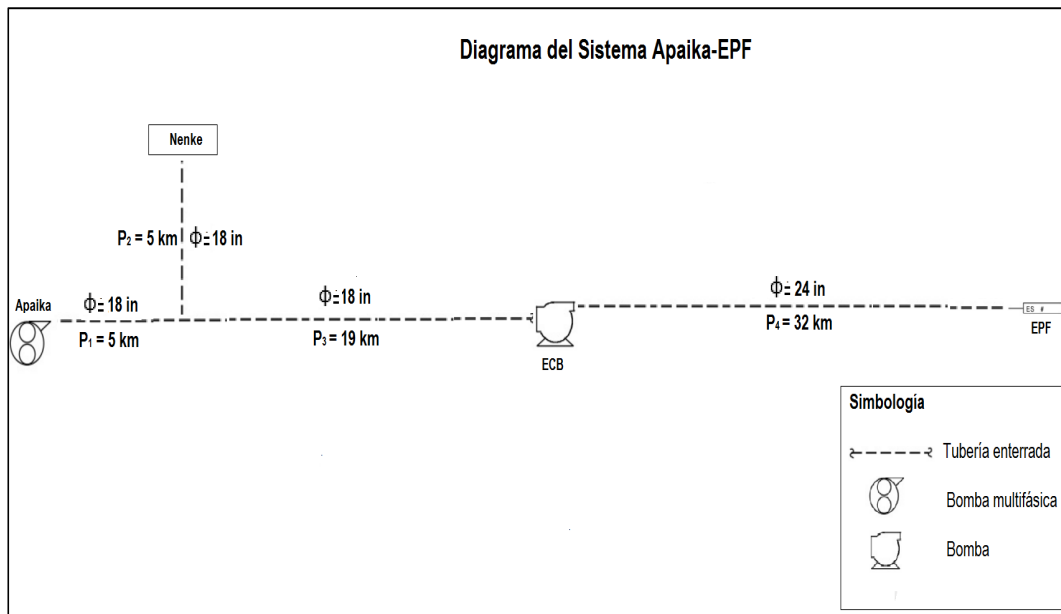
Los fluidos producidos del Bloque 31 son transportados hacia un centro de facilidades en el Bloque 12, donde se realiza el proceso de separación y tratamiento de los fluidos provenientes de los Campos Apaika y Nenke, la potencia de las bombas multifásicas permite que el fluido producido llegue hasta la Estación Central de Bombeo (ECB), una vez ahí se bombea la mezcla hasta EPF.

El analizar las características, propiedades y comportamiento del flujo de los fluidos es importante porque permite predecir los posibles problemas que se puedan ocasionar en el transporte de fluidos.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE FLUJO

El sistema principal de transporte del Bloque 31 lo compone la línea de flujo de Apaika a EPF, la cual se encuentra totalmente enterrada a 6.56 ft (2 metros), en la figura 1.2 se indica el diagrama del Sistema Apaika-EPF y en la tabla 1.1 se observan las características de la línea de flujo del sistema Apaika-EPF.

FIGURA 1.2. DIAGRAMA DEL SISTEMA APAIKA-EPF



Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

TABLA 1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE FLUJO DEL SISTEMA APAIKA-EPF

TRAMOS	PARÁMETROS (in)		DISTANCIA (ft)	PROFUNDIDAD (ft)
	Diámetro externo	Diámetro interno		
APAIKA a ECB	Diámetro externo	18.000	78740.16	6.56
	Diámetro interno	17.188		
ECB a EPF	Diámetro externo	24.000	104986.88	
	Diámetro interno	23.000		
AMBOS TRAMOS	Espesor	0.406		

Fuente: Petroamazonas EP, 2015.

La línea comienza en Apaika con un ducto de 18 in siendo esta la línea principal del Bloque 31, la línea secundaria Nenke se conecta aproximadamente a 16404.2

ft (5 km) de Apaika, donde los fluidos se mezclan, los cuales pasan por ECB a 78740.16 ft (24 km) donde cambia el diámetro del ducto a 24 in hasta llegar EPF, la longitud de la línea de flujo es de 183727.03 ft (56 km) aproximadamente, en la tabla 1.2 se muestran las propiedades de los materiales de la línea de flujo.

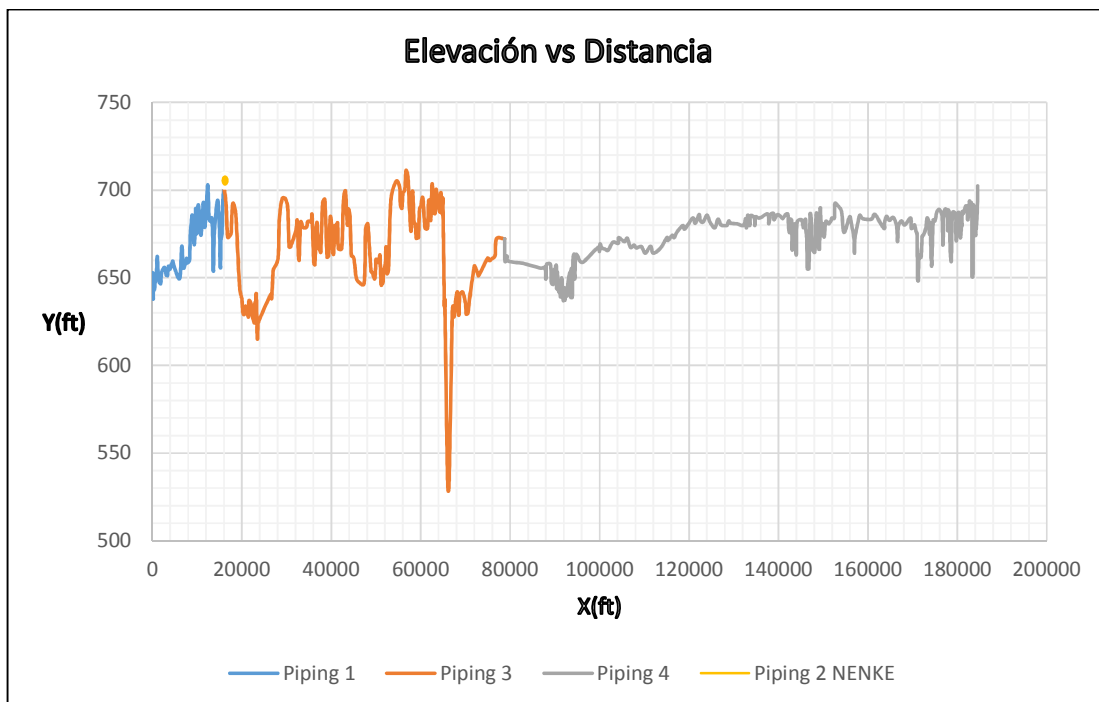
TABLA 1.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA LÍNEA DE FLUJO DEL SISTEMA APAIKA-EPF

MATERIAL	CAPACIDAD C.	CONDUCTIVIDAD T.	DENSIDAD
	(J/kg°C)	(W/m°C)	(kg/m ³)
ACERO AL CARBÓN	470.00	45.00	7850.00
SUELO	837.00	8.00	2200.00

Fuente: Petroamazonas EP, 2015.

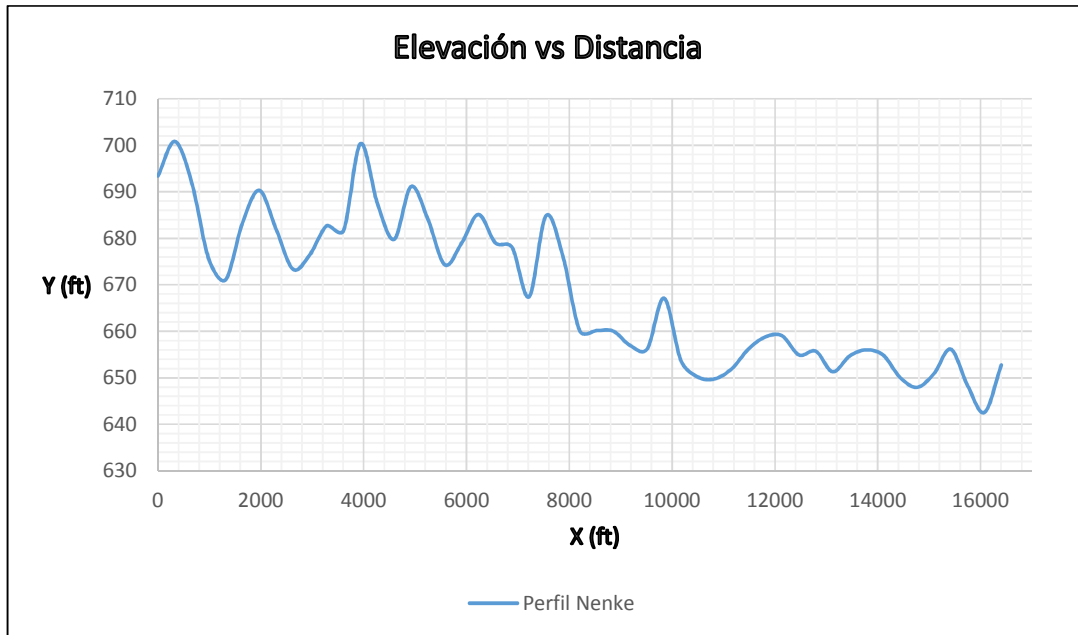
A medida que el Bloque 31 se siga desarrollando, se tiene previsto incorporar la producción de Campos adicionales, a continuación se observa el perfil de la línea Apaika-EPF en el gráfico 1.1 y Nenke-Apaika en el gráfico 1.2, el primero comprende 514 coordenadas y el segundo 51 coordenadas.

GRÁFICO 1.1. PERFIL DE APAIKA-EPF



Fuente: Petroamazonas EP, 2015.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 1.2. PERFIL DE NENKE-APAIKA

Fuente: Petroamazonas EP, 2015.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

1.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS PRODUCIDOS

Conocer las propiedades PVT de los fluidos permite el diseño óptimo de equipos de fondo y equipos de superficie, al no tener un conocimiento preciso de las propiedades de los fluidos puede ocasionar problemas operativos tales como depositación de sólidos, bajas velocidades, corrosión, etc., lo cual implica grandes pérdidas económicas, por lo tanto identificar las propiedades precisas de los fluidos y yacimientos, son parte vital en cualquier proyecto de producción de petróleo o gas. (Betancourt et al., 2008)

La producción eficiente de fluidos de la formación depende de los cambios de presión y temperatura que acompañan al proceso de desarrollo y agotamiento de un campo petrolero, las cuales afectan a las propiedades del fluido y propiedades de la formación.

En zonas remotas la falta de infraestructura, las restricciones de espacio y la logística de transporte hacen que la determinación de las propiedades y

características de los fluidos, el cálculo de tasas de flujo, los regímenes de producción esperados a lo largo de la tubería y por cuanto tiempo pueda mantenerse la producción, sea una tarea muy importante e imprescindible para el desarrollo de los campos petroleros. (Afanasyev et al., 2009)

Los reportes PVT permiten determinar una serie de propiedades físicas de un fluido a condiciones determinadas de presión, volumen y temperatura, en la actualidad son análisis que pueden determinarse en un menor tiempo en laboratorios especializados o con equipos especiales en el fondo del pozo o colocados en las líneas de flujo.

El análisis PVT del Bloque 31 permite conocer la composición detallada de los fluidos como las fracciones molares, las masas molares, las densidades, las viscosidades, etc., las tablas 1.3 y 1.5 indican la composición de los fluidos para cada campo, y las tablas 1.4 y 1.6 muestran las propiedades de las fracciones pesadas.

TABLA 1.3. COMPOSICIÓN DE LOS FLUIDOS CAMPO APAIKA

COMPONENTE	FLUJO MONOFÁSICO	COMPONENTE	FLUJO MONOFÁSICO
	MOL (%)		MOL (%)
N₂	0.79	C₉H₂₀	4.74
CO₂	0.35	C₁₀H₂₂	4.24
H₂S	0.00	C₁₁H₂₄	3.31
CH₄	8.94	C₁₂H₂₆	3.20
C₂H₆	1.44	C₁₃H₂₈	3.13
C₃H₈	3.50	C₁₄H₃₀	2.82
iC₄H₁₀	0.93	C₁₅H₃₂	2.63
nC₄H₁₀	2.98	C₁₆H₃₄	2.49
iC₅H₁₂	1.55	C₁₇H₃₆	2.45
nC₅H₁₂	1.84	C₁₈H₃₈	1.85
C₆H₁₄	3.06	C₁₉H₄₀	1.41
C₇H₁₆	4.80	C₂₀⁺	32.29
C₈H₁₈	5.26	TOTAL	100.00

Fuente: PVT LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, 2000.

Elaboración: LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, VENEZUELA.

La tabla 1.3 indica que el porcentaje de los compuestos inorgánicos como H₂S, CO₂, N₂ son mínimos, con los cuales se puede determinar que va a existir una leve corrosión ya que al mezclarse con el agua forman ácidos débiles.

TABLA 1.4. PROPIEDADES DE LAS FASES C₇⁺ Y C₂₀⁺ CAMPO APAIKA

PROPIEDADES DE LAS FASES	MASA MOLAR	DENSIDAD
	(g/mol)	(g/cm ³)
C ₇ ⁺	350.23	0.946
C ₂₀ ⁺	600.08	1.007

Fuente: PVT LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, 2000.

Elaboración: LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, VENEZUELA.

Los componentes desde CH₄ hasta C₂₀⁺ junto a la tabla 1.4 indican que el tipo de crudo que se produce es pesado debido a que las densidades específicas de las fases son altas, tiene un bajo contenido de nitrógeno y un alto contenido de carbonos.

TABLA 1.5. COMPOSICIÓN DE LOS FLUIDOS CAMPO NENKE

COMPONENTE	FLUJO MONOFÁSICO	COMPONENTE	FLUJO MONOFÁSICO
	MOL (%)		MOL (%)
N ₂	0.47	C ₁₄ H ₃₀	3.80
CO ₂	1.01	C ₁₅ H ₃₂	3.00
H ₂ S	0.00	C ₁₆ H ₃₄	2.96
CH ₄	5.47	C ₁₇ H ₃₆	2.69
C ₂ H ₆	1.25	C ₁₈ H ₃₈	2.96
C ₃ H ₈	1.21	C ₁₉ H ₄₀	3.04
iC ₄ H ₁₀	0.46	C ₂₀ H ₄₂	2.31
nC ₄ H ₁₀	0.69	C ₂₁ H ₄₄	2.36
iC ₅ H ₁₂	0.43	C ₂₂ H ₄₆	2.12
nC ₅ H ₁₂	0.31	C ₂₃ H ₄₈	2.01
C ₆ H ₁₄	0.88	C ₂₄ H ₅₀	1.86
C ₇ H ₁₆	1.38	C ₂₅ H ₅₂	1.92
C ₈ H ₁₈	1.86	C ₂₆ H ₅₄	1.67
C ₉ H ₂₀	2.55	C ₂₇ H ₅₆	1.64
C ₁₀ H ₂₂	2.76	C ₂₈ H ₅₈	1.55

Fuente: PVT LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, 2000.

Elaboración: LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, VENEZUELA.

TABLA 1.5. CONTINUACIÓN

COMPONENTE	FLUJO MONOFÁSICO	COMPONENTE	FLUJO MONOFÁSICO
	MOL (%)		MOL (%)
C₁₁H₂₄	3.08	C₂₉H₆₀	1.57
C₁₂H₂₆	2.87	C₃₀⁺	32.19
C₁₃H₂₈	3.69	TOTAL	100.00

Fuente: PVT LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, 2000.

Elaboración: LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, VENEZUELA.

La tabla 1.5 indica que la composición del fluido llega hasta C₃₀⁺ teniendo un mayor porcentaje de moles a ésta fracción, los compuestos inorgánicos presentes se encuentran en valores mínimos, los cuales definen que el fluido puede ocasionar problemas leves de corrosión.

TABLA 1.6. PROPIEDADES DE LAS FASES C₇⁺, C₁₂⁺, C₂₀⁺ Y C₃₀⁺ CAMPO NENKE

PROPIEDADES DE LAS FASES	MASA MOLAR	DENSIDAD
	(g/mol)	(g/cm ³)
C₇⁺	445.74	0.967
C₁₂⁺	494.53	0.977
C₂₀⁺	632.88	1.004
C₃₀⁺	814.00	1.037

Fuente: PVT LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, 2000.

Elaboración: LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, VENEZUELA.

La tabla 1.6 indica que el tipo de crudo que se produce es un crudo pesado debido a que las densidades específicas de las fracciones son altas.

1.3.1. PRODUCCIÓN DEL BLOQUE 31

La producción del Bloque 31 en su mayoría proviene de la arena M1 con un espesor de 8 ft (2.4 m). (PVT LABORATORY STUDY REPORT SCHLUMBERGER, 2000)

Existen 20 pozos que aportan a la producción diaria, 16 pozos en Apaika siendo la mayor producción que aporta al Bloque y 4 pozos en Nenke, la producción de cada pozo y total se observa en la tabla 1.7.

TABLA 1.7. DATOS DE PRODUCCIÓN DEL BLOQUE 31

POZO	CRUDO	AGUA	GAS	BSW	GOR	API	SAL
	stb/d	stb/d	Mscf/d	%	scf/stb	°	ppm
APAICA A002 M1	331.0	738.0	15.0	69.00	45.0	17.7	3650.0
APAICA A003H M1	875.0	3104.0	58.0	78.00	66.0	17.2	6800.0
APAICA A004H M1	377.0	5007.0	37.0	93.00	98.0	18.0	3350.0
APAICA A005H M1	754.0	921.0	27.0	55.00	36.0	18.0	3550.0
APAICA A006 M1	400.0	65.0	6.0	14.00	15.0	10.0	3500.0
APAICA A008H M1	1079.0	719.0	29.0	40.00	27.0	17.8	4100.0
APAICA A009 M1	197.0	532.0	5.0	73.00	25.0	18.0	3750.0
APAICA A010H M1	482.0	170.0	18.0	26.00	37.0	18.8	13000.0
APAICA A011 M1	1093.0	468.0	24.0	30.00	22.0	18.3	5800.0
APAICA A012H M1	301.0	339.0	7.0	53.00	23.0	18.8	5300.0
APAICA A013 M1	513.0	200.0	17.0	28.00	33.0	17.7	5050.0
APAICA A014 M2	296.0	83.0	5.0	22.00	17.0	15.7	9500.0
APAICA B003 M1	671.0	92.0	38.0	12.00	57.0	17.9	4300.0
APAICA B005 M1	532.0	168.0	32.0	24.00	60.0	18.5	3450.0
APAICA B006 M1	997.0	64.0	57.0	6.00	57.0	17.7	17300.0
APAICA B007 M1	658.0	517.0	45.0	44.00	68.0	18.4	3400.0
NENKE B001 M1	137.0	1235.0	13.0	90.00	95.0	17.5	3100.0
NENKE B002 M1	385.0	898.0	36.0	70.00	94.0	17.9	5750.0
NENKE B004 M1	1244.0	108.0	68.0	8.00	55.0	17.7	12700.0
NENKE B008 M1	1197.0	337.0	62.0	22.00	52.0	18.2	3400.0
Producción Apaika	9556.0	13187.0	420.0	57.98	44.0	17.6	-
Producción Nenke	2963.0	2578.0	179.0	46.53	61.0	17.9	-
Producción total	12519.0	15765.0	599.0	55.74	48	17.7	-

Fuente: Petroamazonas EP, 2015.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Únicamente el pozo Apaika A014 produce de la arena M2, cuya composición se asemeja a la arena M1.

1.3.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Los parámetros de operación indican las condiciones iniciales y la eficiencia del sistema, mediante el sistema SCADA se controla la presión de salida a la cual es transportado el fluido hasta llegar al lugar deseado, en la tabla 1.8 se indica los parámetros de operación del Bloque 31.

TABLA 1.8. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA APAIKA-EPF

PARÁMETROS	APAIKA	UNIDADES
$P_{\text{salidaApaika}}$	592.0	psig
$P_{\text{llegadaECB}}$	548.0	psig
$P_{\text{llegadaEPF}}$	500.0	psig
T	150.0	°F

Fuente: Petroamazonas EP, 2015.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

1.4. ASEGURAMIENTO DE FLUJO^{1,2}

El aseguramiento de flujo es uno de los temas principales en la definición de la arquitectura e ingeniería de transporte y proceso de los sistemas de producción petrolera, el aseguramiento de flujo fue introducido por la empresa Petrobras en la década de los noventa como “Garantía de Fluxo”, que consistía en cubrir todos los aspectos de termohidráulica y fisicoquímica de los sistemas de producción, que les permitiera hacer producir sus yacimientos de petróleo pesado en aguas profundas.

En la actualidad el aseguramiento de flujo se ha desarrollado, incluyendo la planeación, desarrollo, implantación, mantenimiento, operación de tecnologías y estrategias para asegurar que el fluido sea producido efectivamente desde el yacimiento hacia las estaciones de producción ya sea en aguas profundas o en superficie.

Aseguramiento de flujo se define como el conjunto de actividades orientadas a la prevención, control, remediación de obstrucciones y condiciones inestables en el flujo de hidrocarburos, para lo cual se requiere:

- Un profundo conocimiento de las propiedades de los fluidos producidos y transportados.
- Análisis térmico e hidráulico detallados del sistema.

¹ Reyes et al. (2005). Aseguramiento del flujo en sistemas de aceite pesado en México.

² Schlumberger (2011). Aseguramiento de flujo.

- El desarrollo de estrategias para el control de sólidos tales como hidratos, parafinas, asfaltenos e incrustaciones.

Los objetivos principales del aseguramiento del flujo son:

- Mantener la trayectoria del flujo abierta en todo momento.
- Mantener el perfil de producción a lo largo de la vida operativa del sistema.
- Minimizar las salidas de operación por trabajos de remediación o mantenimiento.
- Disminuir o eliminar las condiciones inestables de flujo.

El aseguramiento de flujo en el transporte de petróleo presenta desafíos operativos, más aun cuando el transporte está acompañado por agua y gas, donde no se ha realizado la separación previa de las fases transportadas, de igual forma se estudian otras problemáticas como son la corrosión y erosión de la línea de flujo, bacheo y emulsiones a causa de la dinámica de flujo (flujo de fluido monofásico y multifásico) y la química de los fluidos producidos.

Debido a la composición de los fluidos como a las variaciones de presión, temperatura y acumulación de sólidos, los cuales pueden impedir el flujo hacia las instalaciones de procesamiento, el aseguramiento de flujo ha sido establecido como una parte fundamental del diseño de sistemas de producción de hidrocarburos.

1.5. FLUJO MULTIFÁSICO EN TUBERÍAS HORIZONTALES^{3,4,5}

El flujo multifásico se define como el movimiento simultáneo de la fase líquida y gaseosa, es un fenómeno difícil de entender, predecir y modelar, las estructuras del flujo multifásico son clasificadas en los regímenes de flujo, cuyas características dependen de una serie de parámetros, pero los cuales no están bajo el control del diseñador y operador del sistema.

³ Anselmi et al. (2008). Revisión de los métodos y correlaciones para el análisis en las líneas de transporte con flujo multifásico.

⁴ Pazmiño J. (1989). Flujo multifásico en tuberías CEPE.

⁵ Handbook of multiphase flow metering. (2005).

1.5.1. REGÍMENES DE FLUJO

Llamados también patrones de flujo, los cuales varían dependiendo de las condiciones operativas, propiedades de los fluidos, velocidades de flujo, orientación y geometría de la tubería.

La transición entre los regímenes de flujo puede ser un proceso gradual, en un determinado punto en la línea, solamente existe un tipo de flujo para cualquier instante de tiempo. Sin embargo, como las condiciones de flujo cambian, el régimen de flujo puede cambiar de un tipo a otro en una misma sección transversal, los patrones de flujo se clasifican en:

1.5.1.1. Flujo intermitente

Las fases se encuentran fluyendo alternadamente, aquí la fase líquida posee una velocidad moderada, mientras que la fase gaseosa esta entre moderada y alta, se clasifica en:

Tapón de gas: Se distingue por el flujo de grandes burbujas de gas a lo largo de toda la tubería.

Tapón de líquido (Bache): Consiste en grandes baches de líquido alternado con burbujas de gas a alta velocidad llenando la mayor parte de la tubería.

1.5.1.2. Flujo distribuido

Este flujo se caracteriza por lo que una fase se encuentra dispersa en la otra, dado que el flujo de una de las fases es mayor a la otra, se clasifica en:

Burbuja: Las burbujas de gas se mueven a lo largo de la parte superior de la tubería con una velocidad aproximada a la del líquido, la fase continua es el líquido.

Neblina: La fase continua es la del gas y el líquido está completamente disuelto en él, el gas lleva en suspensión gotas de líquido.

1.5.1.3. Flujo segregado

Las fases se encuentran en su mayor parte separadas, la característica principal es la fase líquida posee una velocidad baja, mientras que la fase gaseosa esta entre moderada y alta, se clasifica en:

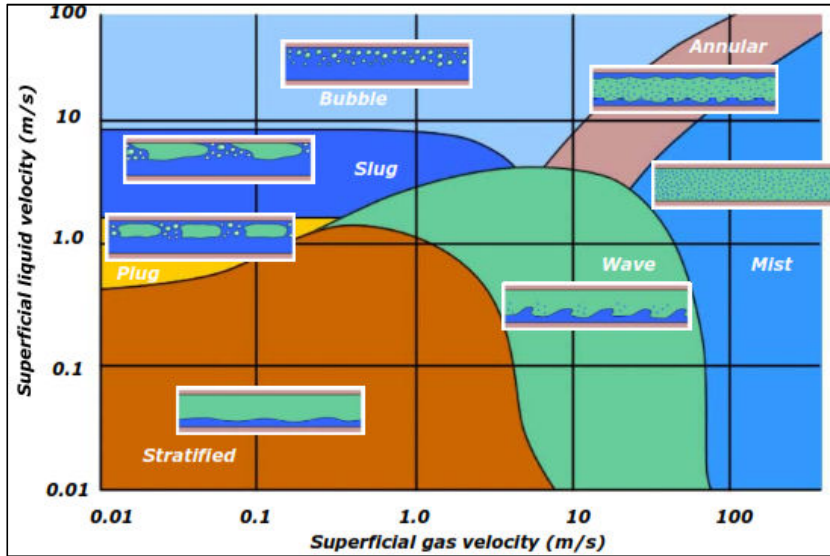
Estratificado: El gas viaja por la parte superior de la tubería y el líquido por la parte inferior, existe una interface prácticamente lisa, la interface es relativamente suave y la fracción ocupada por cada fase permanece constante.

Ondulado: Se origina a través del flujo estratificado cuando se rompe la continuidad de la interface, el gas se mueve apreciablemente más rápido que el líquido formando ondulaciones en la superficie de líquido.

Anular: Una película del líquido está en contacto con las paredes de la tubería, mientras que el gas fluye como un núcleo a alta velocidad en el centro, es de régimen muy estable.

La figura 1.3 es una ilustración cualitativa de los regímenes de flujo, las cuales dependen de las velocidades superficiales de las fases.

FIGURA 1.3. MAPA DE PATRONES DE FLUJO



Fuente: Handbook of multiphase flow metering, NFOGM y TEKNA, 2005.

Existen diferentes mecanismos de determinar los regímenes de flujo, en el capítulo 2 se mencionará las investigaciones más utilizadas para el cálculo de regímenes de flujo para tubería horizontal.

1.5.2. PARÁMETROS Y PROPIEDADES DE FLUJO MULTIFÁSICO

Las propiedades más importantes son las siguientes:

1.5.2.1. Colgamiento (Hold Up)

Se define como la razón de volumen en un segmento de tubería por el volumen total del segmento de tubería, el colgamiento es tanto para el gas y líquido, su valor varía entre 0 y 1 respectivamente.

$$H_l = \frac{\text{Volumen de líquido en un segmento de tubería}}{\text{Volumen total del segmento de tubería}} \quad (1.1)$$

$$H_g = \frac{\text{Volumen de gas en un segmento de tubería}}{\text{Volumen total del segmento de tubería}} \quad (1.2)$$

Ya sea conociendo el colgamiento del líquido o del gas, se puede calcular el remanente de cada fracción por la siguiente expresión:

$$H_l + H_g = 1 \quad (1.3)$$

1.5.2.2. Colgamiento del líquido sin deslizamiento (No slip liquid Hold Up)

Se define como la razón del volumen del líquido en un segmento de tubería, dividido para el volumen total del segmento de tubería, considerando que el gas y el líquido viajan a la misma velocidad, se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$\lambda_l = \frac{q_l}{q_l + q_g} \quad (1.4)$$

Donde:

λ_l = Colgamiento del líquido sin deslizamiento

q_l y q_g = Tasas de flujo de líquido y gas, $\left[\frac{ft^3}{s} \right]$

1.5.2.3. Velocidades superficiales

Se define como la velocidad que debería tener una fase de un fluido si éste fluyera a través de toda el área transversal de la tubería.

Para la fase gaseosa y líquida, las velocidades superficiales se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$V_{sg} = \frac{q_g}{A} \quad (1.5)$$

$$V_{sl} = \frac{q_l}{A} \quad (1.6)$$

La velocidad de la mezcla se calcula de la siguiente forma:

$$V_m = \frac{q_g + q_l}{A} = V_{sg} + V_{sl} \quad (1.7)$$

Donde:

$$V_{sg} = \text{Velocidad superficial del gas, } \left[\frac{ft}{s} \right]$$

$$V_{sl} = \text{Velocidad superficial del líquido, } \left[\frac{ft}{s} \right]$$

$$V_m = \text{Velocidad de la mezcla, } \left[\frac{ft}{s} \right]$$

$$A = \text{Área transversal de la tubería, } \left[ft^2 \right]$$

1.5.2.4. Velocidades reales

Las velocidades reales dependen del área a través del cual fluye el gas y el líquido, si ésta es reducida por efecto del colgamiento, las velocidades reales del gas y del líquido son las siguientes:

$$V_g = \frac{q_g}{A^* H_g} = \frac{V_{sg}}{H_g} \quad (1.8)$$

$$V_l = \frac{q_l}{A^* H_l} = \frac{V_{sl}}{H_l} \quad (1.9)$$

Donde:

$$V_g = \text{Velocidad real del gas, } \left[\frac{ft}{s} \right]$$

$$V_l = \text{Velocidad real del líquido, } \left[\frac{ft}{s} \right]$$

1.5.2.5. Velocidad de deslizamiento

Representa la velocidad entre las dos fases, definida como la diferencia entre las velocidades reales del gas y del líquido.

$$V_s = V_g - V_l \quad (1.10)$$

Donde:

$$V_s = \text{Velocidad de deslizamiento, } \left[\frac{ft}{s} \right]$$

Conociendo las velocidades anteriormente mencionadas, se puede calcular el colgamiento con deslizamiento y sin deslizamiento, están dadas por las siguientes expresiones:

$$H_l = \frac{V_s - V_m + [(V_m - V_s) + 4V_s * V_{sl}]^{\frac{1}{2}}}{2V_s} \quad (1.11)$$

$$\lambda_l = \frac{V_{sl}}{V_m} \quad (1.12)$$

1.5.2.6. Densidad

La densidad se define como la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia.

En el cálculo de la densidad de líquidos se requiere conocer la fracción de agua y la de petróleo, al igual que las densidades que componen la fase líquida, la densidad del líquido se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$\rho_l = \rho_o * f_o + \rho_w * f_w \quad (1.13)$$

$$f_o = \frac{q_o}{q_o + q_w} \quad (1.14)$$

$$f_w = 1 - f_o \quad (1.15)$$

El cálculo de las densidades de dos fases se la obtiene a partir de los colgamientos, los cuales permiten calcular las densidades con deslizamiento, sin deslizamiento y considerando la interacción de éstas últimas, a continuación se encuentran las expresiones para el cálculo de dichas densidades.

$$\rho_s = \rho_l * H_l + \rho_g * H_g \quad (1.16)$$

$$\rho_m = \rho_l * \lambda_l + \rho_g * \lambda_g \quad (1.17)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_l * \lambda_l^2}{H_l} + \frac{\rho_g * \lambda_g^2}{H_g} \quad (1.18)$$

Donde:

$$\rho_l = \text{Densidad del líquido, } \left[\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right]$$

$$\rho_o = \text{Densidad del petróleo, } \left[\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right]$$

$$\rho_w = \text{Densidad del agua, } \left[\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right]$$

f_o = Fracción de petróleo, adimensional.

f_w = Fracción de agua, adimensional.

$$\rho_s = \text{Densidad con deslizamiento, } \left[\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right]$$

$$\rho_m = \text{Densidad sin deslizamiento, } \left[\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right]$$

$$\rho_k = \text{Densidad por pérdidas de presión y número de Reynolds, } \left[\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right]$$

1.5.2.7. Viscosidad

La viscosidad se define como la resistencia de un fluido a fluir.

La viscosidad de la fase líquida se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\mu_l = \mu_o * f_o + \mu_w * f_w \quad (1.19)$$

Para el cálculo de la viscosidad de la fase gas-líquido, se toma en cuenta los colgamientos con y sin deslizamiento.

$$\mu_s = (\mu_l)^{H_l} * (\mu_g)^{H_g} \quad (1.20)$$

$$\mu_m = \mu_l * \lambda_l + \mu_g * \lambda_g \quad (1.21)$$

Donde:

μ_b = Viscosidad del petróleo, [cp]

μ_w = Viscosidad del agua, [cp]

μ_g = Viscosidad del gas, [cp]

μ_l = Viscosidad de la fase líquida, [cp]

μ_s = Viscosidad con deslizamiento, [cp]

μ_m = Viscosidad sin deslizamiento, [cp]

1.6. SOFTWARE A UTILIZARSE

La utilización de los softwares en la industria petrolera hoy en día son de gran ayuda, ya que reduce considerablemente tiempos de estudios, son más eficientes y precisos, los cuales abarcan características y propiedades que años atrás eran difíciles de cubrir.

A lo largo de los años se han desarrollado varios programas de cómputo para la simulación de fluidos entre los cuales tenemos Pipephase, Pipesim, Prosper/GAP, Wellflo, Olga, Tacite, PLAC, LedaFlow, etc.

En la tabla 1.9 se pueden apreciar algunas de las características que utilizan cuatro de los softwares más utilizados, realizando una comparación entre ellos.

TABLA 1.9. COMPARACIÓN DE LOS SOFTWARES

EVALUACIONES BÁSICAS	PIPESIN	OLGA	PIPEPHASE	TACITE
Estado transitorio	-	X	-	X
Estado estacionario	X	X	X	X
Redes de recolección	X	X	X	X
Aseguramiento de flujo	X	X	X	X
Formación de sólidos	X	X	X	X
Formación de hidratos	X	X	X	X

Fuente: Características de los Softwares, Varios Autores.

Para el desarrollo de este Proyecto se utilizará el software Olga, considerado uno de los softwares más completos, con el cual se realizará la simulación del sistema Apaika-EPF, creando escenarios que analizarán el comportamiento de los fluidos.

CAPÍTULO 2

MODELO MATEMÁTICO PARA EVALUAR EL FLUJO MULTIFÁSICO HORIZONTAL

2.1. INTRODUCCIÓN

El flujo multifásico en tuberías es un problema difícil de modelar matemáticamente, se han desarrollado diferentes correlaciones de flujo multifásico, basándose en principios termodinámicos y de flujo de fluidos, pero principalmente en observaciones empíricas limitadas por las caídas de presión, diámetros de tubería, condiciones de flujo y características de los fluidos, etc. (Azócar y González, 2007)

El estudio minucioso de las características de los fluidos transportados permite conocer las variables principales como densidades, viscosidades, velocidades, etc., que afectan a las correlaciones de flujo multifásico, las cuales ayudan a predecir los posibles patrones de flujo en el transporte de los fluidos.

Las aplicaciones de flujo multifásico son diversas, entre las cuales se encuentra: determinar la presión en la cabeza del pozo, determinar el diámetro de la tubería, predecir posibles cambios en los regímenes de flujo, problemas operativos a lo largo de la vida útil del sistema, etc.

El análisis completo del sistema se realizará mediante la utilización del software, el cual abarca los aspectos de aseguramiento de flujo, la determinación de la correlación a ser utilizada, ayudará únicamente a determinar las pérdidas de presión y los patrones de flujo.

Se realizará una breve descripción de las correlaciones más utilizadas para el cálculo de gradientes de presión para tuberías horizontales, considerando que los fluidos transportados se encuentran en flujo monofásico, el cual representa las condiciones actuales de operación, ya que al hacer un cálculo dinámico

corresponde a resolver ecuaciones diferenciales, además de cálculos de transferencia de calor. Cabe mencionar que la fase dominante es el petróleo, ya que cuando se trata de gases y condensados el comportamiento es diferente.

Adicionalmente se supondrá que el sistema se encuentra operando en flujo multifásico, para determinar las posibles condiciones que se puedan presentar.

2.2. ECUACIÓN GENERAL DEL GRADIENTE DE PRESIÓN⁴

Las correlaciones de flujo multifásico horizontal se derivan de la ecuación general del gradiente de presión, la cual permite visualizar la variación de presión del fluido en todos los puntos de la tubería.

Para obtener la caída de presión entre dos puntos de una tubería es necesario realizar un balance de energía en el flujo de los fluidos, aplicando la ley de la conservación de la energía:

“La energía de un fluido que entra en cualquier sección de una tubería es igual a la energía del fluido que sale de dicha sección.”

A continuación se describe la ecuación del gradiente de presión:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{1}{144} \left[\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{elev.} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{fricc.} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{acel.} \right] \left[\frac{psi}{ft} \right]$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{1}{144} \left(\frac{g * \rho_s * \text{sen}\theta}{g_c} + \frac{f_{tp} * \rho_m * v_m^2}{2 * g_c * d_i} + \frac{\rho_s * \Delta v_m^2}{2 * g_c * \Delta L} \right) \left[\frac{psi}{ft} \right] \quad (2.22)$$

Donde:

⁴ Pazmiño J. (1989). Flujo multifásico en tuberías CEPE.

g = Aceleración de la gravedad, $322 \left[\frac{ft}{s^2} \right]$

ρ_s = Densidad con deslizamiento, $\left[\frac{lbm}{ft^3} \right]$

θ = Ángulo que forma la dirección de flujo con la horizontal ($\theta=0^\circ$ para flujo horizontal, $\theta=90^\circ$ en flujo vertical)

g_c = Constante gravitacional, $322 \left[\frac{lbm \cdot ft}{lbf \cdot s^2} \right]$

f_{tp} = Factor de fricción de la mezcla, adimensional

ρ_m = Densidad sin deslizamiento, $\left[\frac{lbm}{ft^3} \right]$

V_m = Velocidad de la mezcla, $\left[\frac{ft}{s} \right]$

d_i = Diámetro interno de la tubería, $[ft]$

Las variables más importantes que afectan a la ecuación del gradiente de presión son las siguientes:

Diámetro y tasa de flujo: En el diseño de líneas de flujo es de importancia conocer las tasas de flujo que se van a manejar, a una mayor tasa de flujo, mayor será la velocidad de los fluidos transportados, lo que provoca un incremento en las pérdidas por fricción y un cambio en los patrones de flujo.

A menores diámetros, mayores serán las pérdidas de presión, ya que la rugosidad de las paredes de la tubería tiene mayor efecto en el factor de fricción para diámetros pequeños.

Además es de importancia determinar la presión a la cual el fluido es transportado.

Propiedades de los fluidos: Las pérdidas de presión aumentan, a medida que incrementa la relación gas-líquido, esto se debe a un decremento en la presión y el petróleo libera el gas que contiene en solución, ocasionando un cambio en los patrones de flujo, debido a la diferencia en las velocidades de cada fase.

Las pérdidas de presión aumentan, a medida que incrementa la viscosidad, en el caso de la densidad hay que tener mucho cuidado ya que se ocasiona la separación gravitacional, debido a que la velocidad del flujo no es la suficiente para mantener una mezcla uniforme.

Válvulas y accesorios: El uso de válvulas y accesorios a lo largo de la tubería cambia la dirección del flujo de forma total o parcial, altera la configuración característica de la línea de flujo y ocasiona turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta.(Crane, 1989)

2.3. CORRELACIONES DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA TUBERÍAS HORIZONTALES^{4,6}

Las correlaciones de flujo multifásico ofrecen un método eficaz para evaluar características asociadas con el transporte de fluidos, son herramientas muy importantes para determinar las caídas de presión en tuberías, en la actualidad se utilizan programas computacionales los cuales contienen los principios fundamentales de las correlaciones que facilitan las predicciones del comportamiento de los fluidos.

Las correlaciones que se utilizan para evaluar el flujo multifásico horizontal se describen a continuación:

⁴ Pazmiño J. (1989). Flujo multifásico en tuberías CEPE.

⁶ Correlaciones de flujo multifásico para tuberías horizontales, <http://es.slideshare.net/LuisaMoralez/a7-21139247>

2.3.1. LOCKHART Y MARTINELLI

Es considerada una buena correlación para bajas tasas de producción y diámetros pequeños de tubería, fue calculada suponiendo que:

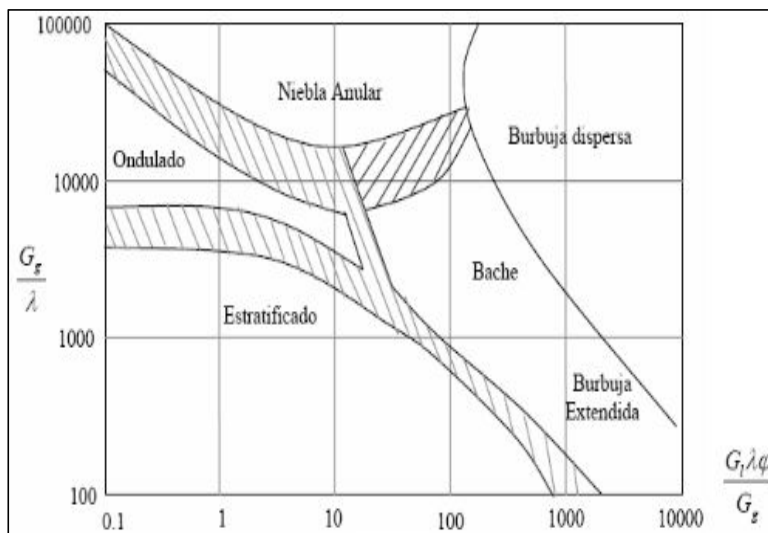
- Las fases de líquido y gas son tratadas por separado.
- No existe resbalamiento entre fases.
- La velocidad superficial del líquido y gas son iguales.
- El área de la tubería es constante.

Las caídas de presión de Lockhart y Martinelli fueron calculadas suponiendo que cada una de las fases fluye sola en la tubería y cada fase está ocupando el volumen total de la tubería.

2.3.2. BAKER

Baker realizó varios estudios basándose en el trabajo de Lockhart y Martinelli, las correlaciones de Baker son aplicables para tuberías de diámetros mayores a 6 pulgadas, en la figura 2.1 se muestran los regímenes de flujo determinados por Baker.

FIGURA 2.1. REGÍMENES DE FLUJO DE BAKER



Fuente: Flujo multifásico en tuberías, Pazmiño Jorge, 1989.

Los patrones de flujo dependen del flujo másico del líquido y gas, y los parámetros λ , φ que son calculados mediante las siguientes expresiones:

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_g}{0,075} \right) \left(\frac{\rho_l}{62,4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

$$\varphi = \frac{73}{\sigma_l} \left[\mu_l \left(\frac{62,4}{\rho_l} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

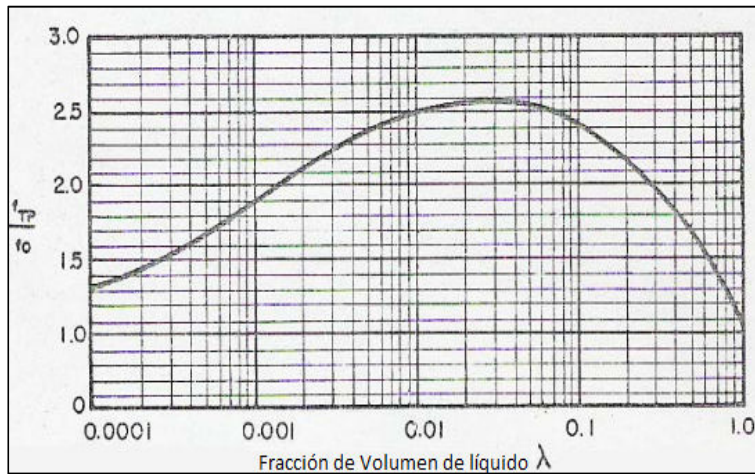
Debido a que el cambio del patrón de flujo puede suceder en cualquier tramo de la línea, este método recomienda escoger tramos pequeños de tubería para obtener un resultado más preciso.

2.3.3. DUKLER ET AL.

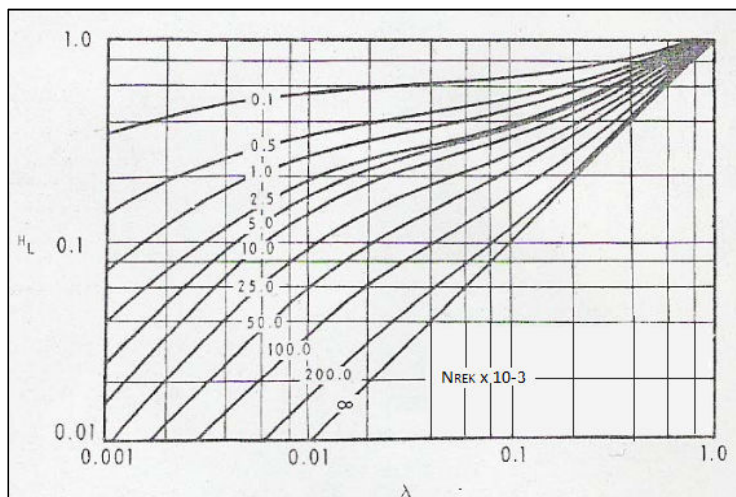
Las correlaciones propuestas por estos autores se basaron en el estudio de datos de laboratorio de tubería corta y datos de campo de largos tramos de tubería, no considera regímenes de flujo y desprecia los efectos de aceleración, se divide en dos casos:

- **Caso I:** Considera que no existe deslizamiento entre las fases y supone flujo homogéneo.
- **Caso II:** Considera deslizamiento entre las fases transportadas.

El factor de fricción y el Hold Up determinado por Dukler, se observan en las figuras 2.2 y 2.3.

FIGURA 2.2. CURVA DEL FACTOR DE FRICCIÓN NORMALIZADO

Fuente: Flujo multifásico en tuberías, Pazmiño Jorge, 1989.

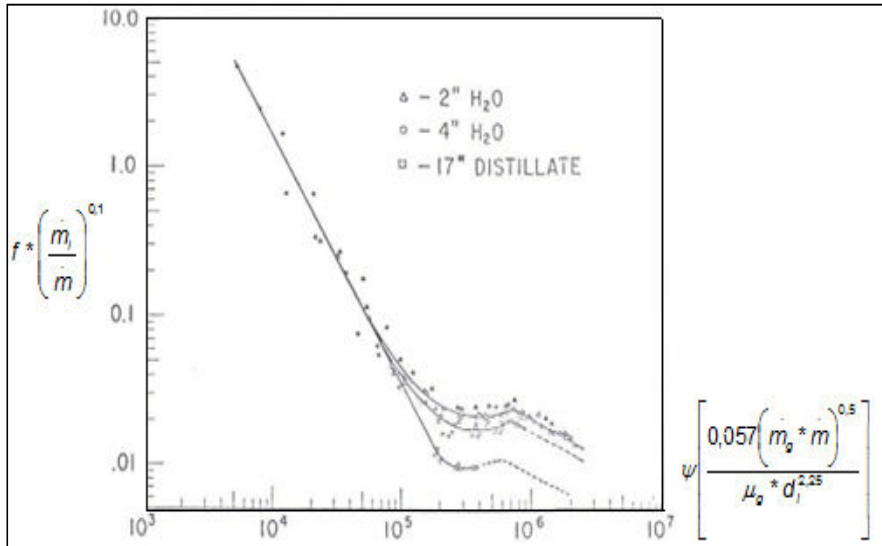
FIGURA 2.3. CORRELACIÓN PARA EL HOLDUP DE DUKLER

Fuente: Flujo multifásico en tuberías, Pazmiño Jorge, 1989.

2.3.4. EATON ET AL.

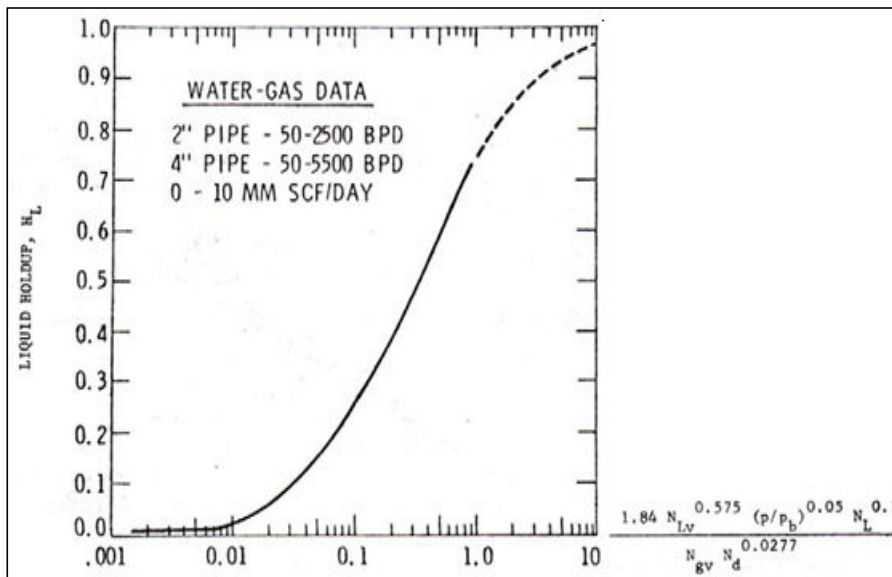
La correlación propuesta por estos autores fue desarrollada en el estudio de un sistema de tuberías de 2 y 4 pulgadas de diámetro, y una longitud de 1.700 pies, proponiendo correlaciones para determinar el factor de fricción y la fracción de líquido con deslizamiento, dichas consideraciones se observan en la figura 2.4 y la figura 2.5.

FIGURA 2.4. CORRELACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN DE EATON ET AL.



Fuente: Flujo multifásico en tuberías, Pazmiño Jorge, 1989.

FIGURA 2.5. CORRELACIÓN PARA EL HOLDUP DE EATON ET AL.



Fuente: Flujo multifásico en tuberías, Pazmiño Jorge, 1989.

Como caso especial se mencionará el método de Beggs y Brill, dicho método funciona para la predicción de patrones de flujo y el cálculo de gradientes de presión en tuberías horizontales, inclinadas y verticales, siendo uno de los métodos más utilizados.

2.3.5. BEGGS Y BRILL

La correlación de Beggs y Brill fue desarrollada a partir de la obtención de datos experimentales en una tubería de acrílico de 1 y 1,5 pulgadas de diámetro y de 90 pies de longitud, la cual tenía un mecanismo que podía inclinar la tubería de horizontal a vertical, con ángulos de inclinación de 0 ° a 90°.

La correlación está basada en el mapa de regímenes de flujo, este método se puede utilizar para predicciones de flujo vertical y horizontal.

Las correlaciones desarrolladas por Beggs y Brill consideran:

- La mezcla de la fase se considera como una mezcla homogénea.
- Considera deslizamiento entre las fases.
- Las velocidades superficiales de las fases son distintas.
- Considera las caídas de presión por aceleración, elevación y fricción.
- El área transversal de la tubería es constante a lo largo de la dirección axial.

2.3.6. OTROS AUTORES

Anteriormente se mencionó las correlaciones más utilizadas en el cálculo del gradiente de presión en tuberías horizontales, pero cabe mencionar que existen un sin número de autores que han investigado sobre la predicción de pérdidas de presión en tuberías horizontales tales como:

- Yocum que relacionó el factor de fricción con el Número de Froude de la mezcla, donde los efectos de la energía cinética son despreciados.
- Oliemans estudió la predicción de pérdidas de presión en líneas de transmisión de gas.
- Hughmark demostró que ningún modelo completamente separado, no homogéneo, representa los regímenes de la mezcla, proponiendo un modelo en el que el flujo de la mezcla como una suspensión de burbujas en el líquido.

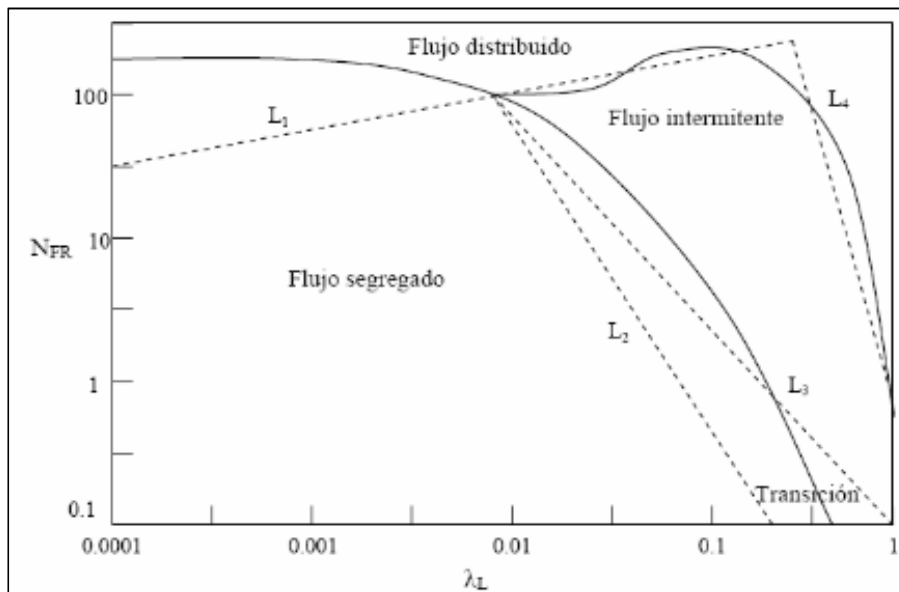
La correlación a ser empleada en cualquier proyecto dependerá de los datos que se disponga para el cálculo de las pérdidas de presión, ya que cada correlación difiere en la predicción del factor de fricción y el colgamiento, al igual de las características de la línea de flujo.

2.4. SELECCIÓN DE LA CORRELACIÓN A SER UTILIZADA

El modelo a ser utilizado en este estudio es el de Beggs y Brill, a partir de la ecuación general del gradiente de presión, se obtiene la expresión para el cálculo de pérdidas de presión, en algunos casos las pérdidas de presión por elevación no se toman en cuenta, debido a que la topografía donde pasa la tubería no evidencia irregularidades considerables.

Beggs y Brill clasificaron el flujo bifásico en tres patrones de flujo observados en la tabla 2.1, mediante el cual determinaron el mapa de patrones de flujo en función de λ_L y del Número de Froude (N_{FR}), en la figura 2.6 se muestra el trabajo original de Beggs y Brill en líneas continuas y modificaciones posteriores en líneas punteadas, con lo cual se pudo incluir la zona de transición.

FIGURA 2.6. MAPA DE PATRONES DE FLUJO HORIZONTAL



Fuente: Flujo multifásico en tuberías, Pazmiño Jorge, 1989.

La clasificación de los patrones de flujo se observa en la tabla 2.1.

TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PATRONES DE FLUJO

Patrón de Flujo	Clasificación
Distribuido	Burbuja
	Neblina
Intermitente	Tapón de líquido
	Tapón de gas
Segregado	Estratificado
	Ondulante
	Anular

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

2.4.1. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS PATRONES DE FLUJO

Los patrones de flujo multifásico se determinan mediante las siguientes expresiones:

- a. Se calcula el Número de Froude:

$$N_{FR} = \frac{v_m^2}{g * d_i} \quad (2.26)$$

- b. Luego se calcula los factores L que dependen del colgamiento del líquido sin deslizamiento, junto al Número de Froude, se determinan los patrones de flujo con la tabla 2.2.

$$L_1 = 316 * \lambda_l^{0,302} \quad (2.27)$$

$$L_2 = 0,0009252 * \lambda_l^{-2,4684} \quad (2.28)$$

$$L_3 = 0,1 * \lambda_l^{-1,4516} \quad (2.29)$$

$$L_4 = 0,5 * \lambda_l^{-6,738} \quad (2.30)$$

TABLA 2.2. FACTORES PARA DETERMINAR LOS PATRONES DE FLUJO

Patrón de Flujo	Límites
Distribuido	$\lambda_l < 0,4$ y $N_{FR} \geq L_1$
	$\lambda_l \geq 0,4$ y $N_{FR} > L_4$
Intermitente	$0,01 \leq \lambda_l < 0,4$ y $L_3 < N_{FR} \leq L_1$
	$\lambda_l \geq 0,4$ y $L_3 < N_{FR} \leq L_4$
Segregado	$\lambda_l < 0,01$ y $N_{FR} < L_1$
	$\lambda_l \geq 0,01$ y $N_{FR} < L_2$
Transitorio	$\lambda_l \geq 0,01$ y $L_2 < N_{FR} \leq L_3$

Fuente: Flujo multifásico en tuberías, Pazmiño Jorge, 1989.

- c. Se calcula la fracción de líquido retenido (hold up), correspondiente al tipo de patrón de flujo determinado anteriormente.

Distribuido:
$$H_l = \frac{1.065 \lambda_l^{0.5824}}{N_{FR}^{0.0609}} \quad (2.31)$$

Intermitente:
$$H_l = \frac{0.845 \lambda_l^{0.5331}}{N_{FR}^{0.0173}} \quad (2.32)$$

Segregado:
$$H_l = \frac{0.98 \lambda_l^{0.4846}}{N_{FR}^{0.0868}} \quad (2.33)$$

Transición:
$$H_l = A * H_{l(\text{segregado})} + (1 - A) * H_{l(\text{intermitente})} \quad (2.34)$$

$$A = \frac{L_3 - N_{FR}}{L_3 - L_2} \quad (2.35)$$

2.4.2. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN

Una vez determinado el patrón de flujo y el líquido retenido, se calcula las pérdidas de presión por aceleración, elevación y fricción por separado, ya que cada una involucra diferentes consideraciones, los pasos a seguir para el cálculo del gradiente de presión son los siguientes:

- a. Se calcula el gradiente de presión por fricción:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{fricc.} = \frac{1}{144} \left(\frac{f_{tp} * \rho_m * v_m^2}{2 * g_c * d_i} \right) \left[\frac{psi}{ft} \right] \quad (2.36)$$

El factor de fricción de las dos fases se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{tp} = f_{ns} * e^S \quad (2.37)$$

A su vez la ecuación 2.37 depende de:

$$N_{Re} = 1.488 * \frac{\rho_m * v_m * d_i}{\mu_m} \quad (2.38)$$

$$f_{ns} = \left[2 * \text{Log} \left(\frac{N_{Re}}{4.5223 * \text{Log}(N_{Re}) - 3.8215} \right) \right]^{-2} \quad (2.39)$$

$$S = \frac{Y}{-0.0523 + 3.18Y - 0.87Y^2 + 0.01853Y^4} \quad (2.40)$$

$$Y = Ln \frac{\lambda_l}{H_l^2} \quad (2.41)$$

Hay que tomar en cuenta que si Y esta entre, $1 < Y < 1,2$, se toma la siguiente expresión:

$$S = Ln(2.2Y - 1.2) \quad (2.42)$$

b. Luego se procede a calcular el gradiente de presión por aceleración:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{accel.} = \frac{1}{144} \left(\frac{\rho_s * \Delta v_m^2}{2 * g_c * \Delta L} \right) \left[\frac{psi}{ft} \right] \quad (2.43)$$

c. Finalmente se calcula el gradiente de presión por elevación, teniendo en cuenta si existe elevaciones considerables que puedan afectar al cálculo:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{elev.} = \frac{1}{144} \left(\frac{g * \rho_s * sen \theta}{g_c} \right) \left[\frac{psi}{ft} \right] \quad (2.44)$$

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS POR MEDIO DEL SOFTWARE EN LA LÍNEA DE FLUJO

3.1. METODOLOGÍA

Olga es un simulador dinámico de flujo de petróleo, agua, gas y sólidos, el cual permite el manejo de redes de tuberías y equipos de proceso, contiene modelos completos con transiciones entre los regímenes de flujo, fue desarrollado con una solución numérica semi-implícita, el éxito de la simulación radica en la calidad de los datos que ingresan al simulador.

Las características del software son las siguientes:

- Tiene un modelo de flujo trifásico unidireccional en estado transitorio.
- Se basa en una formulación de tres campos es decir; la película de líquido, el gas y gotas de líquido dispersas en la fase gaseosa.
- El simulador resuelve las ecuaciones de conservación de masa, conservación de momento, conservación de energía, etc.
- Se supone que existe equilibrio térmico entre las fases, por esto se tiene sólo una ecuación de conservación de energía.
- Se considera que la tubería es completamente rígida.

Los modelos de simulación se desarrollan a partir del sistema que se va analizar, planteando las características importantes del sistema, a continuación se explica de una manera breve los modelos con los que trabaja el software.

3.1.1. MODELOS DE SIMULACIÓN DE OLGA^{7,8}

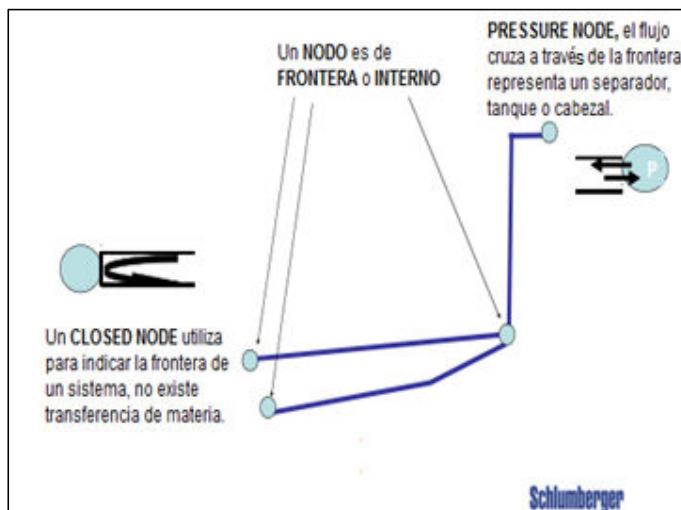
La construcción de los modelos es parte fundamental en el entorno de la simulación, una vez construidos los modelos se establece el caso base y posteriormente diversos escenarios que ayudan a comprender mejor el comportamiento del sistema, así se tiene:

3.1.1.1. Modelo gráfico

El modelo gráfico es la parte inicial dentro del simulador, aquí se construye la gráfica del sistema a ser analizado, al cual se le asignan las propiedades geométricas, propiedades de los fluidos, condiciones térmicas y ambientales, condiciones iniciales, equipos de procesos, etc.

La estructura del modelo gráfico se define mediante equipos de proceso, nodos ramales, etc. Los nodos pueden representar una frontera, división o unión de una geometría de tuberías, dependiendo del modelo a construirse se escogerán los diferentes tipos de nodos, en la figura 3.1 muestran los tipos de nodos.

FIGURA 3.1. TIPOS DE NODOS OLGA



Fuente: Aseguramiento de Flujo con Olga, Schlumberger.

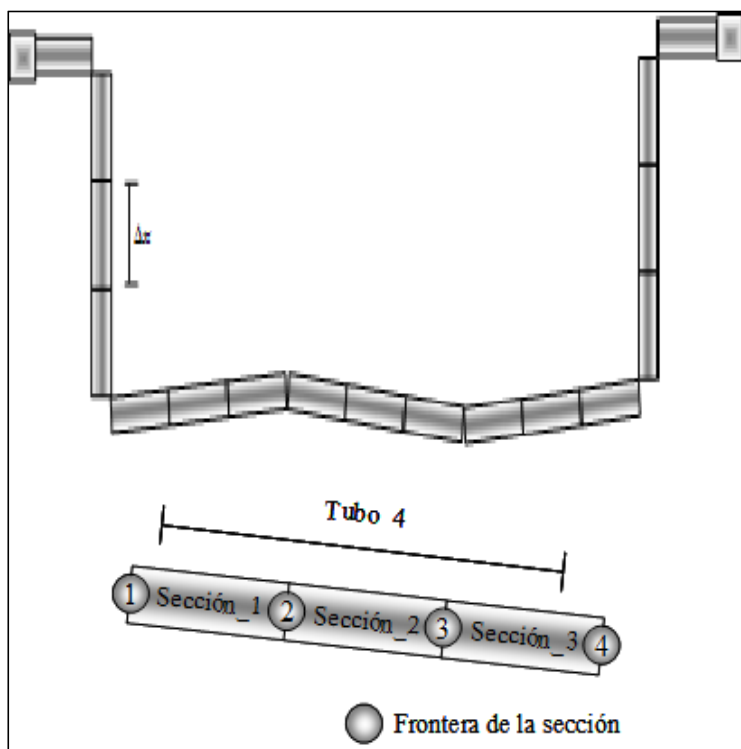
⁷ SLB, Curso y manual de generación de modelos de Olga gráfico, geométrico y transferencia de calor.

⁸ Olga Flow Assurance, Caracterización de fluidos.

3.1.1.2. Modelo geométrico

El perfil de la tubería es una parte muy importante del sistema, para llevar a cabo la simulación es necesario dividir el perfil de la tubería en tubos, los cuales son tramos de tubería de largo e inclinación definida, a su vez cada tubo debe dividirse en secciones, en la figura 3.2 se observa un modelo de tubería dividida en tubos y secciones.

FIGURA 3.2. TUBERÍA DIVIDIDA EN TUBOS Y SECCIONES



Fuente: Aseguramiento de Flujo con Olga, Schlumberger.

El modelo geométrico depende del número de coordenadas que representa al perfil ya que al tener un mayor número de puntos contribuye a obtener un modelo más preciso, requiriendo un tiempo de cómputo más largo, lo cual puede ser poco práctico, por esta razón es necesario simplificar todos los puntos que no contribuyen significativamente con la inclinación del perfil.

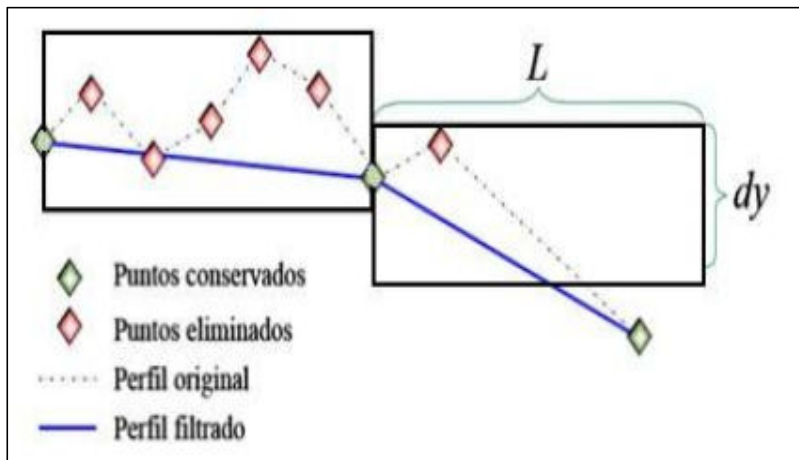
3.1.1.2.1. Filtración del perfil

Consiste en remover los puntos que no contribuyen de forma significativa con el perfil, es decir elimina el ruido que existe en la medición de los cambios de elevación.

En el proceso de filtrado es necesario seleccionar L y dy hasta obtener un resultado satisfactorio, es importante verificar que los puntos removidos no afecten al perfil de la tubería, teniendo cuidado en no perder información que puede ser de importancia durante la simulación.

Para el filtrado de la tubería se crea el perfil en el editor de geometría de Olga ingresando las coordenadas de la línea de flujo, en la figura 3.3 se observa el proceso de filtrado.

FIGURA 3.3. PROCESO DE FILTRADO



Fuente: Aseguramiento de Flujo con Olga, Schlumberger.

3.1.1.2.2. Discretización del perfil

Consiste en que cada tubo resultante de la filtración, se divide en secciones, las cuales son empleadas para realizar el cálculo numérico, cumpliendo con la siguiente regla:

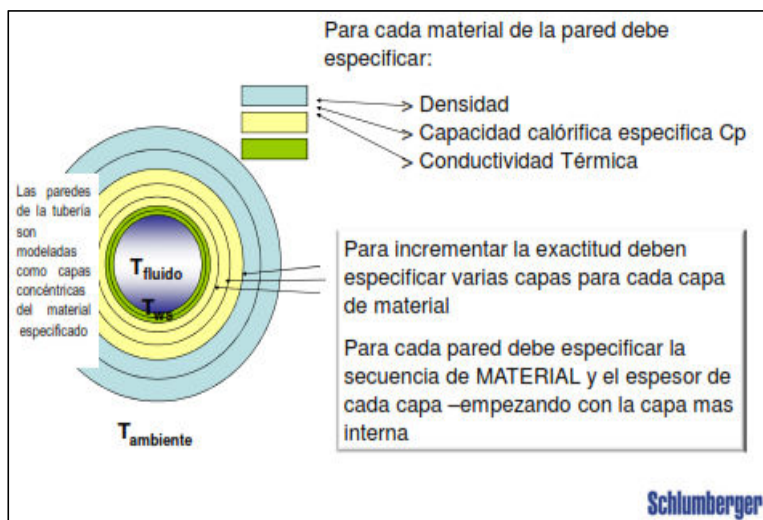
$$0.5 \leq L_{\text{segmento}^i} / L_{\text{segmento}^{i+1}} \leq 2$$

Realizada la discretización del perfil se añaden los diámetros, rugosidades y paredes que conforman la estructura la de tubería en estudio.

3.1.1.3. Modelo térmico

La disipación de energía hacia el medio ambiente se simula definiendo las paredes que rodean a la tubería, esto se establece creando las propiedades de los materiales sólidos como la densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica, para modelar la transferencia de calor por conducción, la figura 3.4 indica el comportamiento de calor que se generan en las tuberías.

FIGURA 3.4. REPRESENTACIÓN DE LAS PAREDES DE LAS TUBERÍAS

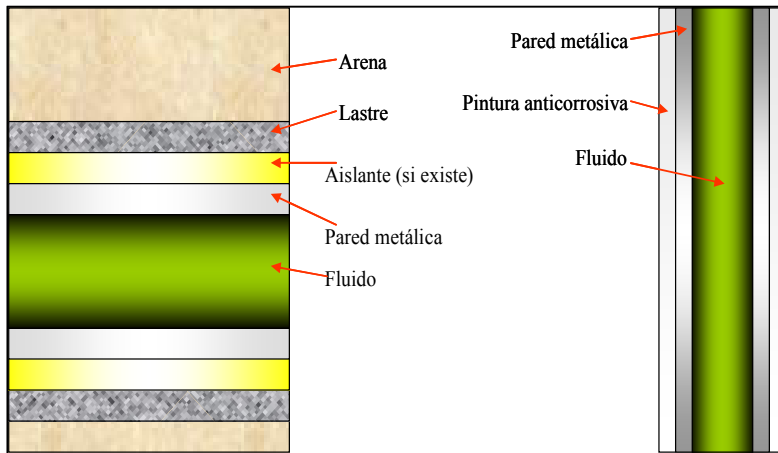


Fuente: Aseguramiento de Flujo con Olga, Schlumberger.

La configuración de la pared dependerá de donde se encuentre ubicada la tubería, la siguiente figura muestra el caso de una tubería enterrada y un riser, siendo este una tubería que conecta una estructura de producción flotante o una plataforma de perforación, son considerados las herramientas más críticas en el diseño de las plataformas marinas. (TENARIS)

La figura 3.5 muestra el proceso térmico de una tubería enterrada y un riser, las configuraciones observadas en la figura varían según las necesidades que se presenten.

FIGURA 3.5. PROCESO TÉRMICO DE TUBERÍA ENTERRADA Y UN RISER



Fuente: Aseguramiento de Flujo con Olga, Schlumberger.

Olga considera que todas las paredes son cilíndricas y concéntricas, en el caso de tuberías enterradas no se cumple esta condición, por lo cual es necesario calcular un espesor equivalente a partir de las siguientes ecuaciones:

$$H = P_{te} + \frac{D}{2} \quad (3.45)$$

$$E = D \left[\frac{2H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D} \right)^2 - 1} \right] \quad (3.46)$$

$$t_{eq} = \frac{1}{2}(E - D) \quad (3.47)$$

Donde:

H = Intervalo de profundidad.

D = Diámetro de la tubería.

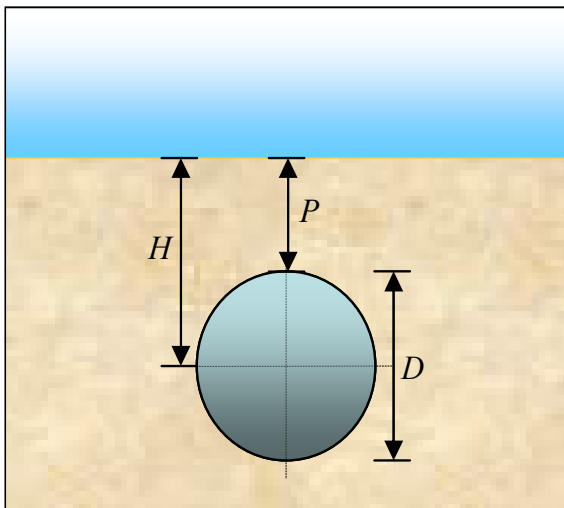
P_{te} = Profundidad de la tubería.

E = Espesor del material tomando en cuenta la tubería.

t_{eq} = Espesor equivalente.

La figura 3.6 y mediante las ecuaciones 3.45, 3.46 y 3.47 se determina el espesor equivalente de una tubería enterrada.

FIGURA 3.6. ESPESOR EQUIVALENTE DE UNA TUBERÍA ENTERRADA



Fuente: Aseguramiento de Flujo con Olga, Schlumberger.

Cuando la tubería se encuentra en contacto con el medio ambiente o algún fluido, se debe realizar el cálculo de transferencia de calor por convección, especificando si el sistema se encuentra enterrado en su totalidad, a lo largo de un ramal, un tubo o una sección, esto se realiza de igual forma en la parte térmica de Olga.

3.1.1.4. Caracterización de la composición de los fluidos

La caracterización de los fluidos se la realiza a partir de los reportes PVT, la cual se refiere a una composición representativa de los fluidos, se la efectúa por medio de un software en función de la presión y la temperatura, generando las tablas de propiedades de los fluidos.

Las etapas en la construcción de las tablas de propiedades son las siguientes:

- Definición de la composición de los fluidos.
- Definir las fracciones componentes de las mezclas.
- Establecer temperaturas y presiones.

- Definir el número de puntos en la tabla.
- Revisar las tablas y corregirlas de ser necesario.

Anteriormente se utilizaba PVTsim, actualmente se utiliza MULTIFLASH de Olga que ayuda a crear las tablas de propiedades, las cuales se componen por puntos de equilibrio, donde se calculan las propiedades de interés para la simulación, tales como:

- Densidad.
- Derivada parcial de la densidad respecto a la presión.
- Derivada parcial de la densidad respecto a la temperatura.
- Viscosidad.
- Fracción másica de gas en el petróleo.
- Capacidad calorífica.
- Entalpía.
- Conductividad térmica.
- Tensión superficial.
- Entropía.

3.1.1.5. Condiciones iniciales y variables de medición

Las condiciones iniciales son definidas por los datos de operación del sistema o a su vez pueden ser calculadas por el procesador de Olga en estado estable.

Las variables de medición son medidas y proporcionadas en tablas o en gráficas, estas últimas pueden ser representadas en gráficas de tendencia o de perfil, en Olga las variables medidas se denominan variables de frontera que son de presión y volumen, la medición de las variables puede ser realizada en todo el sistema o en una parte del mismo. El usuario debe seleccionar las variables a reportar en función del resultado que se desea obtener.

3.2. GENERACIÓN DE LOS MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA LÍNEA DE FLUJO APAIKA-EPF

Anteriormente se describió los modelos que se utilizan para la simulación, la sensibilidad de la zona donde se encuentra la línea de flujo y las características que conforman el sistema, una vez identificados cada uno de estos parámetros se construirá la estructura del sistema que ayudará a la simulación de los fluidos

3.2.1. CASO BASE

Para el estudio de este Proyecto se construirán los modelos del sistema de la siguiente manera:

El modelo gráfico Apaika-Yuturi está definido por:

- La línea principal Sistema Apaika-Yuturi (EPF).
 - Dos tuberías de 18 pulgadas. (Tramo Apaika-UAN y Tramo UAN-ECB)
 - Una tubería de 24 pulgadas. (Tramo ECB-EPF)

- La línea secundaria Nenke-Apaika.
 - Una tubería de 18 pulgadas. (Tramo Nenke-UAN)

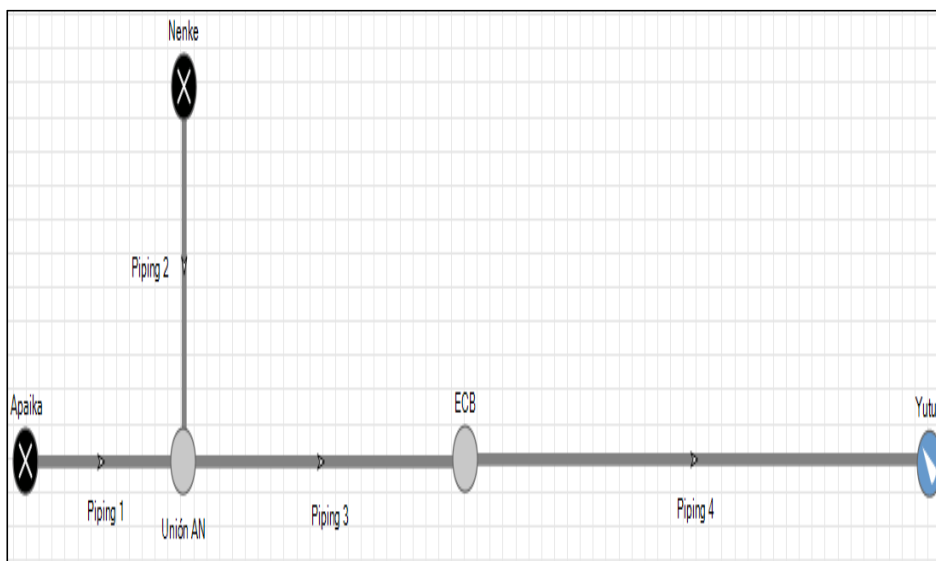
- Dos nodos cerrados.
 - Uno en Apaika
 - Uno en Nenke.

- Dos nodos internos.
 - Uno en la mezcla de los fluidos.
 - Uno en ECB.

- Un nodo de presión en Yuturi (EPF).

Una vez construido los ramales y nodos del Sistema Apaika-EPF en el simulador, se deben elaborar los perfiles de las tuberías, en la figura 3.7 se muestra la construcción del modelo gráfico:

FIGURA 3.7. MODELO GRÁFICO SISTEMA APAIKA-EPF

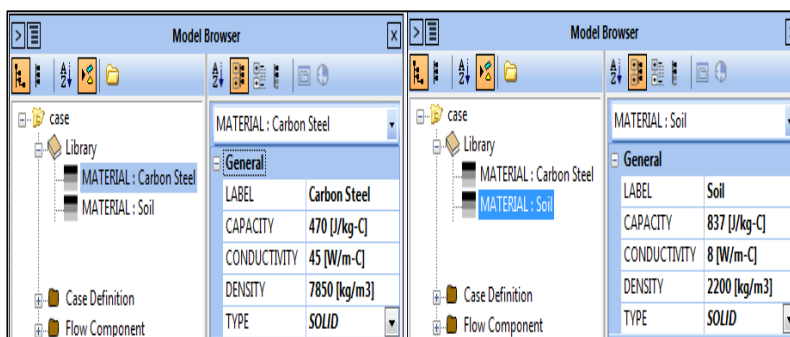


Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El modelo térmico consiste en la creación de los materiales y paredes que forman parte de la tubería para el cálculo de calor por conducción, primero se crean los materiales con las propiedades de la tabla 1.1, definiendo el acero al carbono y el suelo con sus respectivas propiedades, la figura 3.8 indica la creación de los materiales de las paredes que conforman las tuberías.

FIGURA 3.8. CREACIÓN DE LOS MATERIALES



Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Definidos los materiales, se crearon las paredes de la tubería, teniendo en cuenta que se realiza el cálculo del espesor equivalente para tuberías enterradas utilizando la tabla 1.2, a continuación se realiza el cálculo del espesor equivalente:

➤ **Tramo 1**

- Intervalo de profundidad.

$$H = P_{te} + \frac{D}{2}$$

$$H = 78.74 + \frac{18}{2}$$

$$H = 87.74 \text{ in}$$

- Espesor del material tomando en cuenta el diámetro de la tubería.

$$E = D \left[\frac{2H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D} \right)^2 - 1} \right]$$

$$E = 18 \left[\frac{2 * 87.74}{18} + \sqrt{\left(\frac{2 * 87.74}{18} \right)^2 - 1} \right]$$

$$E = 350.035 \text{ in}$$

- Espesor equivalente.

$$t_{eq} = \frac{1}{2}(E - D)$$

$$t_{eq} = \frac{1}{2}(350.035 - 18)$$

$$t_{eq} = 166.018 \text{ in}$$

➤ **Tramo 2**

- Intervalo de profundidad.

$$H = P_{te} + \frac{D}{2}$$

$$H = 78.74 + \frac{24}{2}$$

$$H = 90.74 \text{ in}$$

- Espesor del material tomando en cuenta el diámetro de la tubería.

$$E = D \left[\frac{2H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D} \right)^2 - 1} \right]$$

$$E = 24 \left[\frac{2 * 87.74}{24} + \sqrt{\left(\frac{2 * 87.74}{24} \right)^2 - 1} \right]$$

$$E = 361.367 \text{ in}$$

- Espesor equivalente.

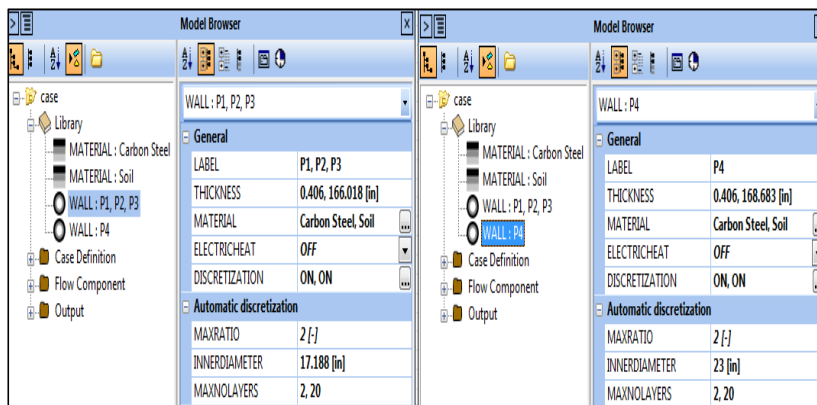
$$t_{eq} = \frac{1}{2}(E - D)$$

$$t_{eq} = \frac{1}{2}(361.367 - 24)$$

$$t_{eq} = 168.683 \text{ in}$$

Las paredes de las tuberías se generan especificando los materiales que fueron creados previamente, al igual que los espesores de cada una de ellas, la figura 3.9 indica la creación de las paredes del Sistema Apaika-EPF.

FIGURA 3.9. CREACIÓN DE LAS PAREDES DE LAS TUBERÍAS



Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

En la tabla 3.1 se observa la distribución de las paredes y el espesor equivalente de la línea de flujo del Sistema Apaika-EPF.

TABLA 3.1. ESPESOR EQUIVALENTE, SISTEMA APAIKA-EPF

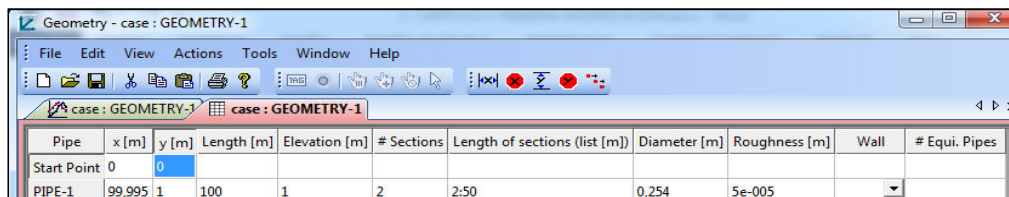
	TRAMOS	PARÁMETROS (in)		ESPESOR EQUIVALENTE (in)	Paredes
1	APAIKA a ECB	Diámetro externo	18	166.018	WALL:P1,P2,P3
2	ECB a EPF	Diámetro externo	24	168.683	WALL:P4

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El Modelo Geométrico se caracteriza por la elaboración de perfiles de las tuberías, el editor de geometría es la herramienta que permite la generación de perfiles.

El editor de geometría depende de la topográfica y el número de coordenadas que representa a cada una de ellas, una vez cargado el número de coordenadas el editor calcula la longitud y la elevación que existe entre cada punto, la figura 3.10 se observa el editor de geometría.

FIGURA 3.10. EDITOR DE GEOMETRÍA



The screenshot shows a software window titled 'Geometry - case : GEOMETRY-1'. It features a menu bar (File, Edit, View, Actions, Tools, Window, Help) and a toolbar with various icons. Below the toolbar is a data table with the following content:

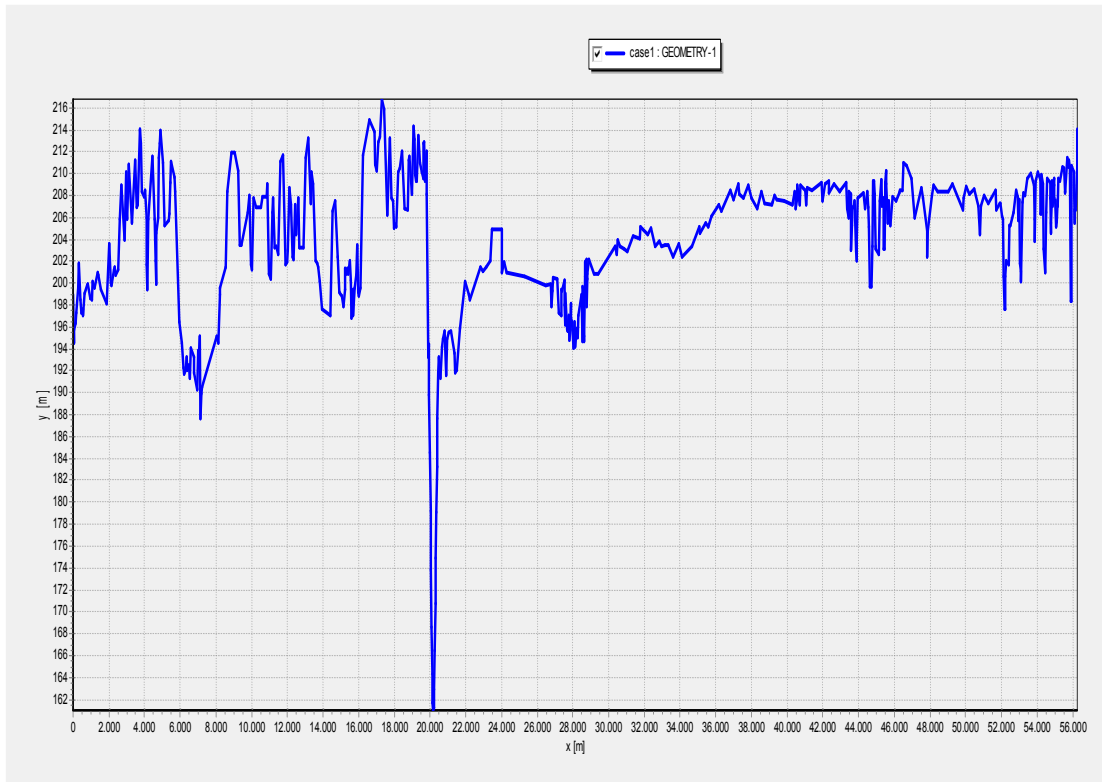
Pipe	x [m]	y [m]	Length [m]	Elevation [m]	# Sections	Length of sections (list [m])	Diameter [m]	Roughness [m]	Wall	# Equi. Pipes
Start Point	0									
PIPE-1	99,995	1	100	1	2	2:50	0,254	5e-005		

Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

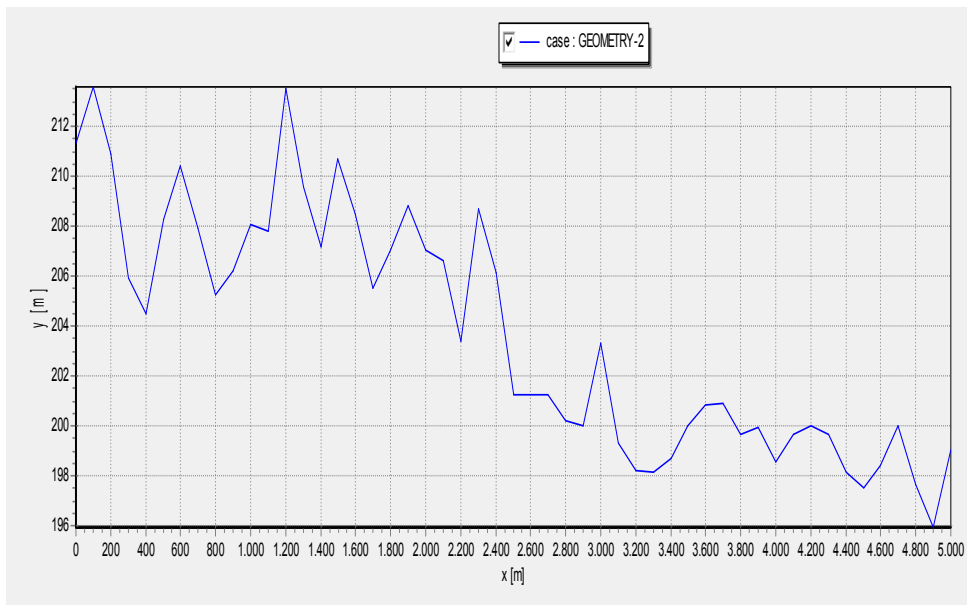
Los gráficos 1.1 y 1.2, indican los perfiles de las tuberías realizados en Excel, al crear los perfiles en el editor de geometría, permitirá cargar todos los aspectos característicos de la línea de flujo como el diámetro, rugosidad, pared de la tubería y equipos de procesos.

Además es necesario realizar la simplificación y la discretización de los perfiles, permitiendo realizar una óptima simulación, en el gráfico 3.1 y 3.2 se observan los perfiles del Sistema Apaika-EPF creados en Olga.

GRÁFICO 3.1. PERFIL SISTEMA APAIKA-EPF, OLGA

Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.2. PERFIL NENKE-APAIKA, OLGA

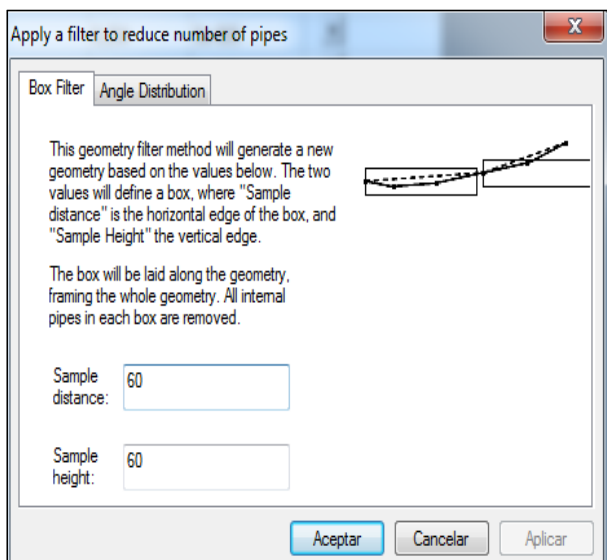
Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Al tener los perfiles de la tubería, se procede a realizar la filtración, donde se definen los lados del cuadrado L y dy , en el entorno de $Olga L$ y dy , se conocen como sample distance y sample height respectivamente.

Para el filtrado de las líneas se definió el valor de 196.85 ft (60m), como se puede apreciar en la figura 3.11.

FIGURA 3.11. VALORES DEL FILTRADO DEL SISTEMA APAIKA-EPF



Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

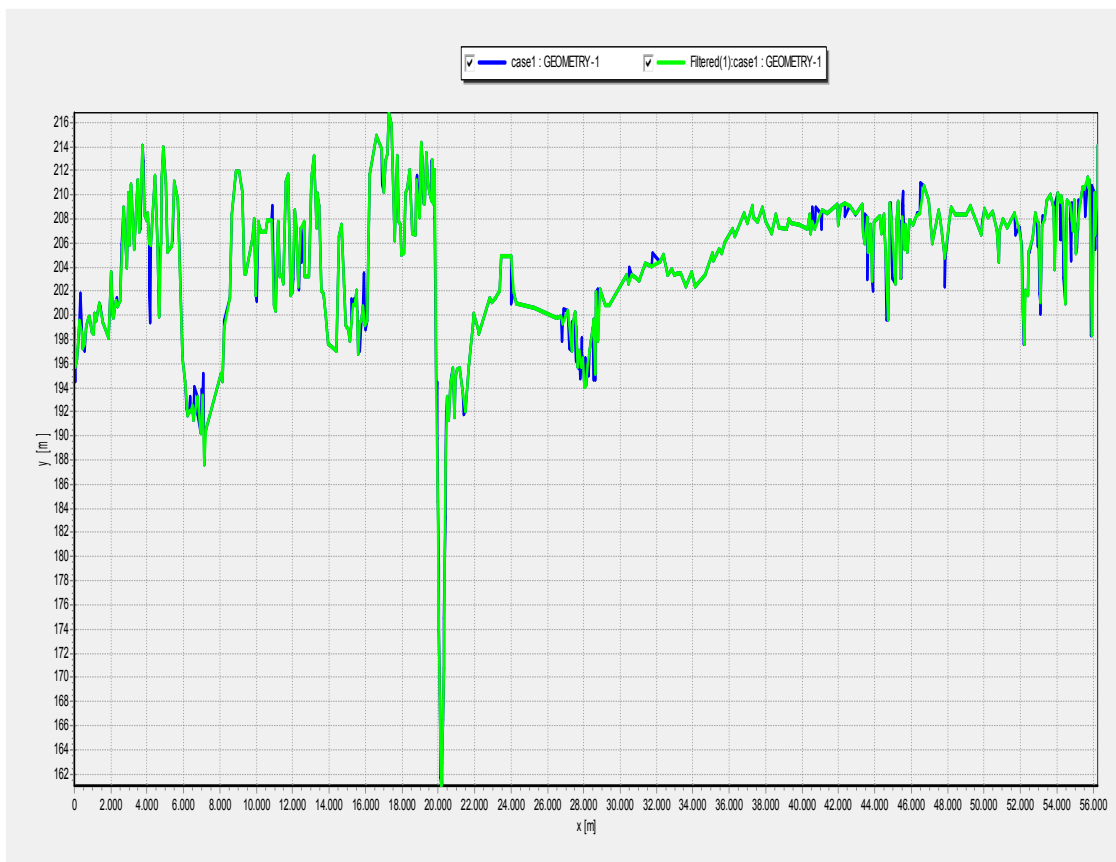
Al realizar la simplificación de la línea Nenke coincide con el perfil real, es decir que al utilizar los valores de 196.85 pie (60m) para cada lado de la caja, se conservan todos los puntos del perfil original, en el caso de Apaika el gráfico 3.3 se observa la línea de color verde que corresponde a la simplificación y en la tabla 3.2 se encuentra la comparación entre el perfil real y simplificado.

TABLA 3.2. COMPARACIÓN DEL PERFIL REAL Y SIMPLIFICADO, SISTEMA APAIKA-EPF

NÚMERO DE TUBOS	PERFIL REAL	PERFIL SIMPLIFICADO
APAIKA-EPF	513	360
NENKE-APAIKA	50	50

Fuente: OLGA.

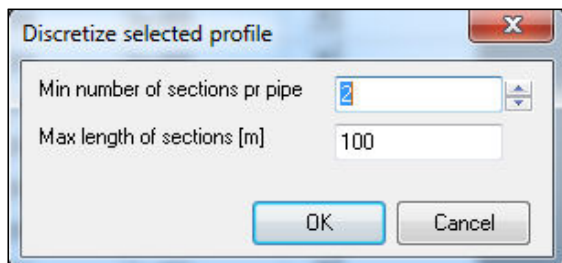
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.3. COMPARACIÓN DEL PERFIL REAL Y SIMPLIFICADO APAIKA-EPF

Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Luego se realiza la discretización del perfil, escogiendo el número de secciones para cada tubo al igual que la longitud máxima que se desea tener, en la figura 3.12 se observa la discretización de los tubos del Sistema Apaika-EPF.

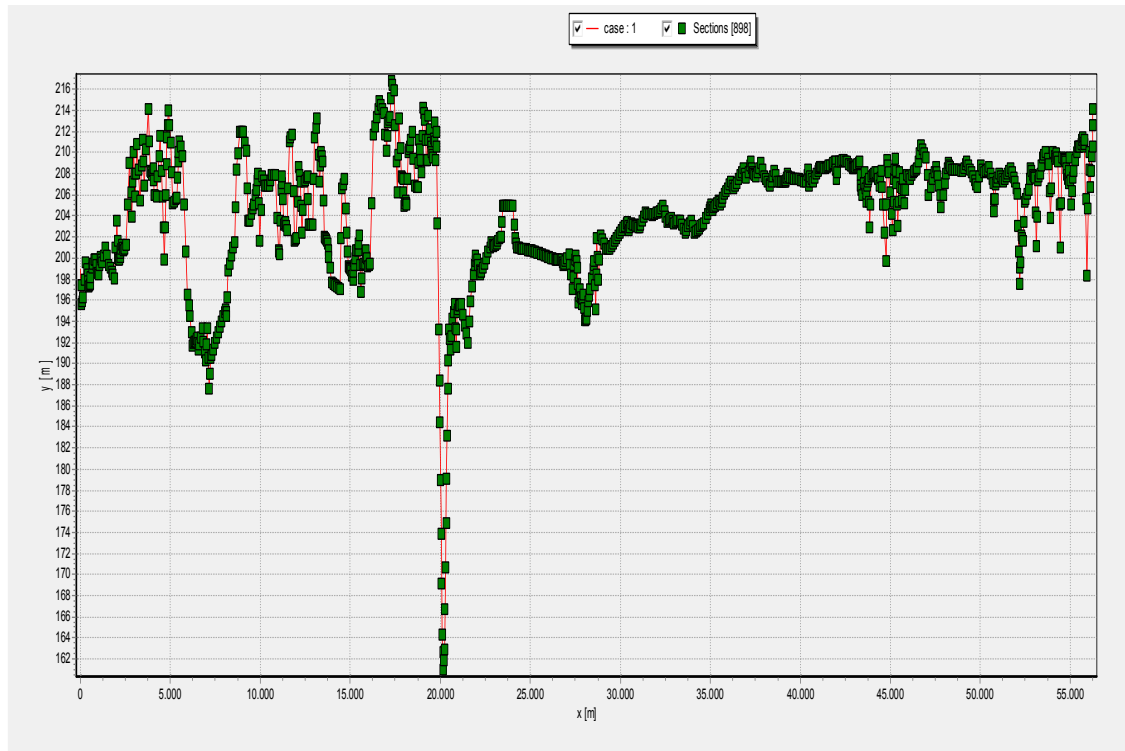
FIGURA 3.12. VALORES DE DISCRETIZACIÓN SISTEMA APAIKA-EPF

Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Los gráficos 3.4 y 3.5, se observan las discretizaciones del Sistema Apaika-EPF.

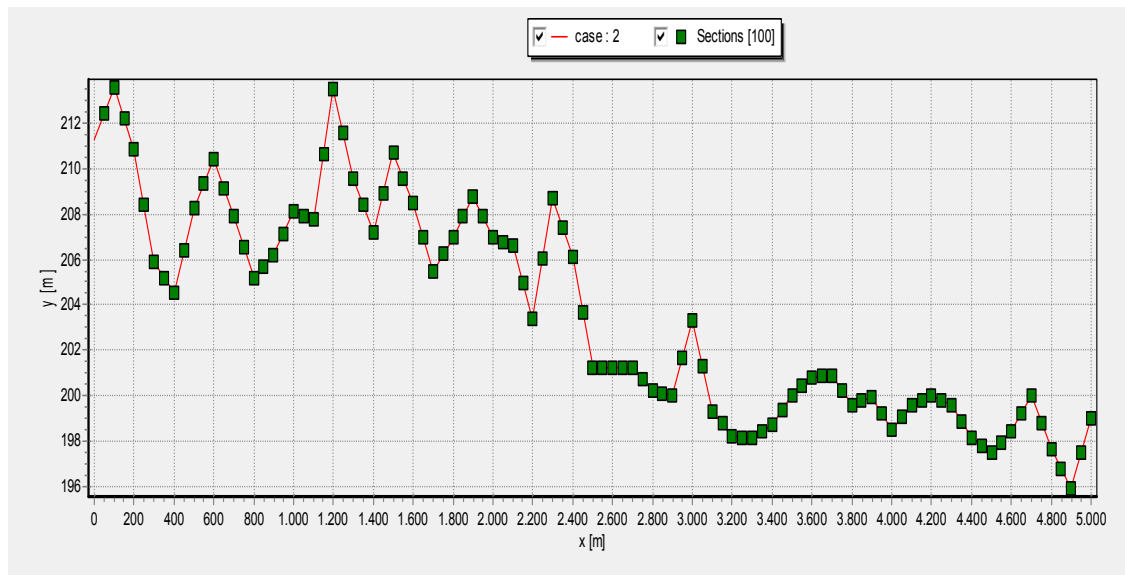
GRÁFICO 3.4. DISCRETIZACIÓN DEL PERFIL APAIKA-EPF



Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.5. DISCRETIZACIÓN DEL PERFIL NENKE-APAICA

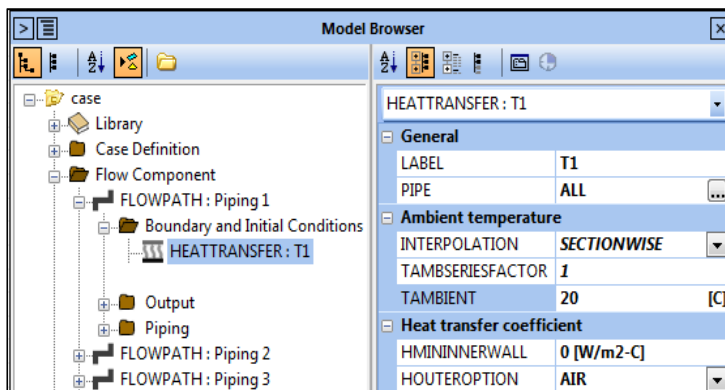


Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El cálculo de transferencia de calor por convección se lo efectúa añadiendo el Heattransfer a cada tubería existente en el modelo, la temperatura del medio ambiente de la zona es de 20°C, siendo el medio donde se disipa la energía el aire, la figura 3.13 indica la creación de la transferencia de calor del Sistema Apaika-EPF.

FIGURA 3.13. TRANSFERENCIA DE CALOR SISTEMA APAIKA-EPF

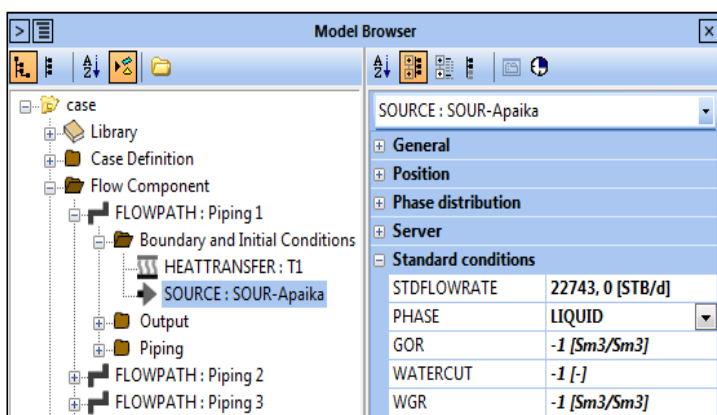


Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El caudal que se transporta se modela con una fuente de masa, la cual se coloca a la salida de cada nodo cerrado, especificando las producciones que se transportan, la figura 3.14 se observa la creación de la fuente de masa de Apaika.

FIGURA 3.14. FUENTE DE MASA DE APAIKA



Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El corte de agua y GOR se colocan en cada nodo para asegurar un resultado más preciso.

A continuación se realiza la caracterización de los fluidos, primero se define el método de cálculo que determina el equilibrio de las fases donde se escogió el método de Redlich-Kwong-Soave, luego se ingresa la composición de los fluidos, el peso molecular y la gravedad específica de la fracción pesada y se efectúa la caracterización, la figura 3.15 muestra la caracterización de los fluidos del Sistema Apaika-EPF.

FIGURA 3.15. CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUIDOS SISTEMA APAIKA-EPF

The screenshot displays the 'PVT Lab Fluid Analysis' software window. The 'Defined component data' is set to 'Infochem fluids databank (Infodata)'. The 'Single Fluid' tab is active, showing a list of components and their mole percentages. The 'Pseudocomponents' section is configured with 'Start pseudocomponents at' set to C6 and 'Number of pseudocomponents required' set to 15. The 'Molecular weight' is 350.23 and 'Specific gravity' is 0.946. The 'SARA Analysis (STO)' section shows 'Saturates' at 74.62 mass % and 'Asphaltenes(nC7)' at 0.00 mass %. The 'Total Wax Content' is 0.00 mass % and 'Water Cut (as % of total liquid)' is 0.00 volume %.

Components	mole %
NITROGEN	0,79
H2S	
CO2	0,35
METHANE	8,94
ETHANE	1,44
PROPANE	3,5
ISOBUTANE	0,93
N-BUTANE	2,98
ISOPENTANE	1,55
NEOPENTANE	
N-PENTANE	1,84
C6	3,06
METHYLCYCLOPENTANE	
BENZENE	
CYCLOHEXANE	
C7	74,62
METHYLCYCLOHEXANE	
TOLUENE	
C8	
ETHYL BENZENE	

Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Ejecutada la caracterización, se realiza la separación de las fases a 14.7 psi y 60°F, al igual que la unión de la fase caracterizada a presión de saturación y viscosidades del líquido.

La figura 3.16 indica la caracterización de los fluidos a presión de saturación y viscosidad del líquido de las propiedades de los reportes PVT del Bloque 31.

FIGURA 3.16. CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUIDOS A PRESIÓN DE SATURACIÓN Y VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO

The screenshot shows two windows from the OLGA software. The left window, titled 'Match Bubble Point / GOR Data', contains a table for 'Experimental bubble point data' with columns for '#', 'T / degF', and 'P / psi'. The right window, titled 'Match Viscosity Data', shows 'Phase' set to 'LIQUID1' and 'Data type' set to 'Total fluid viscosity'. It contains a table for 'Experimental data' with columns for '#', 'T / degF', 'P / psi', and 'Viscosity / cP'.

#	T / degF	P / psi	Viscosity / cP
1	185	867	19.63
2	185	520	18.71
3	185	408	19.99
4	185	311	20.97
5	185	215	21.95
6	185	130	22.92
7	185	86	23.89
8	185	15	32.78
9			
10			

Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Por último se genera la tabla de propiedades, la cual es manejada por Olga, se crean definiendo intervalos de presión y temperatura que definen al sistema Apaika-EPF, la figura 3.17 se observa la creación de la tabla de propiedades de los fluidos caracterizados.

FIGURA 3.17. TABLA DE PROPIEDADES FLUIDOS DEL SISTEMA APAIKA-EPF

The screenshot shows the 'OLGA Table' dialog box. It includes fields for 'File Name' (ms Apaika completo\Fluidos\Apaika M1.tbl), 'Fluid Id (optional)' (Tabla fluidos Apaika M1), and checkboxes for 'Hydrate formation' and 'Wax formation'. The 'Equidistant Points' section contains a table for defining pressure and temperature intervals.

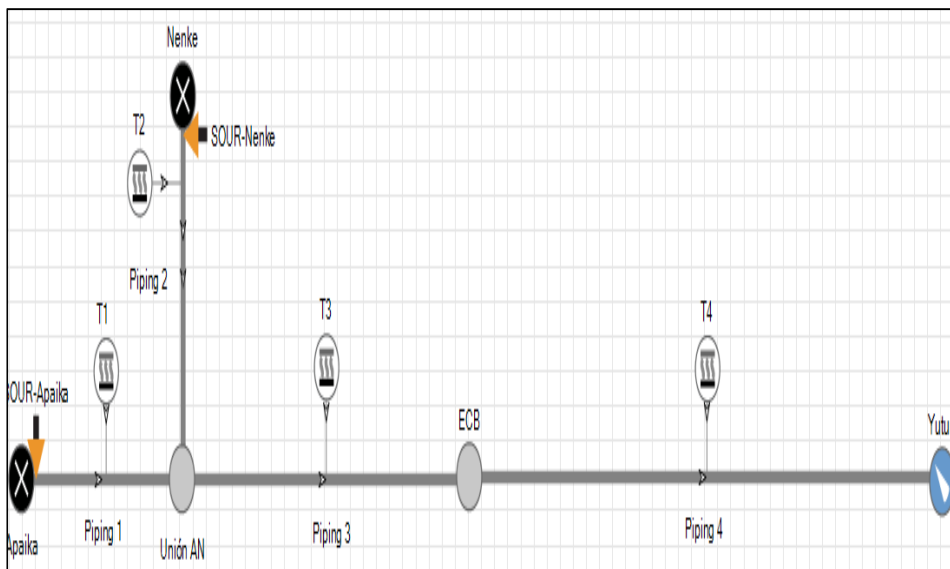
	Pressure / psi	Temperature / degF
Starting Point	14,7	60
Step in Table	13	2,6
Finishing Point	651,7	187,4
No. of Points	50	50

Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El modelo final del Sistema de producción Apaika-EPF, está representado por la figura 3.18, donde se efectuará la simulación.

FIGURA 3.18. MODELO DE PRODUCCIÓN DEL SISTEMA APAIKA-EPF



Fuente: OLGA.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

3.2.1.1. Validación y Verificación del Modelo de Simulación

Para validar y verificar el modelo de simulación se considera los valores reportados en campo y las variables que calcula el simulador, el error entre estas dos consideraciones debe ser menor al 10 por ciento, a continuación en la tabla 3.3 se tiene la validación y verificación del Sistema Apaika-EPF:

TABLA 3.3. VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN SISTEMA APAIKA-EPF.

VARIABLES	PRESIÓN (psig)		TEMPERATURA (°F)	CAUDAL (stb/d)	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	ENTRADA	SALIDA
CAMPO	592.00	500.00	150.00	22743.00	28284.00
OLGA	578.80	501.10	149.74	22632.60	28645.80
ERROR (%)	2.23	0.22	0.17	0.49	1.28

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

3.3. SIMULACIÓN DE LA LÍNEA DE FLUJO APAIKA-EPF

Un punto muy importante en el Sistema Apaika-EPF es considerar que se trabaja con una presión de descarga mayor a la presión de saturación, como se indica en la tabla 1.8.

Establecido el modelo matemático y el caso base en el simulador Olga, se desarrollan las simulaciones de la línea de flujo, obteniendo los resultados que ayudan a comprender el sistema Apaika-EPF, y a partir de estos se establecerán casos para mejorar el transporte de los fluidos.

3.3.1. MÉTODO BEGGS Y BRILL

El método de Beggs y Brill requiere calcular las variables características del fluido transportado, a continuación se desarrollan dos criterios para aplicar Beggs y Brill:

3.3.1.1. Flujo monofásico

Este caso representa las condiciones actuales de operación del Sistema Apaika-EPF, la fase líquida es la que representa el transporte de los fluidos bajo estas condiciones, los resultados del flujo monofásico se observan en la tabla 3.4 y tabla 3.5.

TABLA 3.4. PARÁMETROS CALCULADOS DEL FLUJO MONOFÁSICO, SISTEMA APAIKA-EPF.

PARÁMETROS CALCULADOS	TRAMOS		UNIDADES
	A-UAN	N-A	
TRAMOS	1	2	
Q_l	1.478	0.360	ft ³ /s
V_m	0.917	0.223	ft/s
ρ_o	59.191	59.066	lbm/ft ³
ρ_w	62.372	62.372	lbm/ft ³
ρ_l	61.035	60.604	lbm/ft ³
ρ_m	61.035	60.604	lbm/ft ³
μ_l	8.442	37.894	cp
μ_m	8.442	37.894	cp

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

TABLA 3.5. PARÁMETROS CALCULADOS DE LA MEZCLA, FLUJO MONOFÁSICO, SISTEMA APAIKA-EPF

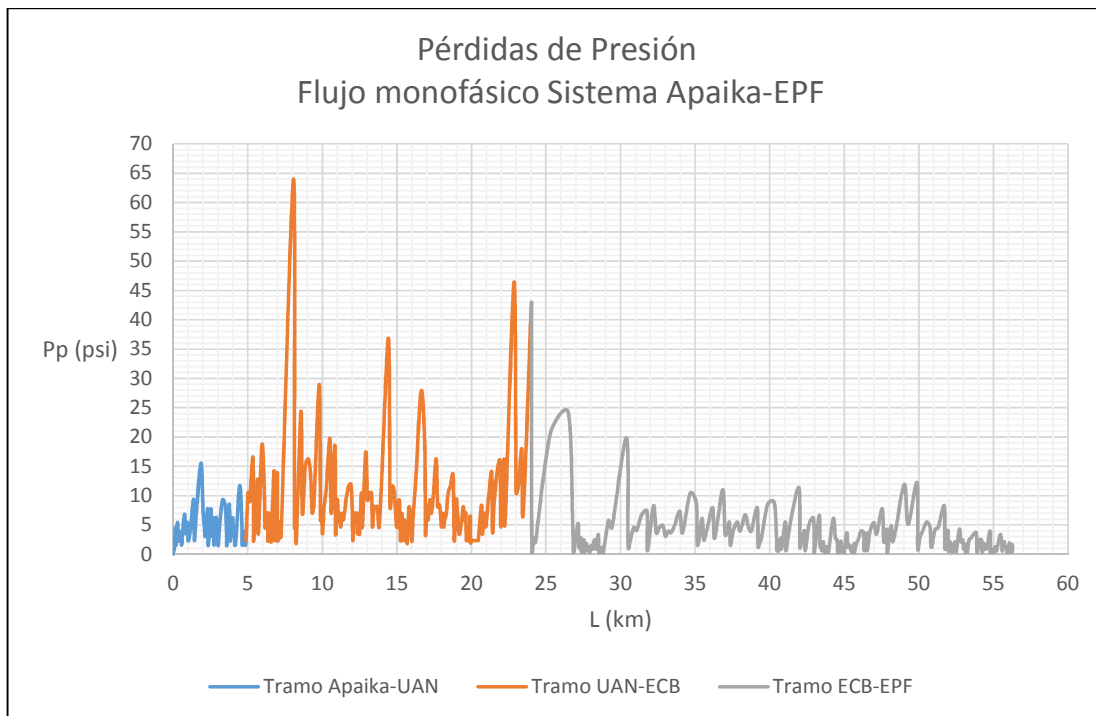
MEZCLA			
PARÁMETROS	TRAMOS		UNIDADES
CALCULADOS	UAN-ECB	ECB-EPF	
TRAMOS	3	4	
Q_l	1.838		ft ³ /s
V_m	1.141	0.637	ft/s
ρ_o	59.129		lbm/ft ³
ρ_w	62.372		lbm/ft ³
ρ_l	60.936		lbm/ft ³
ρ_m	60.936		lbm/ft ³
μ_l	9.281		cp
μ_m	9.281		cp

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

La gráfica 3.6 se observa las pérdidas de presión para flujo monofásico del Sistema Apaika-EPF.

GRÁFICO 3.6. PÉRDIDAS DE PRESIÓN FLUJO MONOFÁSICO SISTEMA APAIKA-EPF



Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

3.3.1.2. Análisis del Método de Beggs y Brill: Flujo monofásico

El gráfico 3.6, permite apreciar las pérdidas de presión que se originan en la línea de flujo, las pérdidas generadas oscilan en el rango de 0 a 25 psi, existen algunas oscilaciones donde las pérdidas sobrepasan los 25 psi, esto se debe a que algunos tramos de la tubería tienen una gran longitud y las pérdidas por aceleración son mayores en estos tramos, al trabajar en flujo monofásico las pérdidas son menores.

Cuando los fluidos del Sistema Apaika-EPF se encuentren en flujo multifásico, la fase gaseosa induce una aceleración continua a la fase líquida, provocando un aumento en las velocidades de las fases y el incremento en las pérdidas de energía.

3.3.1.3. Caso especial, considerando el transporte de dos fases

Este caso representa el transporte de los fluidos en flujo bifásico, caso que puede presentarse debido a que el gas disuelto se encuentra ahora como fase presente en la tubería, debido a la disminución de la presión y temperatura del sistema, en la tabla 3.6 y tabla 3.7, se observan los datos de producción y factores que definen a la composición de los fluidos transportados en dos fases por los tramos de Apaika-EPF:

TABLA 3.6. PARÁMETROS CALCULADOS FLUJO BIFÁSICO, SISTEMA APAIKA-EPF

PARÁMETROS	TRAMOS		UNIDADES
	A-UAN	N-A	
TRAMOS	1	2	
Q_l	1.478	0.360	ft ³ /s
Q_g	4.861	2.072	ft ³ /s
V_m	3.934	1.509	ft/s
ρ_o	59.191	59.066	lbm/ft ³
ρ_w	62.372	62.372	lbm/ft ³
ρ_g	0.094	0.065	lbm/ft ³
ρ_l	61.035	60.604	lbm/ft ³
λ_l	0.233	0.148	

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

TABLA 3.6. CONTINUACIÓN

PARÁMETROS CALCULADOS	TRAMOS		UNIDADES
	A-UAN	N-A	
TRAMOS	1	2	
λ_g	0.767	0.852	
ρ_m	14.303	9.030	lbm/ft ³
μ_l	8.442	37.894	cp
μ_m	1.978	5.622	cp
N_{FR}	0.336	0.049	
L_1	203.572	177.489	
L_2	0.034	0.103	
L_3	0.828	1.600	
L_4	9114.284	194195.066	

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

TABLA 3.7. PARÁMETROS CALCULADOS FLUJO BIFÁSICO MEZCLA DE LOS FLUIDOS SISTEMA APAIKA-EPF

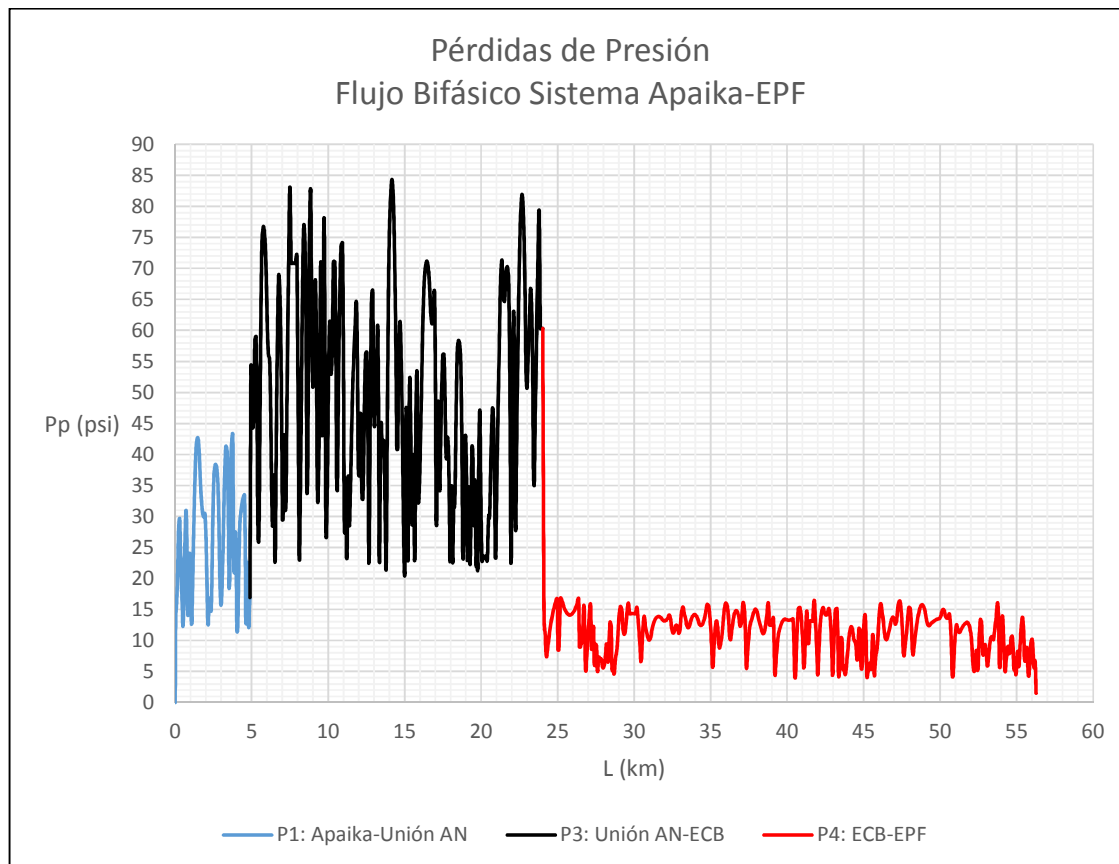
PARÁMETROS CALCULADOS	TRAMOS		UNIDADES
	UAN-ECB	ECB-EPF	
TRAMOS	3	4	
Q_l	1.838		ft ³ /s
Q_g	6.933		ft ³ /s
V_m	5.443	3.040	ft/s
ρ_o	59.129		lbm/ft ³
ρ_w	62.372		lbm/ft ³
ρ_g	0.094		lbm/ft ³
ρ_l	60.936		lbm/ft ³
λ_l	0.210		
λ_g	0.790		
ρ_m	12.844		lbm/ft ³
μ_l	9.281		cp
μ_m	1.955		cp
N_{FR}	0.642	0.150	
L_1	197.119		
L_2	0.044		
L_3	0.966		
L_4	18700.995		

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Las pérdidas de presión de flujo bifásico se observa en la tabla 3.7.

GRÁFICO 3.7. PÉRDIDAS DE PRESIÓN FLUJO BIFÁSICO SISTEMA APAIKA-EPF



Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Al trabajar en flujo bifásico ya se presentan regímenes de flujo y colgamientos, en la tabla 3.8 se observan las características que definen las velocidades de los fluidos.

TABLA 3.8. COLGAMIENTO CON Y SIN RESBALAMIENTO Y REGÍMENES DE FLUJO, FLUJO BIFÁSICO SISTEMA APAIKA-EPF

TRAMOS	REGÍMEN DE FLUJO	H_l	H_g	λ_l
TRAMO 1: APAIKA-UNIÓN AN	Transitorio	0.480	0.520	0.233
TRAMO 3: UNIÓN-ECB	Transitorio	0.408	0.592	0.210
TRAMO 4: ECB-EPF	Transitorio	0.523	0.477	0.210

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

3.3.1.4. Análisis del Método de Beggs y Brill: Flujo bifásico

Las tablas 3.6 y 3.7 indican los valores que definen al flujo bifásico, siendo los principales factores que afectan a las variables del método de Beggs y Brill. El cálculo del factor L, junto al Número de Froude y el colgamiento del líquido sin deslizamiento, permitieron predecir qué tipo de régimen de flujo y colgamiento se puede presentar a lo largo de cada tramo de la tubería, los resultados se observan en la tabla 3.8.

El colgamiento del líquido a lo largo del sistema principal se encuentra casi en equilibrio, el tipo de flujo que predomina en el sistema es transitorio, este parámetro obedece a las condiciones de producción y las velocidades de las fases que infieren en los límites de cada sección que conforma la tubería, hay que tener en cuenta que dichas condiciones varían con el tiempo.

Al depender principalmente de los caudales y las velocidades de las fases, se supone que el tipo de flujo y colgamiento es idéntico para cada tramo, en la realidad lo anterior mente supuesto no es cierto, debido a que cada sección de la tubería puede presentar distintos tipos de flujo y colgamientos, originados por cambios graduales en las secciones de la tubería y del aumento de las velocidades de las fases.

El gráfico 3.7 indica las pérdidas de presión para flujo bifásico, hay que tener muy en cuenta que cuando el sistema alcance estas condiciones, las pérdidas de presión van a incrementar, como se manifestó anteriormente esto se debe a que la fase gaseosa induce una aceleración continua a la fase líquida, provocando un aumento en las velocidades de las fases y el incremento en las pérdidas de energía, así para el tramo P₁ las variaciones de presión varían en el rango 11 psi y 44 psi, en el tramo P₃ varían entre 20 psi y 82 psi y en el tramo P₄ varían entre 5 psi y 17 psi.

Las longitudes de gran magnitud de cada sección afectaron en el cálculo de las pérdidas de presiones por aceleración, lo que se hizo para obtener valores que se

ajusten al sistema fue en dividir en subsecciones de valores más pequeños, las pérdidas varían considerablemente de tramo a tramo.

Los cálculos relacionados con las pérdidas de presión, colgamientos se observan en el anexo 1 y 2.

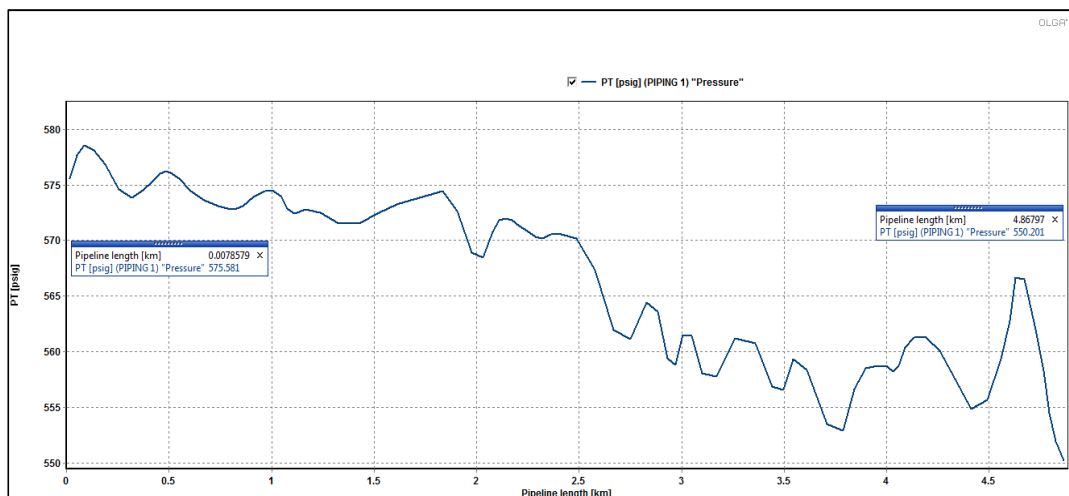
Una vez realizados los cálculos que determinan las pérdidas de presión aplicando las correlaciones matemáticas, luego se realizarán las simulaciones de los dos casos más importantes del Sistema Apaika-EPF, en flujo monofásico (condiciones actuales de operación) y en flujo multifásico (caso supuesto).

3.3.2. SIMULACIÓN CASO BASE SISTEMA APAIKA-EPF

La simulación del caso base para el Sistema Apaika-EPF se realizó durante 24 horas, tiempo en el cual el sistema alcanza el estado estable y las variables de presión, temperatura y caudales permanecen constantes, a continuación se observan los resultados de la simulación, teniendo en cuenta que los resultados más importantes son los obtenidos en los tramos 3 y 4, los cuales transportan la producción total del Bloque 31.

Los gráficos 3.8, 3.9 y 3.10, indica los perfiles de presión de los tramos del Sistema Apaika-EPF.

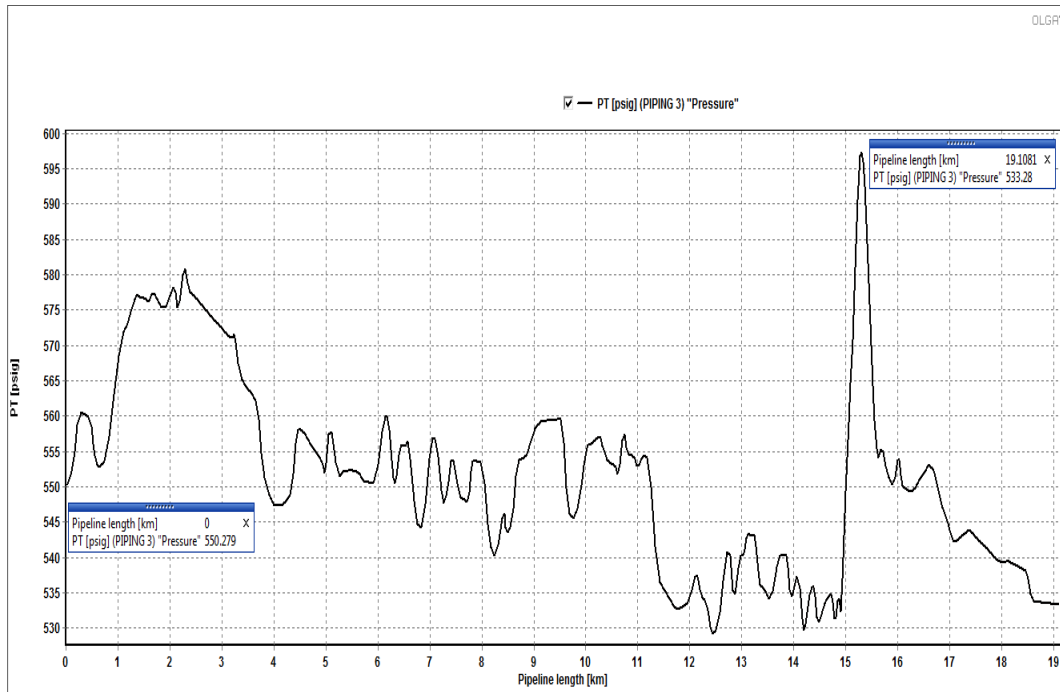
GRÁFICO 3.8. PERFIL DE PRESIÓN DE P₁, APAIKA-UNIÓN AN, FLUJO MONOFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

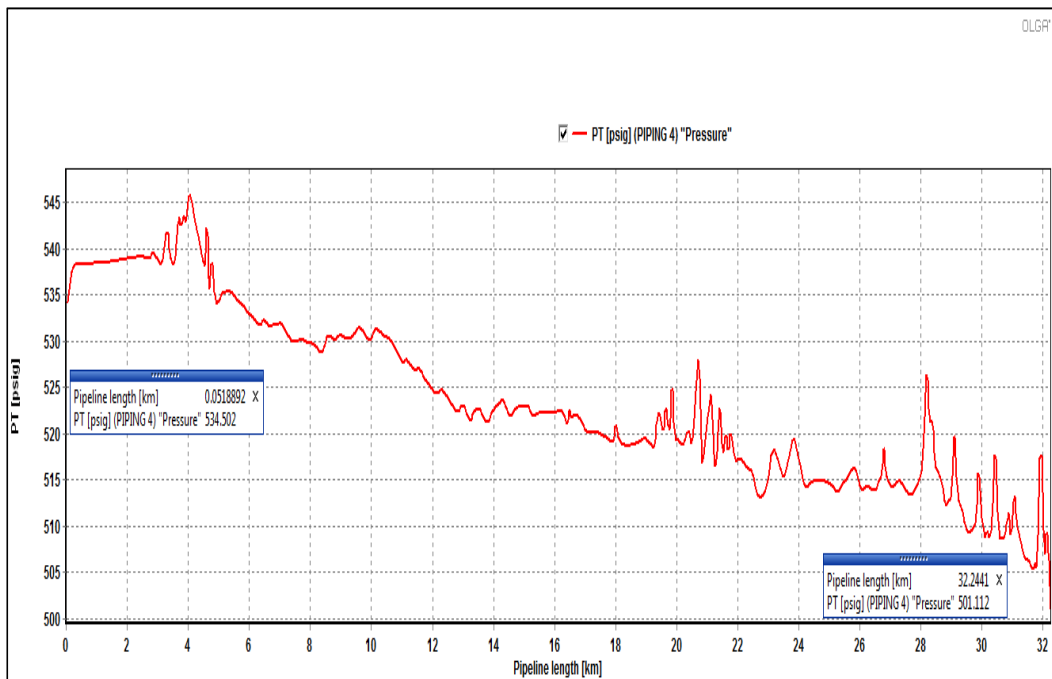
GRÁFICO 3.9. PERFIL DE PRESIÓN DE P₃, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MONOFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.10. PERFIL DE PRESIÓN DE P₄, ECB-EPF, FLUJO MONOFÁSICO



Fuente: Olga.

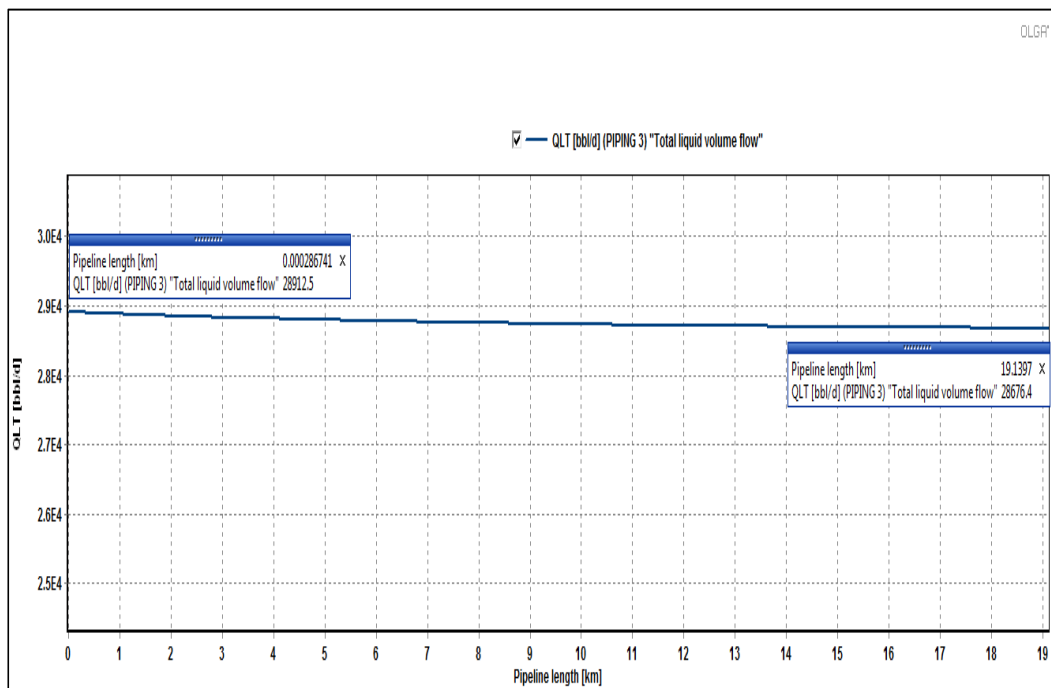
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

En el gráfico 3.8 se determina la presión de descarga en la bomba multifásica con la cual se valida y se verifica el modelo de simulación siendo esta 576 psig, de igual forma dicha presión es la necesaria para que los fluidos producidos lleguen hasta EPF.

El gráfico 3.9 se observa que existen algunos tramos donde la variación presión es grande, debido a la longitud de algunas secciones de la tubería, el tramo P₄ que corresponde al gráfico 3.10 no indica valores considerables en las variaciones de presión siendo 33 psig la variación de presión de los 32 km.

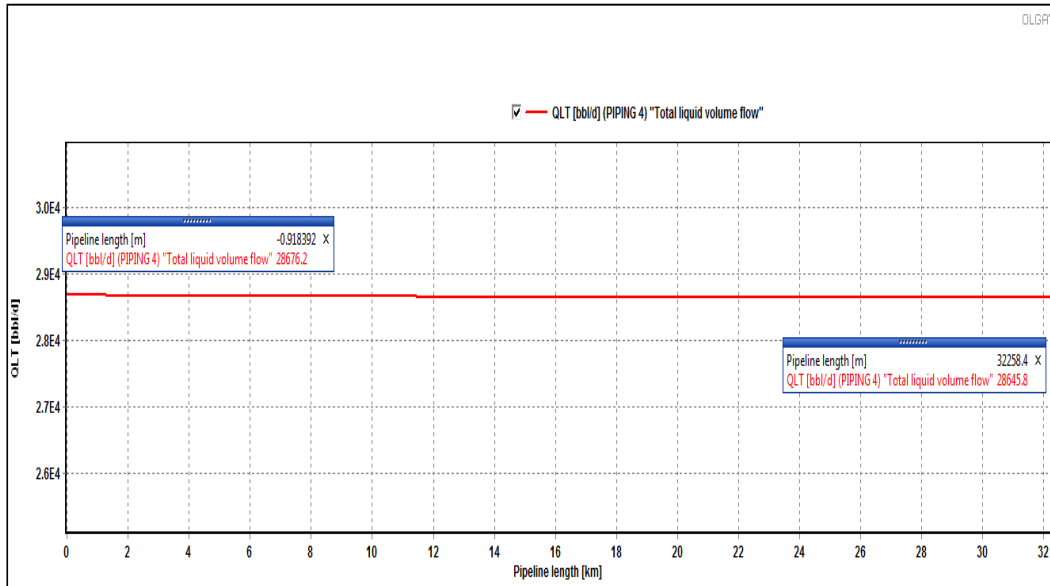
Los gráfico 3.11 y el gráfico 3.12 indican los perfiles de caudales de los tramos P₃ y P₄ del Sistema Apaika-EPF.

GRÁFICO 3.11. PERFIL DE CAUDAL DE P₃, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MONOFÁSICO



Fuente: Olga.

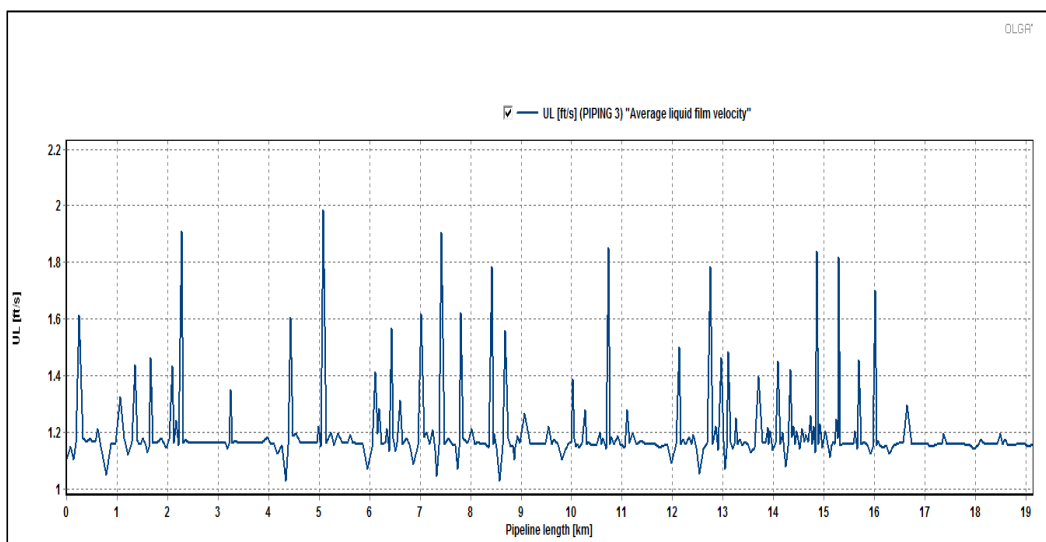
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.12. PERFIL DE CAUDAL DE P₄, ECB-EPF, FLUJO MONOFÁSICO

Fuente: Olga.

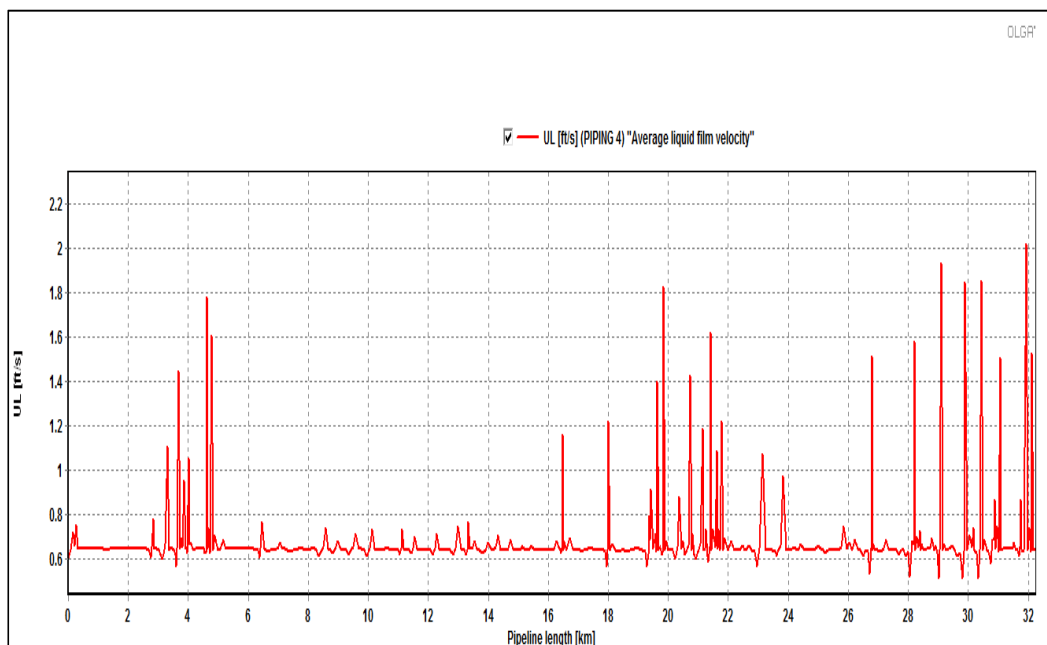
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Los gráficos 3.11 y 3.12 muestran la producción de líquido total del Bloque 31 la cual permanece constante desde que el fluido de Apaika y Nenke se mezclan, hasta llegar a EPF, sin evidenciarse pérdidas considerables del fluido. Los gráficos 3.13 y 3.14 indican los perfiles de velocidad.

GRÁFICO 3.13. PERFIL DE VELOCIDAD DE P₃, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MONOFÁSICO

Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.14. PERFIL DE VELOCIDAD DE P₄, ECB-EPF, FLUJO MONOFÁSICO

Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

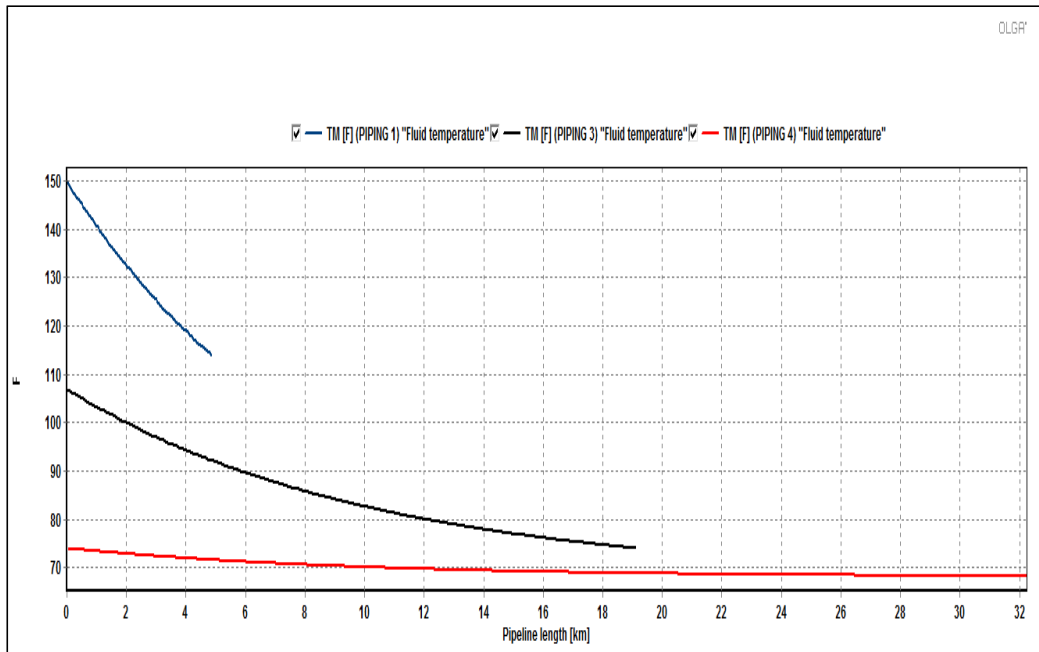
El gráfico 3.13 representa al tramo P₃ donde los fluidos se mezclan, la velocidad oscila entre 1.06 ft/s y 2 ft/s, a partir del kilómetro 16 tomado desde la unión de los fluidos, la velocidad se estabiliza en 1.09 ft/s hasta su llegada a ECB.

El gráfico 3.14 representa al tramo P₄, a la salida de ECB la velocidad del fluido es de 0.6 ft/s, la cual permanece constante en algunas secciones, siendo 11 km la longitud donde la velocidad es más estable, se observa tres secciones bien definidas donde la velocidad varía entre 0.6 ft/s y 2 ft/s hasta llegar a EPF.

Las variaciones de velocidad que se pueden observar en los gráficos 3.13 y 3.14 se dan por el perfil topográfico y el diámetro de la tubería.

Los gráficos 3.15 y 3.16 se indican los perfiles de temperaturas y regímenes de flujo del Sistema Apaika-EPF.

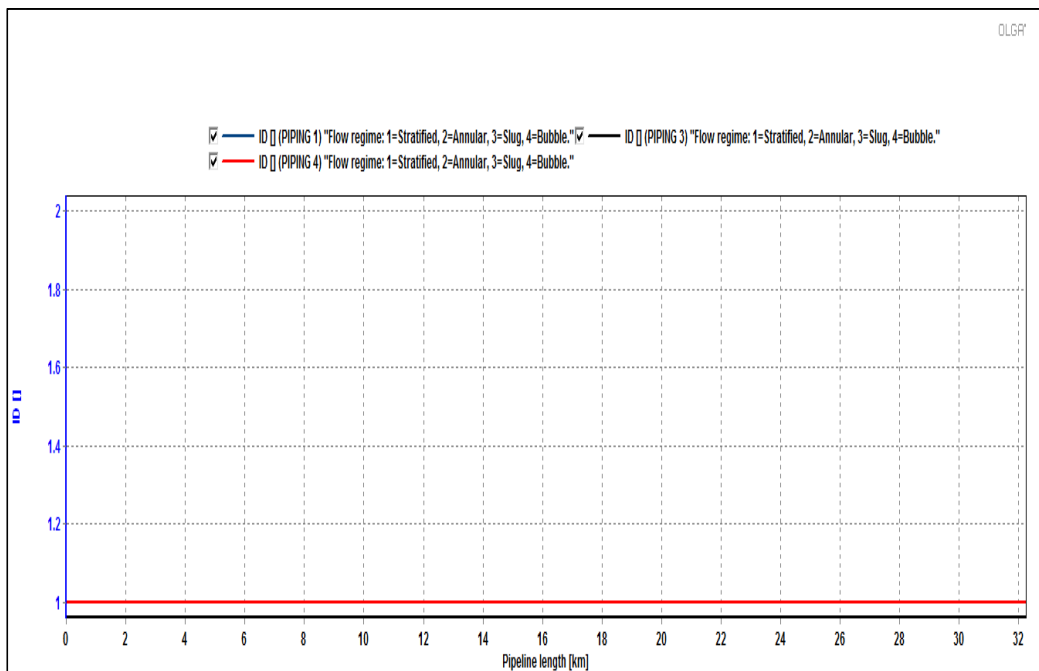
GRÁFICO 3.15. PERFIL DE TEMPERATURAS SISTEMA APAIKA-EPF, FLUJO MONOFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.16. PATRÓN DE FLUJO SISTEMA APAIKA-EPF, FLUJO MONOFÁSICO



Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El gráfico 3.15 se observan los perfiles de temperaturas, la pérdida de temperatura del fluido es considerable en los primeros tramos hasta llegar a ECB existiendo una disipación de energía hacia el medio ambiente, a partir de ECB la temperatura del fluido permanece constante hasta llegar a su destino.

El gráfico 3.16 indica el patrón de flujo, al transportar solo líquido el patrón de flujo es estratificado, que define al flujo monofásico.

3.3.2.1. Problema del caso base: Flujo monofásico

Al analizar cada uno de los resultados del comportamiento del flujo monofásico, el principal problema que afecta al Sistema Apaika-EPF son las bajas velocidades que presenta el transporte de fluidos, la norma API RP 14E especifica que las velocidades para sistemas monofásicos sean las siguientes:

- Velocidad mínima es de 3 ft/s, para mitigar la depositación de sólidos.
- Velocidad máxima es de 15 ft/s, para mitigar el efecto corrosivo y erosivo.

En el anexo 3 se observan las gráficas que recomienda la norma API RP 14E para el diseño de tuberías teniendo en cuenta el caudal de los fluidos en flujo monofásico.

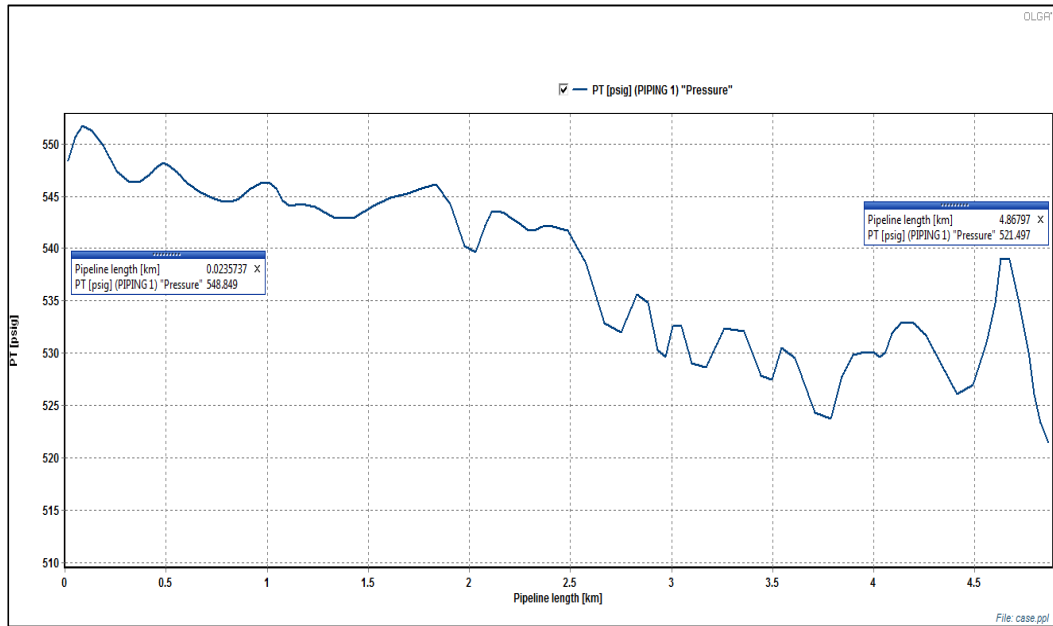
3.3.3. SIMULACIÓN SISTEMA APAIKA-EPF FLUJO MULTIFÁSICO

Suponiendo que el Sistema Apaika-EPF se encuentra operando en flujo multifásico, se intenta prever los posibles problemas operacionales que se pueden presentar y dar posibles soluciones para un buen transporte del flujo.

En dicho caso se consideró bajar la presión de llegada a EPF de 500 psig a 400 psig, para lo cual se estima que la presión de salida de la bomba multifásica sea menor o igual a la presión de saturación, de igual forma esta presión es la que se requiere para que los fluidos lleguen hasta EPF para su separación.

Las gráficas 3.17, 3.18 y 3.19 indican los perfiles de presión para el flujo multifásico.

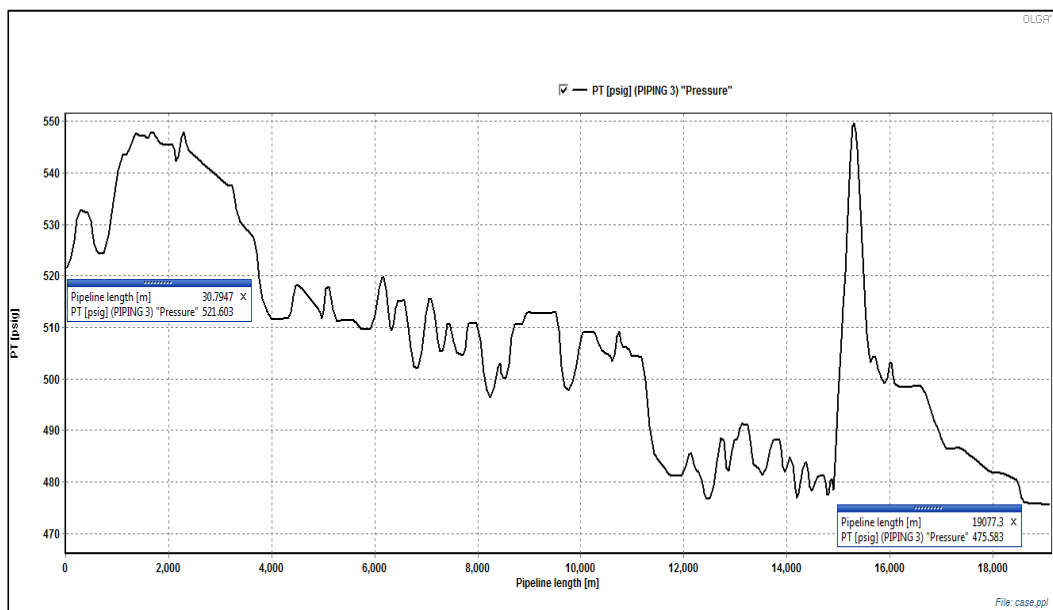
GRÁFICO 3.17. PERFIL DE PRESIÓN P₁, APAIKA-UNIÓN AN, FLUJO MULTIFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

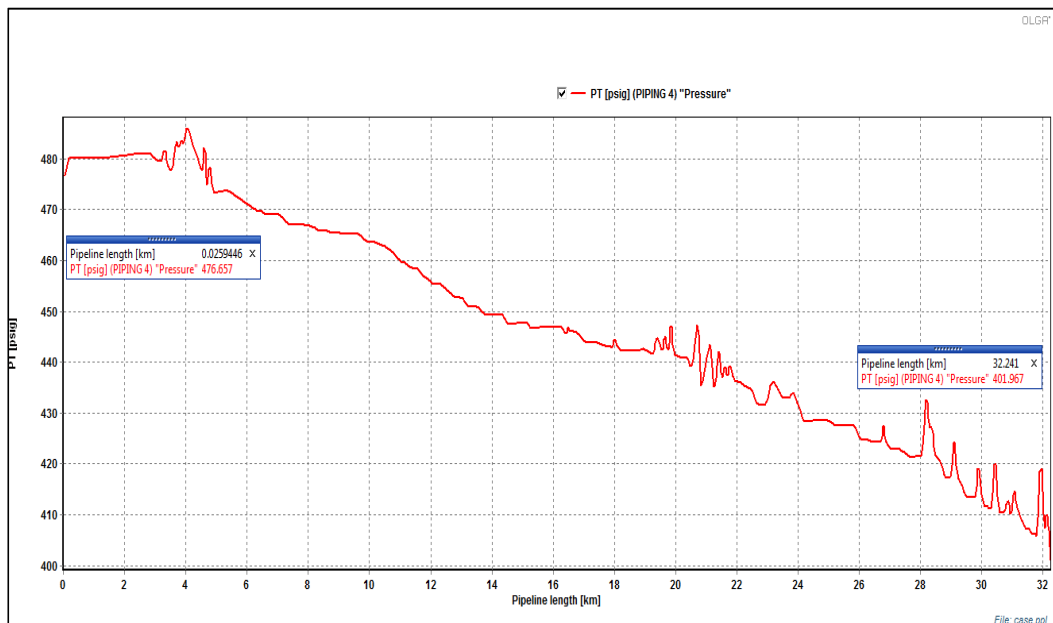
GRÁFICO 3.18. PERFIL DE PRESIÓN P₃, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MULTIFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.19. PERFIL DE PRESIÓN DE P₄, ECB-EPF, FLUJO MULTIFÁSICO



Fuente: Olga.

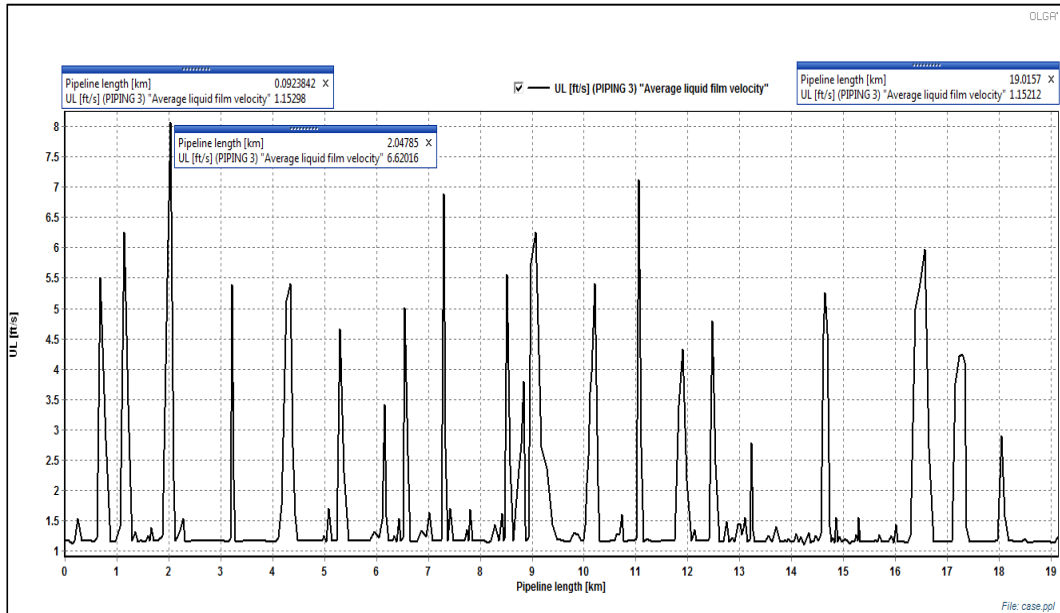
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El gráfico 3.17 al inicio del trayecto calcula la presión necesaria en la salida de la bomba multifásica para que los fluidos lleguen a su destino, siendo esta 548.85 psig, dicha presión se encuentra a un sobre el punto de saturación.

En el gráfico 3.18 se indica la presión a la cual se mezclan los fluidos, en donde ya se observa que la presión calculada por el simulador es igual a la presión de saturación, el tramo final está representado por el gráfico 3.19 donde las presiones ya se encuentran debajo del punto de saturación, siendo la presión de salida de ECB 478 psig.

Las gráficas 3.20 y 3.21, muestran los perfiles de las velocidades de los tramos P₃ y P₄ del Sistema Apaika-EPF.

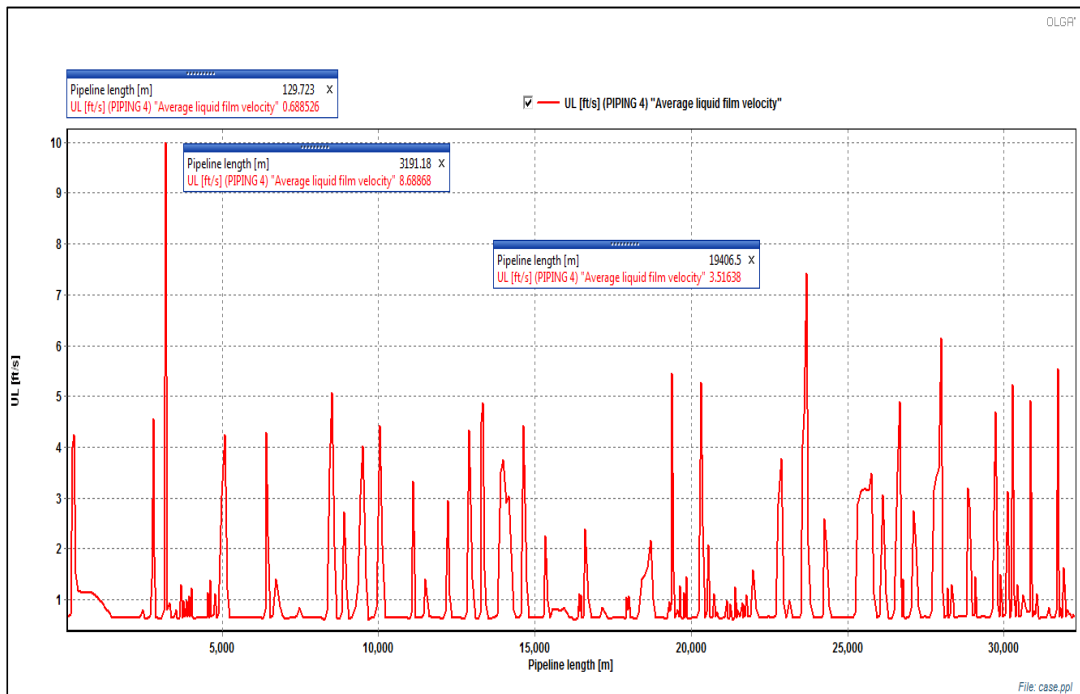
GRÁFICO 3.20. PERFIL DE VELOCIDAD P₃, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MULTIFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.21. PERFIL DE VELOCIDAD P₄, ECB-EPF, FLUJO MULTIFÁSICO



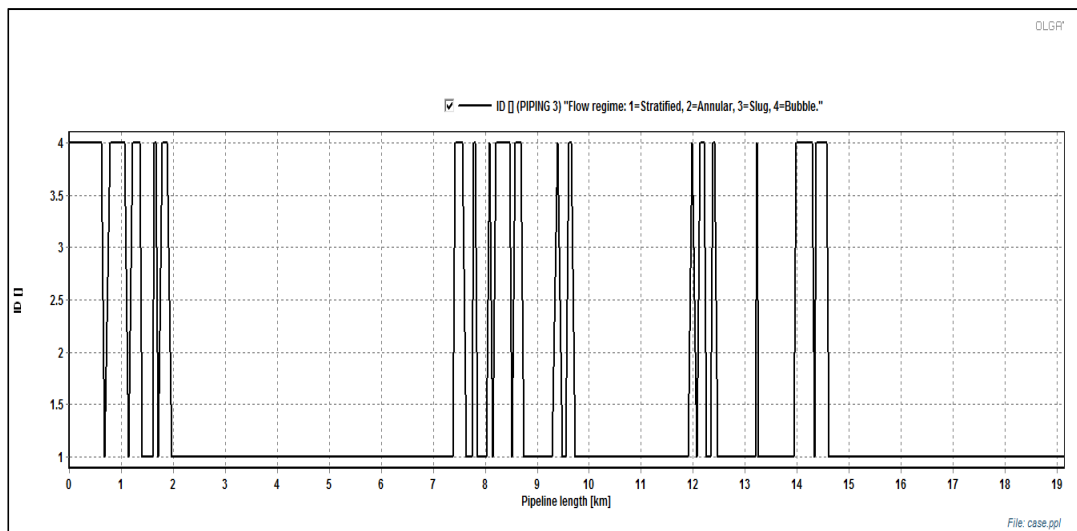
Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Los gráficos 3.20 y 3.21 se determinan las velocidades a las cuales los fluidos son transportados, dichas velocidades no cumplen con las velocidades sugeridas por la norma API RP 14E, ya que para sistemas que trabajan en flujo bifásico la velocidad mínima recomendada es de 10 ft/s.

Los gráficos 3.22 y 3.23 determinan los patrones de flujo del Sistema Apaika-EPF.

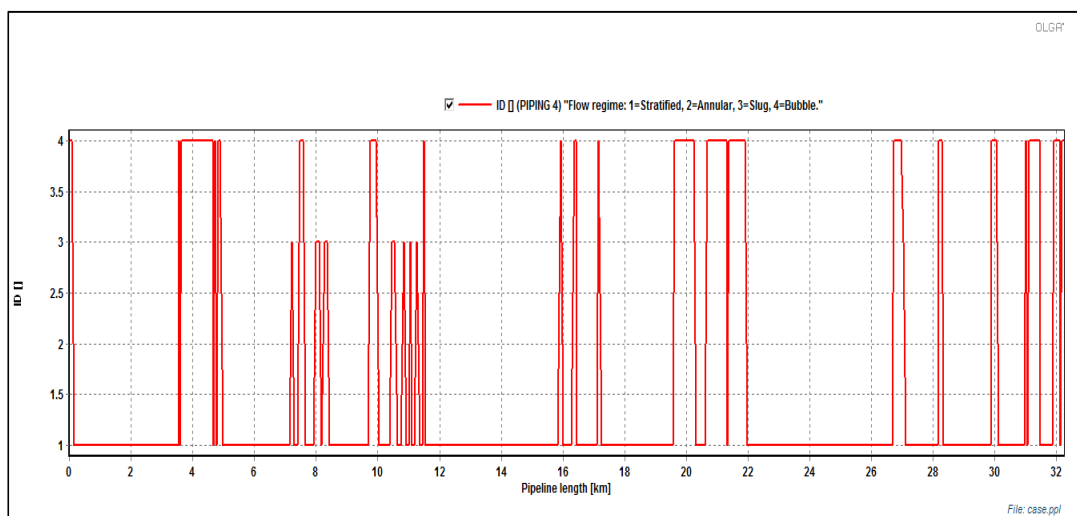
GRÁFICO 3.22. PATRÓN DE FLUJO DE P₃, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MULTIFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.23. PATRÓN DE FLUJO DE P₄, ECB-EPF, FLUJO MULTIFÁSICO



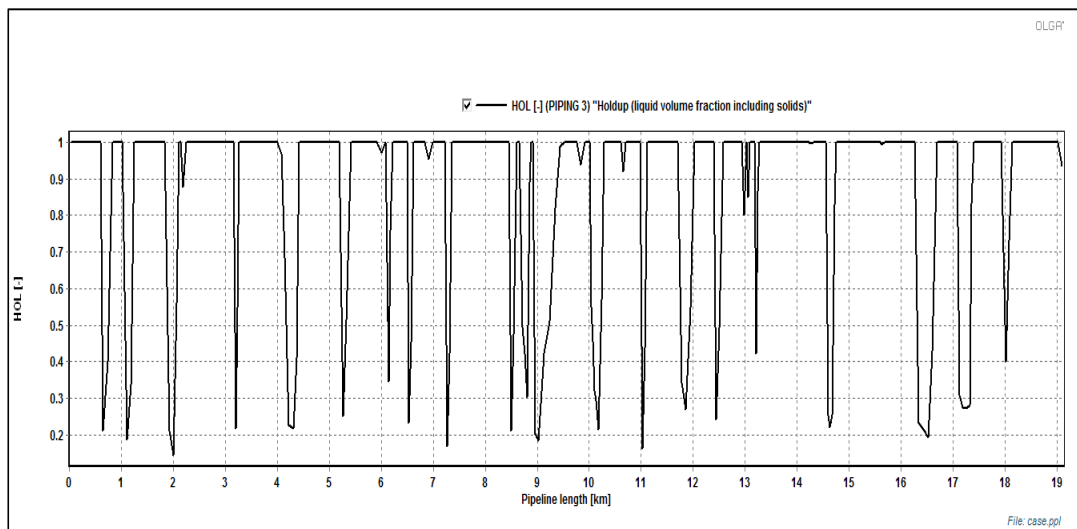
Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El gráfico 3.22 que representa a el tramo P₃ existe una transición entre el flujo burbuja y estratificado, y en el tramo final P₄ representado en el gráfico 3.23 se presentan los regímenes de flujo burbuja, estratificado y tapón, éste último se presenta en menor cantidad.

Los gráficos 3.24 y 3.25 determinan los hold up del Sistema Apaika-EPF.

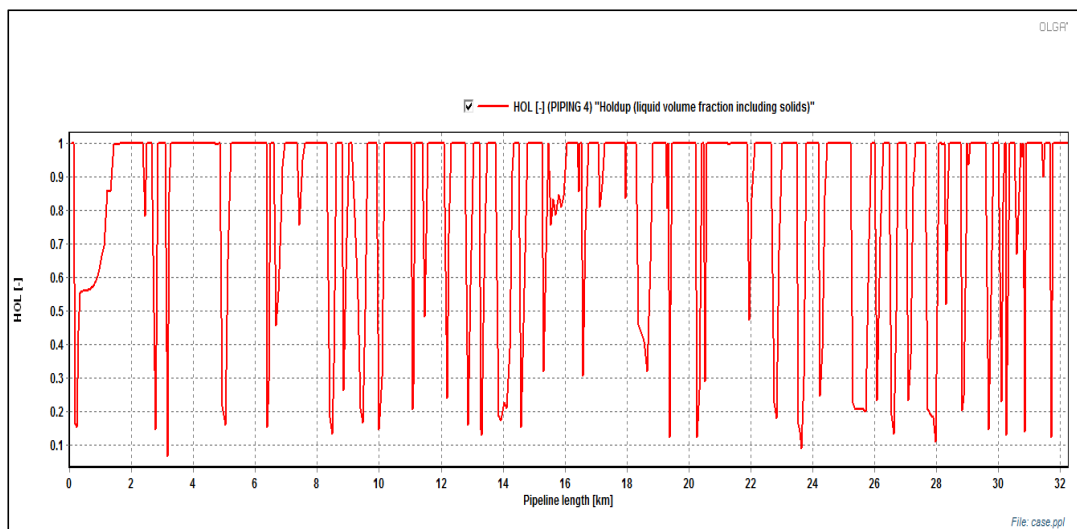
GRÁFICO 3.24. HOLD UP DE P₃, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MULTIFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 3.25. HOLD UP DE P₄, UNIÓN AN-ECB, FLUJO MULTIFÁSICO

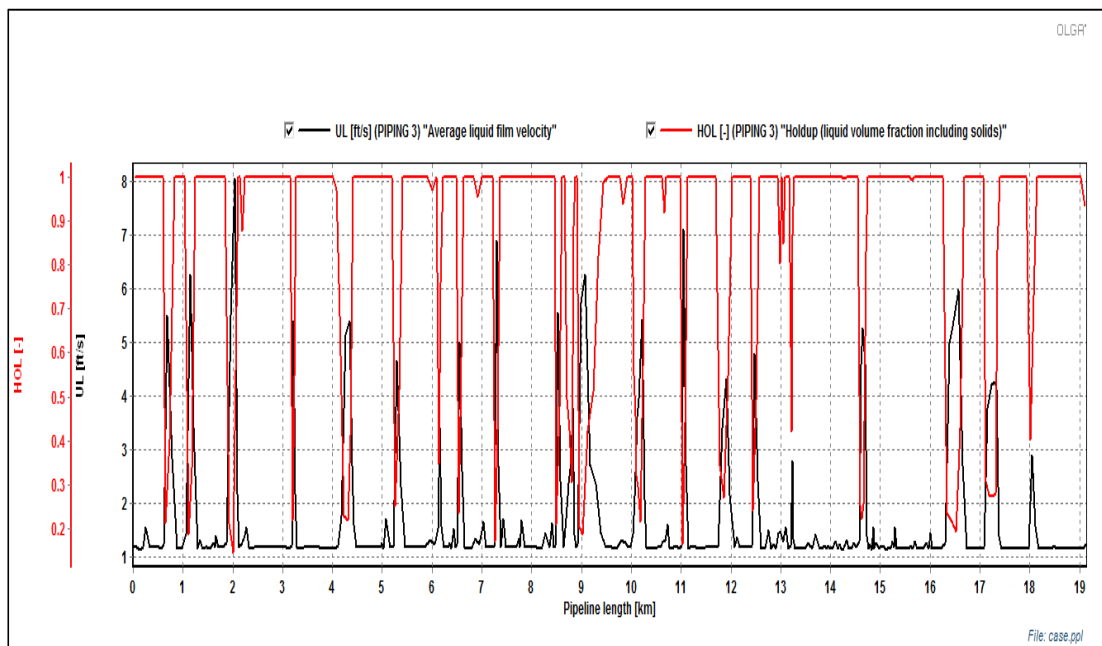


Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Las gráficas 3.24 y 3.25 indican los colgamientos tanto del líquido y del gas que se presentan a lo largo de los tramos del Sistema Apaika-EPF, los cuales influyen en los patrones de flujo que se presentan en la línea de flujo, éstas gráficas a su vez permiten relacionar el colgamiento del gas y las velocidades de las fases, a medida que el colgamiento del gas se acerca a cero (aumenta la cantidad de gas), la velocidad de flujo incrementa, esto se observa en la gráfica 3.26 del tramo P₃.

GRÁFICO 3.26. RELACIÓN COLGAMIENTO Y VELOCIDAD P₃, FLUJO MULTIFÁSICO



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

CAPÍTULO 4

ALTERNATIVAS PARA MEJORAR EL TRANSPORTE DE FLUIDOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollan las posibles soluciones para asegurar un buen transporte de los fluidos, para lo cual se partirán de los dos casos más importantes como es el caso de flujo monofásico y el caso de flujo multifásico.

El principal inconveniente al trabajar en flujo multifásico es la presencia de regímenes de flujo los cuales ocasionan diversos comportamientos a lo largo de la línea de flujo, al igual que la presencia de volúmenes de gas y líquido que influyen en las velocidades de los fluidos, a diferencia del flujo monofásico que el colgamiento es uno y el régimen de flujo es estratificado, otro problema fundamental que se puede presentar es la interacción de la fase líquida y la separación gravitacional de las fases y el asentamiento de sólidos, los cuales causan taponamientos impidiendo la movilidad del fluido.

Tanto en la simulación del flujo multifásico y monofásico el problema radica en las bajas velocidades de los fluidos, las cuales no cumplen con la Norma API RP 14E, las soluciones partirán desde el caso de flujo monofásico, ya que es aconsejable trabajar en esta fase para evitar problemas en el transporte de los fluidos.

A continuación se desarrollan los escenarios soluciones de las bajas velocidades del Sistema Apaika-EPF.

4.2. INCREMENTO DE LA VELOCIDAD

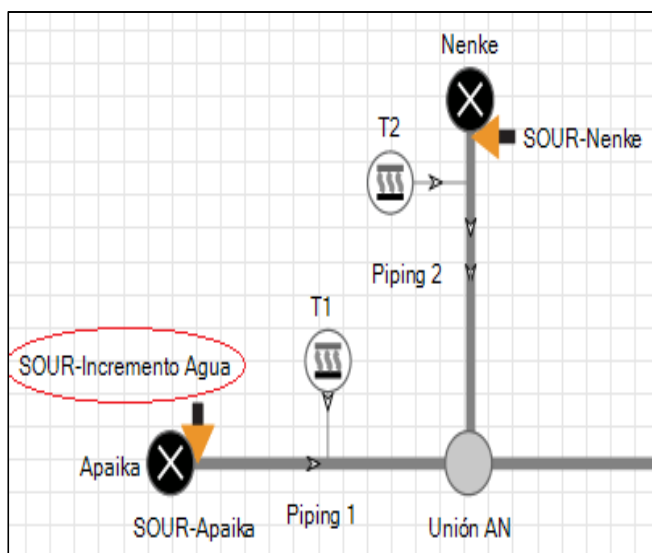
Para el incremento de las velocidades, se plantean los siguientes casos:

- El incremento del caudal de líquido mediante la inyección de agua que ayudará a incrementar la velocidad del flujo monofásico, y
- El incremento de producción.

4.2.1. ESCENARIO 1: INYECCIÓN DE AGUA EN LA BOMBA MULTIFÁSICA

Este escenario se lo realiza aumentando una fuente de flujo de masa junto al nodo de Apaika, el caudal inyectado permite simular el incremento del caudal de líquido, para mejorar la velocidad del flujo monofásico.

FIGURA 4.1. INCREMENTO DE CAUDAL DE LÍQUIDO, MEDIANTE LA INYECCIÓN DE AGUA



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

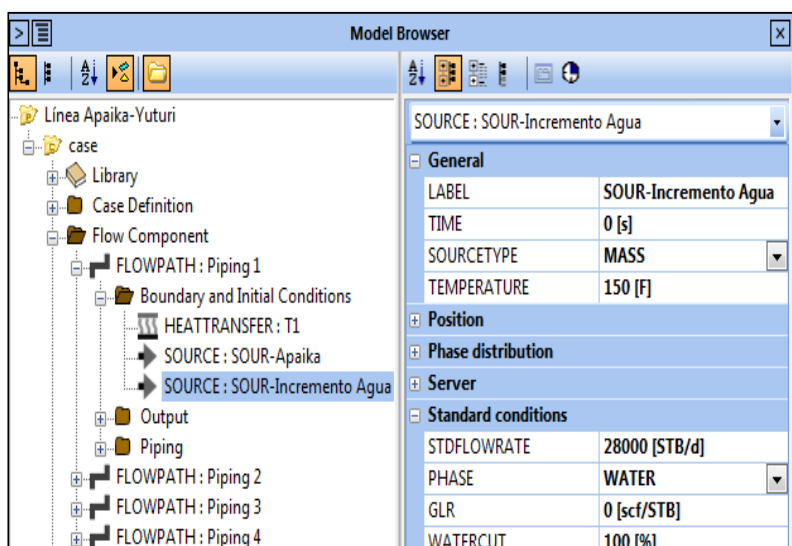
Las condiciones que se utilizan para el incremento de agua se observan en la tabla 4.1, teniendo en cuenta que el caudal de agua inyectado es igual al caudal total de líquido producido del caso base en flujo monofásico.

TABLA 4.1. INCREMENTO DE CAUDAL DE LÍQUIDO

CAUDAL INYECTADO DE AGUA		
CAUDAL DE AGUA INYECTADO	28000.00	stb/d
TEMPERATURA	150.00	°F
GLR	0.00	scf/stb
FRACCIÓN DE AGUA	100.00	%

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

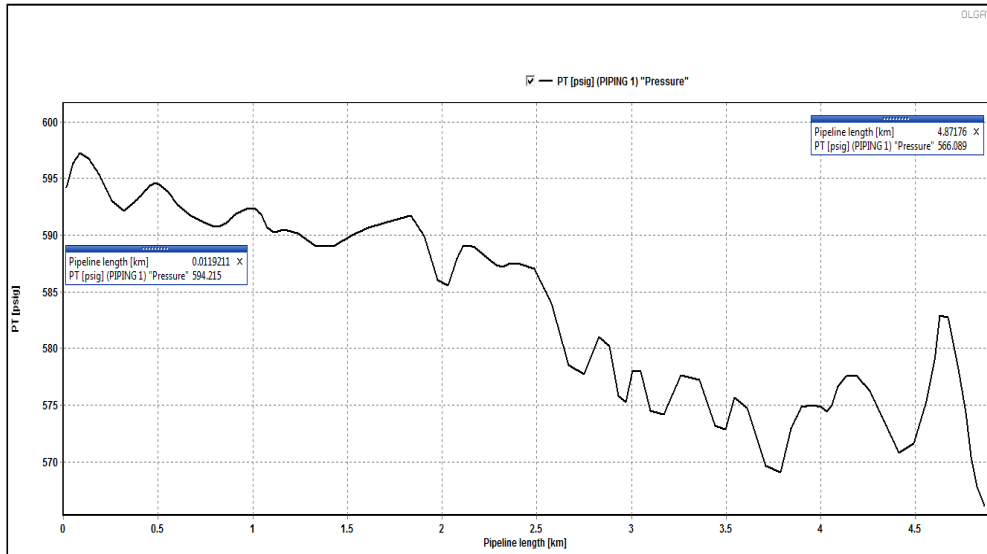
Los valores de la tabla 4.1 se asignarán a la fuente de flujo de masa, que se observa en la figura 4.2.

FIGURA 4.2. FUENTE DE MASA CAUDAL DE LÍQUIDO

Fuente: Olga.

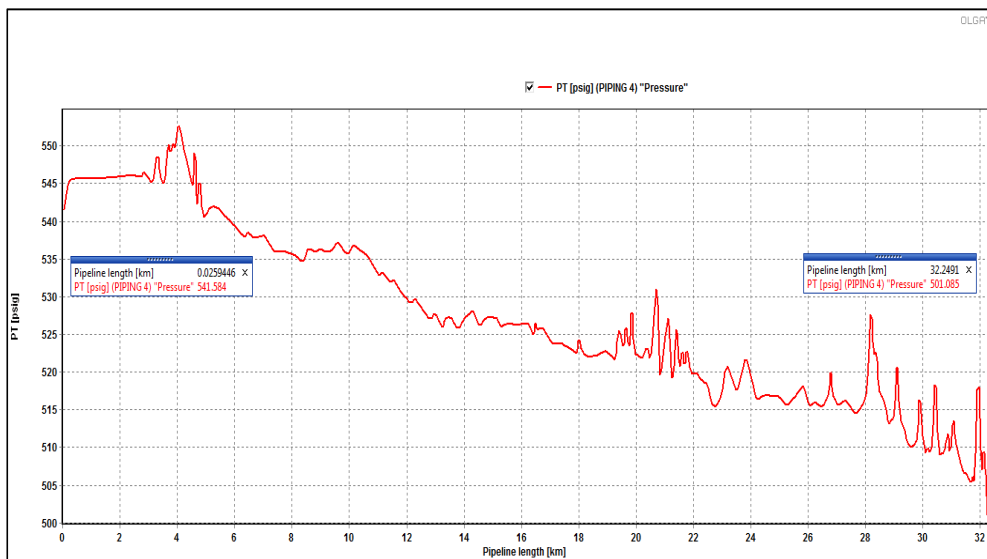
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El tiempo empleado para la simulación de la inyección de agua es de 24 horas, tiempo en el cual el sistema alcanza las condiciones estables. En los gráficos 4.1 y 4.2 se observan los perfiles de presión en la inyección de agua para el Sistema Apaika-EPF.

GRÁFICO 4.1. PERFIL DE PRESIÓN DE P₁, APAIKA-UNIÓN AN, INYECCIÓN DE AGUA

Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 4.2. PERFIL DE PRESIÓN DE P₄, ECB-EPF, INYECCIÓN DE AGUA

Fuente: Olga.

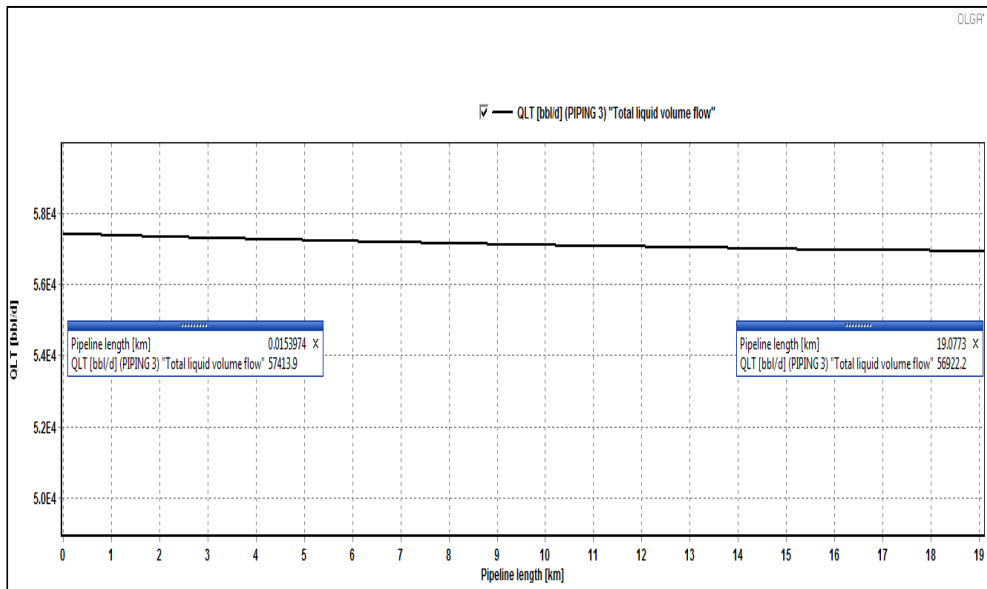
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El gráfico 4.1 determina la presión de descarga que ayuda a los fluidos a llegar a su destino, la cual tuvo un aumento en comparación al caso base, la presión es de 594.22 psig debido a la inyección de agua, el gráfico 4.2 determina las presiones a

la salida de ECB que es de 541.8 psig y la de llegada a EPF que es de 501.1 psig, ésta última se mantiene en todos los casos para no presentar flujo multifásico.

Los gráficos 4.3 y 4.4 indican los perfiles de caudales del Sistema Apaika-EPF.

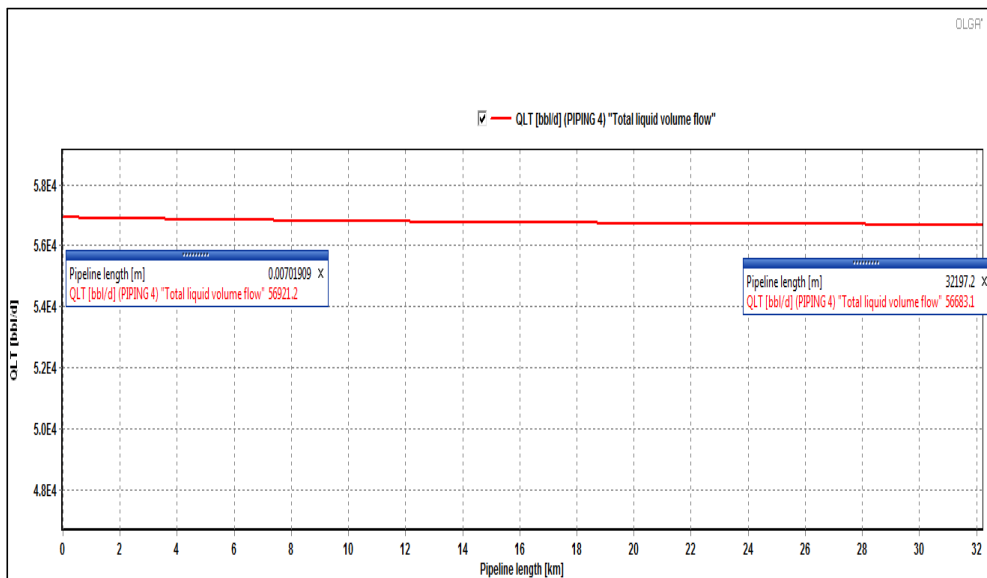
GRÁFICO 4.3. PERFIL DE CAUDALES DE P₃, UNIÓN AN-ECB, INYECCIÓN DE AGUA



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 4.4. PERFIL DE CAUDALES DE P₄, ECB-EPF, INYECCIÓN DE AGUA



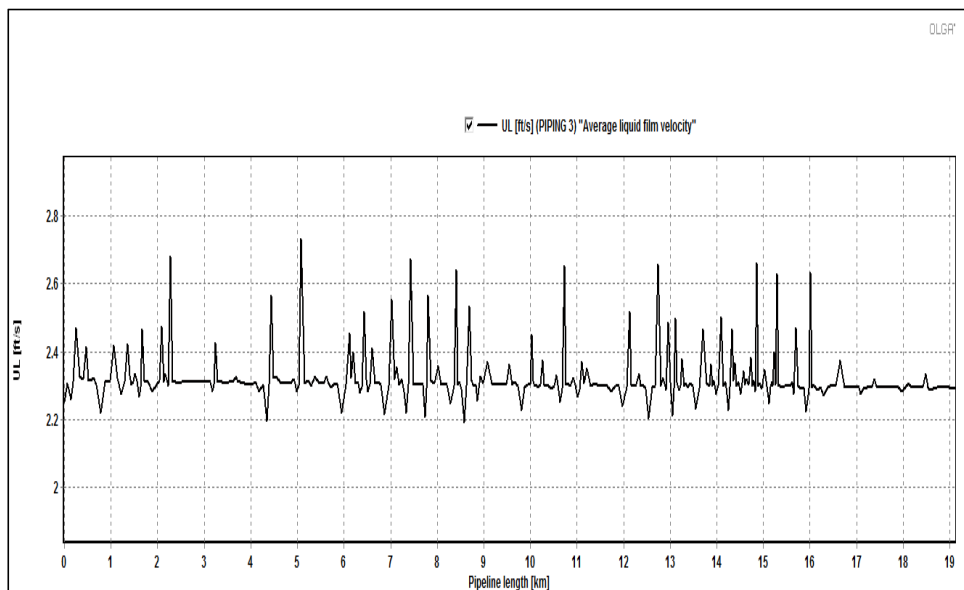
Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

En el gráfico 4.3 luego de la mezcla de los fluidos el caudal tiene un valor de 57413.9 stb/d, en su trayecto hasta ECB existe un pérdida de líquido, llegando así 56922.2 stb/d, en su trayecto final el gráfico 4.4 indica los barriles de líquido que llegan hasta EPF que son 56683.1 stb/d, los barriles perdidos son significativos dando así un valor de 730.8 barriles.

En los gráficos 4.5 y 4.6 se observan los perfiles de velocidad del Sistema Apaika-EPF, los cuales indican los aumentos de velocidades que se necesitan para mejorar el transporte del flujo monofásico.

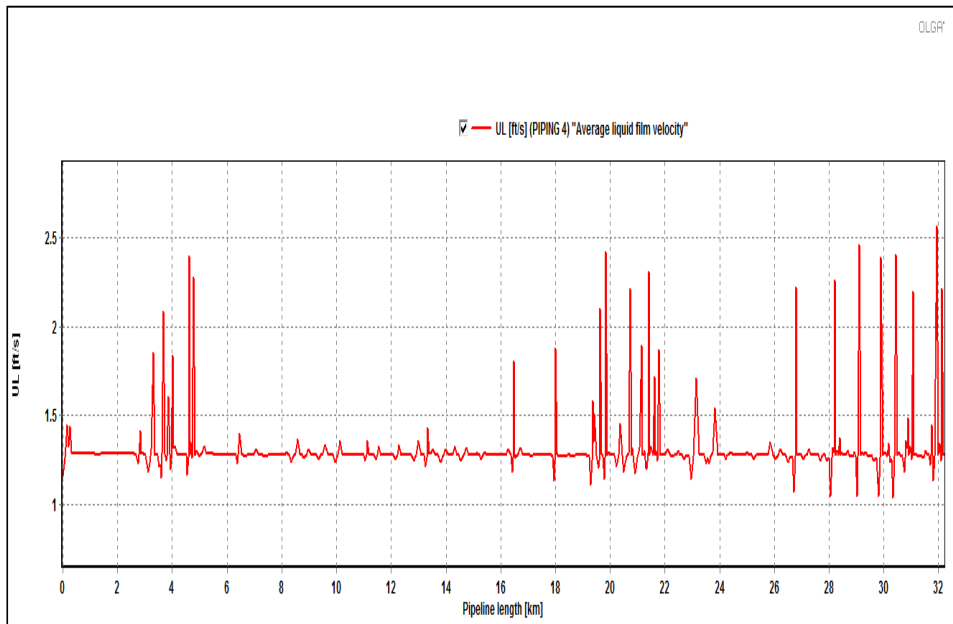
GRÁFICO 4.5. PERFIL DE VELOCIDAD DE P₃, UNIÓN AN-ECB, INYECCIÓN DE AGUA



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El gráfico 4.5 presenta un aumento en la velocidad del tramo P₃ que oscila entre 2.2 ft/s y 2.7 ft/s, dichas velocidades se encuentran por debajo de la mínima velocidad requerida.

GRÁFICO 4.6. PERFIL DE VELOCIDAD DE P₄, ECB-EPF, INYECCIÓN DE AGUA

Fuente: Olga.

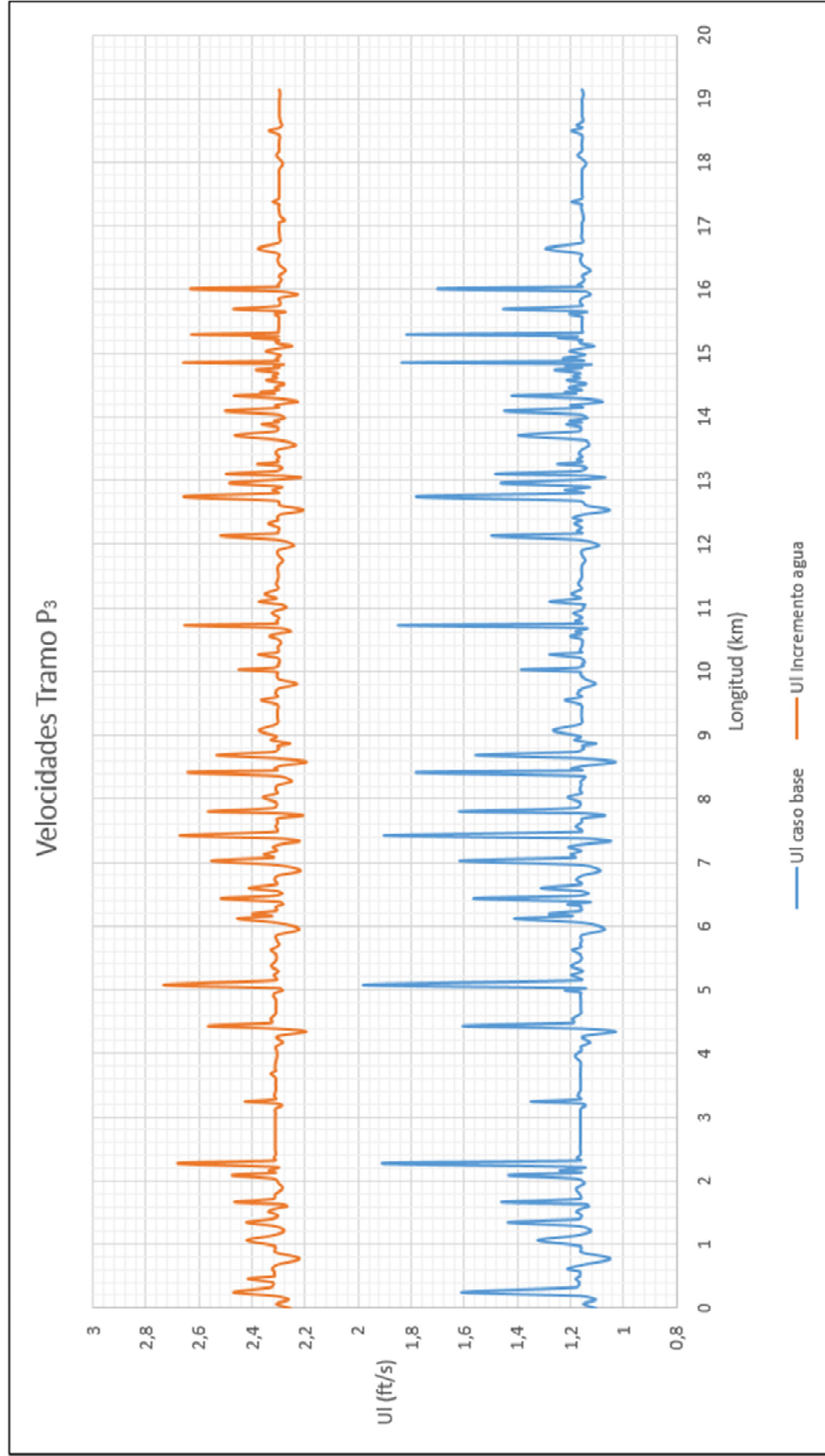
Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

En el gráfico 4.6 se observa el aumento de velocidad en el tramo P₄, la velocidad oscila entre 1.3 y 2.5, hay que tomar en cuenta que en este tramo existe un aumento en el diámetro de la tubería por lo cual la velocidad disminuye.

Las velocidades calculadas de este último caso no cumplen aun con las especificaciones de las velocidades para sistemas monofásicos, hay que tener en cuenta que al realizar el aumento del caudal de líquido con una tasa de inyección de agua de 28000 stb/d, se tuvo un incremento considerable en el tramo P₃, lo cual hace suponer que a medida que se incremente el caudal, las velocidades van a incrementar.

4.2.1.1. Comparación de las velocidades caso real e inyección de agua

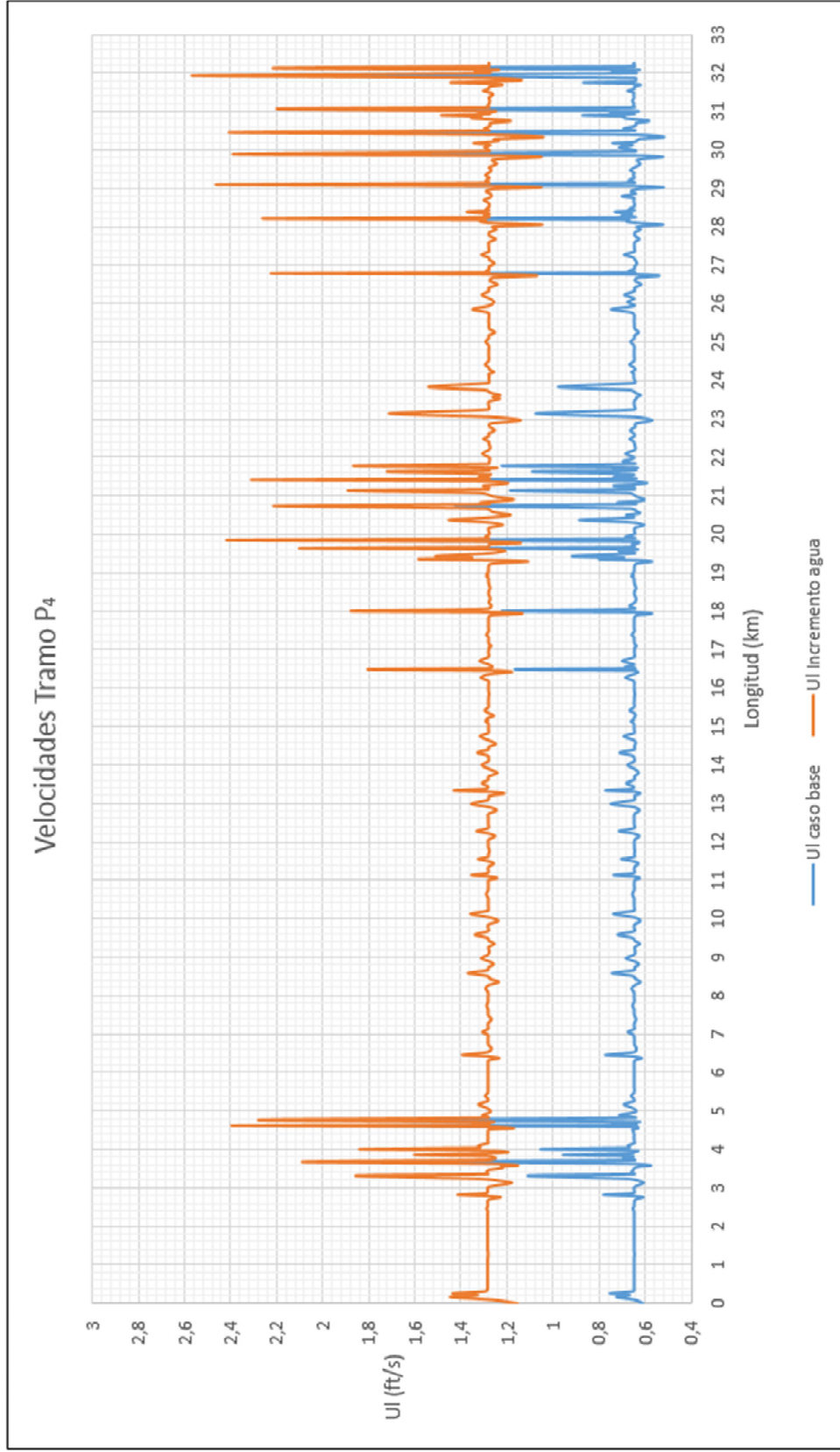
GRÁFICO 4.7. COMPARACIÓN DE VELOCIDADES CASO BASE E INYECCIÓN DE AGUA TRAMO P₃



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 4.8. COMPARACIÓN DE VELOCIDADES CASO BASE E INYECCIÓN DE AGUA TRAMO P₄



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loo.

4.2.2. ESCENARIO 2: INCREMENTO DE PRODUCCIÓN

Este caso se realizó suponiendo que en un tiempo determinado la producción del Bloque 31 alcanzó los parámetros que se indica en la tabla 4.2, en el cual se analiza las características que debería tener el sistema para su correcto funcionamiento.

TABLA 4.2. PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL

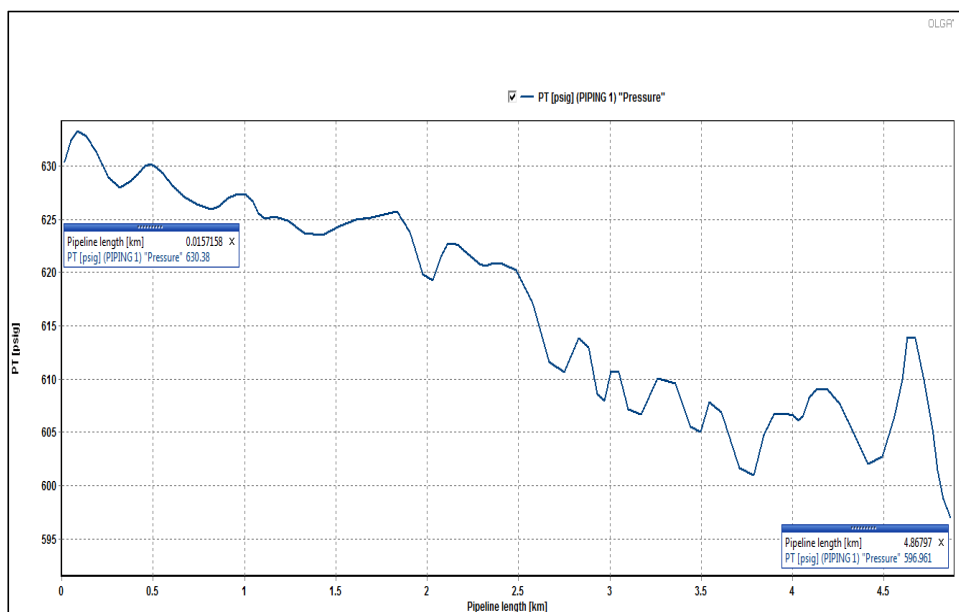
CAMPO	TOTAL	CRUDO	AGUA	BSW	GOR
	stb/d	stb/d	stb/d	%	scf/stb
APAICA	71500.00	18000.00	53500.00	74.83	47.00
NENKE	8500.00	4000.00	4500.00	52.94	63.00
TOTAL	80000.00	22000.00	58000.00	72.50	49.91

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

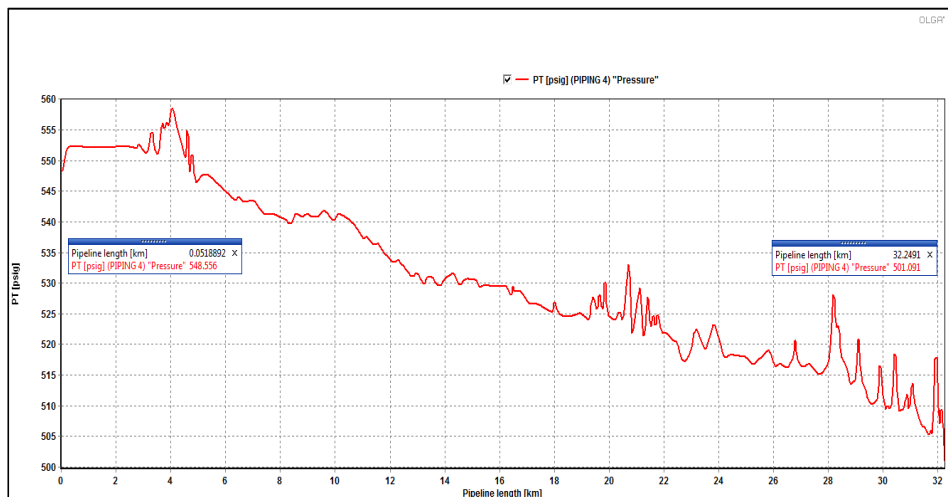
Los gráficos 4.9 y 4.10 indican los perfiles de presiones en el incremento de producción del Sistema Apaika-EPF.

GRÁFICO 4.9. PERFIL DE PRESIÓN DE P₁, PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL APAIKA-UNIÓN AN



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

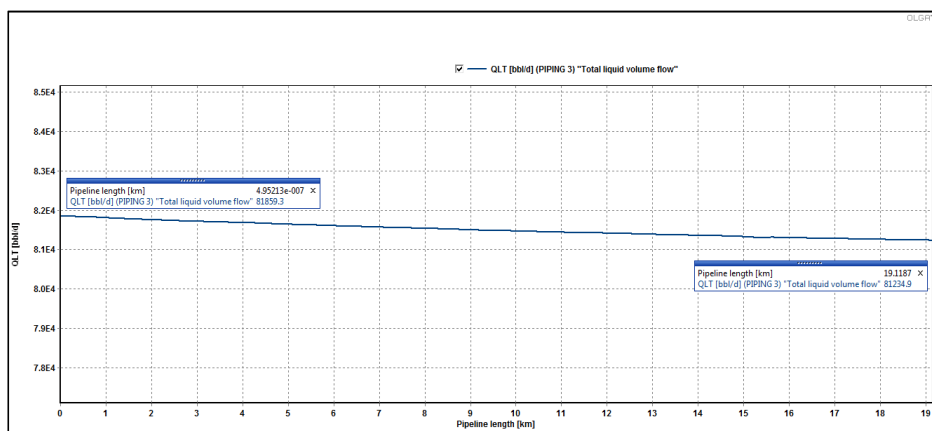
GRÁFICO 4.10. PERFIL DE PRESIÓN DE P₄, PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL ECB-EPF

Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

El gráfico 4.9 indica que la presión óptima de descarga que debería tener el sistema es de 630.38 psig para que los fluidos lleguen hasta EPF, este aumento de presión se debe al incremento del líquido. En el gráfico 4.10 la variación de presión es de 48 psig a lo largo del tramo P₄ y la presión de llegada se mantiene en 500 psig.

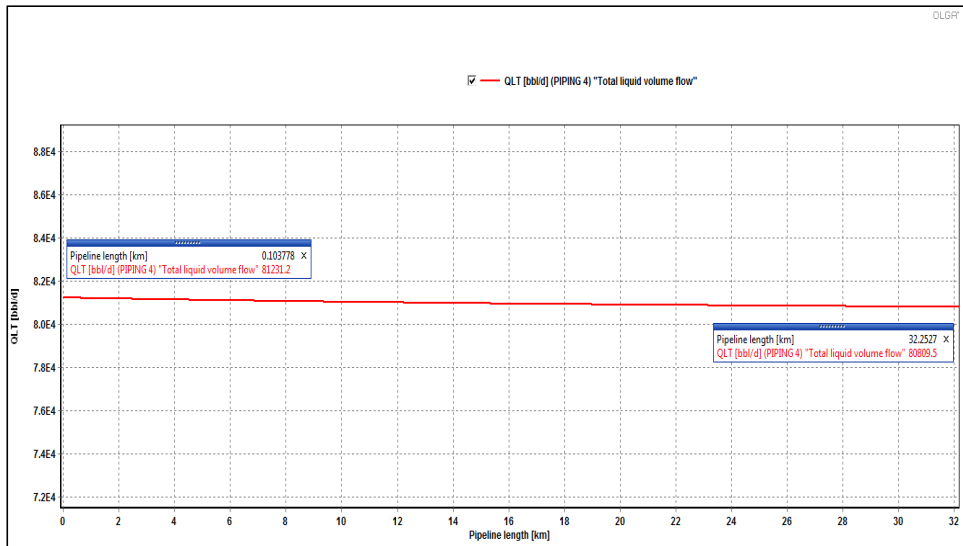
Los gráficos 4.11 y 4.12 indican los perfiles de caudales en el incremento de producción del Sistema Apaika-EPF.

GRÁFICO 4.11. PERFIL DE CAUDALES DE P₃, PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL UNIÓN AN-ECB

Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

GRÁFICO 4.12. PERFIL DE CAUDALES DE P₄, PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL ECB-EPF

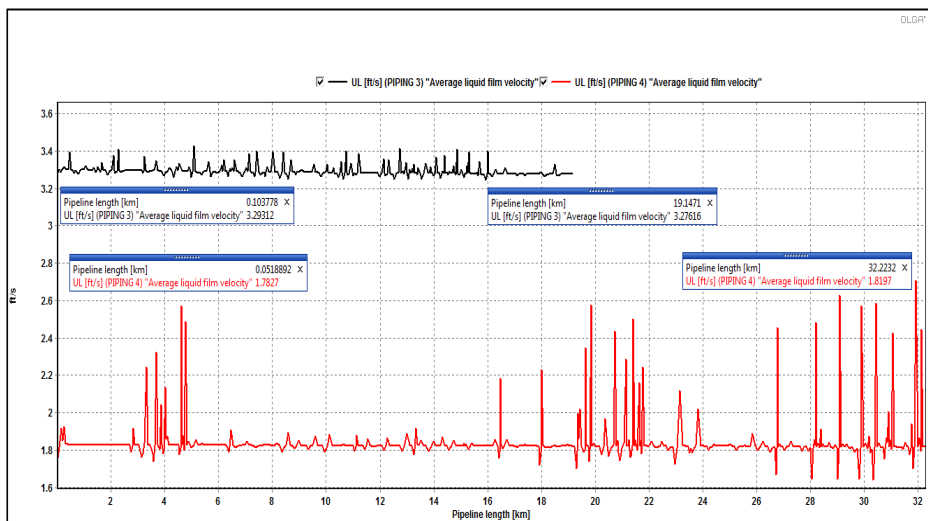


Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

En el gráfico 4.11 y 4.12 se indica la producción total, a lo largo del trayecto de P₃ la pérdida de caudal es de 624 stb, obteniendo una producción de llegada a EPF de 80809.5 stb/d, siendo necesario para este escenario una producción aproximada de inicio en P₃ de 81859.3 stb/d. La gráfica 4.13 indica las velocidades de P₃ y P₄.

GRÁFICO 4.13. PERFIL DE VELOCIDAD DE P₃, P₄, PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL UNIÓN AN-ECB Y ECB-EPF



Fuente: Olga.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Al incrementar la producción del Bloque 31, la velocidad en el tramo P₃ se incrementa, la cual se encuentra en los parámetros especificados en la norma siendo esta 3.25 ft/s, a diferencia en el tramo P₄ se visualiza un ligero incremento en la velocidad pero no satisface a las condiciones de flujo monofásico debido a que en este último tramo el diámetro de la tubería aumenta.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Al calcular las pérdidas de presión utilizando las correlaciones matemáticas son de gran ayuda pero tiene sus limitaciones, ya que son modelos en estado estático y las correlaciones de cada autor varían ya que se basan en diferentes condiciones de trabajo, para determinar gradientes de presión, colgamientos, factores de fricción, etc.

Al realizar el análisis de la composición de los fluidos, se determinó que los componentes inorgánicos N_2 y especialmente el CO_2 tienen valores menores al 5%, y no existe presencia de H_2S , por lo cual posibles problemas ocasionados por la corrosión van a ser mínimos, hay que tener en cuenta que cuando el fluido sea transportado hasta EPF por reducciones de presión y temperatura pueden dar origen a la formación de CO_2 ocasionando problemas de corrosión, al ser las densidades específicas mayores a 0.9 g/cm^3 se determinó que el tipo de hidrocarburo a producirse es pesado.

Al utilizar el método de Beggs y Brill, se concluyó que al calcular las pérdidas de presión en flujo monofásico van a ser menores, las cuales oscilan en el rango de 0 a 25 psi, en cambio para sistemas bifásicos las pérdidas de presión incrementan variando en P_1 de 10 a 44 psi, en P_3 al mezclarse los fluidos las pérdidas oscilan de 20 a 85 psi y en P_4 al incrementarse el diámetro de la tubería las pérdidas disminuyen en el rango de 5 a 20 psi.

Se determinó que uno de los principales problemas del aseguramiento de flujo en el Sistema Apaika-EPF, son las bajas velocidades del flujo monofásico que representa las condiciones actuales de operación, así para el tramo P_3 la velocidad

oscila entre 1.06 ft/s hasta 2 ft/s y en el tramo P₄ al existir un incremento en el diámetro las velocidades disminuyen teniendo así en los kilómetros 26.5 a 28.5 y de 43.5 a 56 velocidades que oscilan entre 0.6 ft/s a 2 ft/s para ambos tramos, dichas velocidades pueden ocasionar la separación gravitacional y el asentamiento de sólidos.

Al trabajar en base bifásica, se concluyó que existe el mismo problema para el aseguramiento de flujo que son las bajas velocidades, en el tramo P₃ las velocidades varían de 1.2 ft/s a 9 pie/s y en el tramo P₄ varían de 0.8 ft/s a 5 ft/s, ocasionando mayores problemas en las pérdidas de energía, mayores deslizamientos entre las fases y teniendo diferentes comportamientos de los fluidos en la línea de flujo. Éste al ser un caso supuesto hay que tener en cuenta que las condiciones pueden variar a medida que el yacimiento se vaya drenando por la disminución de presión y temperatura, aumento de producción, aumentó en el corte de agua, etc.

Las velocidades de la mezcla de los fluidos calculadas por el método de Beggs y Brill para flujo monofásico para P₃ es igual a 1.14 ft/s y P₄ es igual a 0.637 ft/s, para flujo bifásico la velocidad en P₃ es igual a 5.43 ft/s y en P₄ es igual a 3.04 ft/s, las cuales no cumplen con las especificaciones de la norma API y realizar una comparación con las velocidades obtenidas con el simulador es poco práctico debido a que el método de Beggs y Brill utiliza diferentes criterios y tiene sus limitaciones.

Se determinó que la eficiencia de producción del Sistema Apaika-EPF, radica en operar en flujo monofásico, ya que al trabajar en flujo multifásico el comportamiento de los fluidos cambia debido a la aparición de los regímenes de flujo, los cuales inducen diferentes velocidades y las pérdidas de energía a lo largo de su trayectoria aumentan.

Debido a la inyección de agua con un caudal de 28000.00 stb/d, para ayudar a mejorar la movilidad del flujo monofásico la velocidad del flujo aumentó, para P₃ la velocidad oscila entre 2.2 ft/s y 2.7 ft/s, en P₄ la velocidad oscila entre 1.3 ft/s y 2.5

ft/s, dichas velocidades aún no se encuentran en las especificaciones requeridas, pero a medida que se continúe incrementando el caudal el problema de las velocidades va a mejorar.

En el caso experimental al aumentar la producción del Bloque 31 a 80000.00 stb/d, las velocidades se acercan al rango establecido por la norma API, así se tiene en P₃ que la velocidad se encuentra en 3.3 ft/s y en P₄ la velocidad se encuentra en 1.9 ft/s, ésta última disminuye debido al aumento del diámetro de la tubería, al continuar con el aumento de la producción la velocidad del flujo va alcanzar las especificaciones requeridas.

Debido al sobredimensionamiento de la línea de flujo del Sistema Apaika-EPF, en los escenarios estudiados siempre va a existir un decremento en la velocidad del fluido en el tramo P₄ debido a que existe un aumento en el diámetro de la tubería desde ECB hasta EPF, haciendo que en este tramo sea más difícil de alcanzar la velocidad requerida.

Se concluyó que el diámetro óptimo para los tramos P₃ y P₄ son los siguientes: para una producción 28284.00 stb/d es de 10 in, para una producción de 56000 stb/d el diámetro óptimo es de 14 in y para una producción de 80000 stb/d el diámetro óptimo es de 18 in.

5.2. RECOMENDACIONES

Al utilizar correlaciones matemáticas se debe tener cuidado, ya que cada una utiliza condiciones distintas para predecir las variables que afectan al cálculo de pérdidas de presión y no existe un modelo único para un determinado tipo de sistema, es recomendable escoger un modelo matemático según los datos que se dispongan y de la experiencia de la persona que está realizando el estudio.

Se recomienda seguir operando en flujo monofásico hasta que el sistema lo permita manteniendo la presión de llegada a EPF en 500 psig, ya que al realizar el decremento de la presión a 400 psig en EPF, el comportamiento de los fluidos cambia a flujo bifásico, en lo cual va a presentar diversos patrones de flujo que pueden generar problemas operativos.

Debido a las bajas velocidades que se presentan en la línea de flujo, se recomienda: inyectar agua en la misma, a una tasa mayor o igual a la producida, ya que al realizar el escenario solución de inyección de agua a una tasa de 28000.00 stb/d, el aumento de la velocidad en P₃ es de 2.2 ft/s y 2.7 ft/s y en P₄ es de 1.3 ft/s y 2.5 ft/s o su vez el aumento de la producción del Bloque 31 ya que al realizar la simulación con una tasa de 80000.00 stb/d de líquido las velocidades son en P₃ de 3.3 ft/s y en P₄ de 1.9 ft/s.

Para aumentar la producción de los Campos Apaika y Nenke, se recomienda incrementar la frecuencia de las bombas de los pozos y realizar estudios para cambios o implementación de nuevos sistemas de levantamiento artificial, o a su vez perforar más pozos, los cuales aportarán a la producción y desarrollo del Bloque 31, mejorando la movilidad de los fluidos transportados.

Se recomienda la calibración periódica del medidor de flujo, para evitar un mal funcionamiento y monitoreo de las condiciones a la cual el fluido se encuentra y es bombeado hasta la estación de separación y tratamiento.

Se recomienda realizar estudios de control de sólidos para impedir la producción de sedimentos que puedan ocasionar posibles taponamientos en la línea de superficie debido a las bajas velocidades, al igual evitar los problemas que se puedan generar con equipos de fondo por la producción de los mismos.

GLOSARIO

A

Asfaltenos: Son compuestos orgánicos aromáticos del petróleo, los cuales representan los compuestos más pesados.

B

BSW: Se refiere al contenido de agua libre y sedimentos.

C

Capacidad calorífica: Es la cantidad de calor requerida para elevar en 1 °C, la temperatura de una determinada sustancia.

Conducción: Es la transferencia de calor entre dos cuerpos que se encuentran a distintas temperaturas, sin que se produzca transferencia de materia.

Conductividad térmica: Es la propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor.

Convección: Se denomina a la transferencia de calor en un fluido mediante el movimiento de sus moléculas.

Correlación Se refiere a ecuaciones matemáticas que permiten predecir de forma empírica el comportamiento real de una propiedad específica en función de características conocidas.

D

Drenaje: Consiste en producir el líquido que se encuentra acumulado en un cuerpo sólido (yacimientos), para el beneficio empresarial o estatal.

F

Factor de fricción: Es el parámetro adimensional que se utiliza para determinar las pérdidas de presión por fricción, el cual es independiente del tipo de flujo.

Flujo monofásico: Es el flujo de una sola fase, pudiendo ser este petróleo, agua y gas.

Flujo multifásico: Es el flujo simultáneo de petróleo, agua y gas.

G

Grados API: Es una medida de densidad, la cual se basa en el peso específico, determinando si el petróleo es pesado o liviano.

GOR: Se refiere a la relación del gas producido con respecto al petróleo producido.

H

Hidratos: Son compuestos cristalinos sólidos creados por el contacto de moléculas pequeñas de gas con agua libre.

I

Incrustaciones: Son compuestos formados por la unión de componentes minerales inorgánicos disueltos en el agua de formación.

P

Parafinas: Parafinas o ceras son compuestos orgánicos dentro del petróleo que pueden solidificarse por cambios de temperatura.

Presión de saturación: Presión a la cual aparece la primera burbuja de gas en el líquido.

R

Régimen de flujo: Se define a la forma como se comporta el movimiento del fluido dentro de una tubería.

Reportes PVT: Se denomina al conjunto de pruebas que se realizan en laboratorios, donde se analizan y determinan las propiedades de los fluidos a diferentes presiones, volúmenes y temperaturas.

Riser: Es un tubo que conecta una plataforma de perforación o producción marina, son considerados los productos más críticos debido a las condiciones adversas donde se los ubican.

S

Salinidad: Es el contenido de sales minerales disueltas en un cuerpo de agua, en el caso de la industria petrolera, pueden ocasionar corrosión en equipos de procesos.

SCADA: Se refiere al sistema de supervisión, control y adquisición de datos de procesos industriales a distancia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd I., et al (2015). Simulación de flujo multifásicos: Optimización de la productividad de los campos petroleros.
- Anselmi R., Baumeister A. J., & Márquez K. C. (2008). Revisión de los métodos y correlaciones para el análisis en líneas de transporte con flujo multifásico.
- Afanasyev V., Gueze P., Pinguet B., Theuveny B. (2009). Muestras de fluidos multifásicos: Una Clave del enigma.
- Arnold K., Stewart M. (1998). Surface production operations, design of oil handing systems and facilities, volume 1.
- Betancourt S., Davies T., et al. (2008). Avances en las mediciones de las propiedades de los fluidos.
- Crane. (1989). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.
- Correlaciones de flujo multifásico para tuberías horizontales. <http://es.slideshare.net/LuisaMoralez/a7-21139247>
- Kraus R. Prospección, perforación y producción de petróleo y gas natural.
- NFOGM y TEKNA. (2005). Handbook of Multiphase Flow Metering.
- Pazmiño J. (1989). Flujo multifásico en tuberías, CEPE.
- PETROAMAZONAS EP. (2013). NUESTRAS TECNOLOGÍAS.
- PETROAMAZONAS EP. (2013). EN LA VANGUARDIA DE LAS TECNOLOGÍAS.

- PETROBRAS. (2006). Proyecto de desarrollo y producción del Bloque 31, Campo Apaika y Nenke. Estudio de Impacto y Plan de Manejo Ambiental.
- PETROECUADOR EP. (2013). El petróleo en el Ecuador la nueva era petrolera.
- Schlumberger. (2011). Aseguramiento de flujo, generación de perfiles, transferencia de calor y caracterización de fluidos con Olga.

ANEXOS

ANEXO No 1
CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESIÓN FLUJO
MONOFÁSICO

ANEXO 1.1: CÁLCULO PÉRDIDAS DE PRESIÓN P₁ FLUJO MONOFÁSICO

	Lpipes	Ángulo	(ΔP/ΔL)fricc	(ΔP/ΔL)acel	(ΔP/ΔL)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/pie	psi/ft	psi/ft	psi	km
1	68.1	-2.8	0.0158	0.0000248	0.01581	3.53	0.07
2	88.0	0.4	0.0158	0.0000192	0.01580	4.56	0.16
3	135.0	1.4	0.0158	0.0000125	0.01580	7.00	0.29
4	105.0	-0.6	0.0158	0.0000161	0.01580	5.44	0.40
5	75.0	-0.9	0.0158	0.0000225	0.01581	3.89	0.47
6	60.0	0.3	0.0158	0.0000281	0.01581	3.11	0.53
7	105.0	0.8	0.0158	0.0000161	0.01580	5.44	0.64
8	132.0	0.3	0.0158	0.0000128	0.01580	6.84	0.77
9	68.0	0.1	0.0158	0.0000248	0.01581	3.53	0.84
10	105.0	-0.7	0.0158	0.0000161	0.01580	5.44	0.94
11	90.0	-0.1	0.0158	0.0000188	0.01580	4.67	1.03
12	60.0	1.5	0.0158	0.0000281	0.01581	3.11	1.09
13	105.0	-0.3	0.0158	0.0000161	0.01580	5.44	1.20
14	180.0	0.4	0.0158	0.0000094	0.01579	9.33	1.38
15	195.0	-0.5	0.0158	0.0000087	0.01579	10.10	1.57
16	300.0	-0.2	0.0158	0.0000056	0.01579	15.54	1.87
17	135.1	2.3	0.0158	0.0000125	0.01580	7.00	2.01
18	90.1	-2.3	0.0158	0.0000187	0.01580	4.67	2.10
19	60.0	-0.2	0.0158	0.0000281	0.01581	3.11	2.16
20	150.0	0.5	0.0158	0.0000113	0.01580	7.77	2.31
21	75.0	-0.4	0.0158	0.0000225	0.01581	3.89	2.38
22	150.0	0.2	0.0158	0.0000113	0.01580	7.77	2.53
23	179.2	2.5	0.0158	0.0000094	0.01579	9.28	2.71
24	150.1	-1.9	0.0158	0.0000112	0.01580	7.78	2.86
25	90.2	3.9	0.0158	0.0000187	0.01580	4.68	2.95
26	75.1	-3.2	0.0158	0.0000225	0.01581	3.90	3.03
27	105.1	2.7	0.0158	0.0000161	0.01580	5.45	3.13
28	179.1	-1.7	0.0158	0.0000094	0.01579	9.28	3.31
29	165.1	2.0	0.0158	0.0000102	0.01579	8.56	3.48
30	90.1	-2.7	0.0158	0.0000187	0.01580	4.67	3.57
31	195.1	2.1	0.0158	0.0000087	0.01579	10.11	3.76
32	105.2	-3.2	0.0158	0.0000161	0.01580	5.45	3.87
33	120.0	-0.2	0.0158	0.0000141	0.01580	6.22	3.99
34	60.0	0.6	0.0158	0.0000281	0.01581	3.11	4.05
35	60.1	-2.4	0.0158	0.0000281	0.01581	3.12	4.11
36	119.0	0.0	0.0158	0.0000142	0.01580	6.17	4.22
37	225.1	1.5	0.0158	0.0000075	0.01579	11.66	4.45
38	134.1	-2.4	0.0158	0.0000126	0.01580	6.95	4.58

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

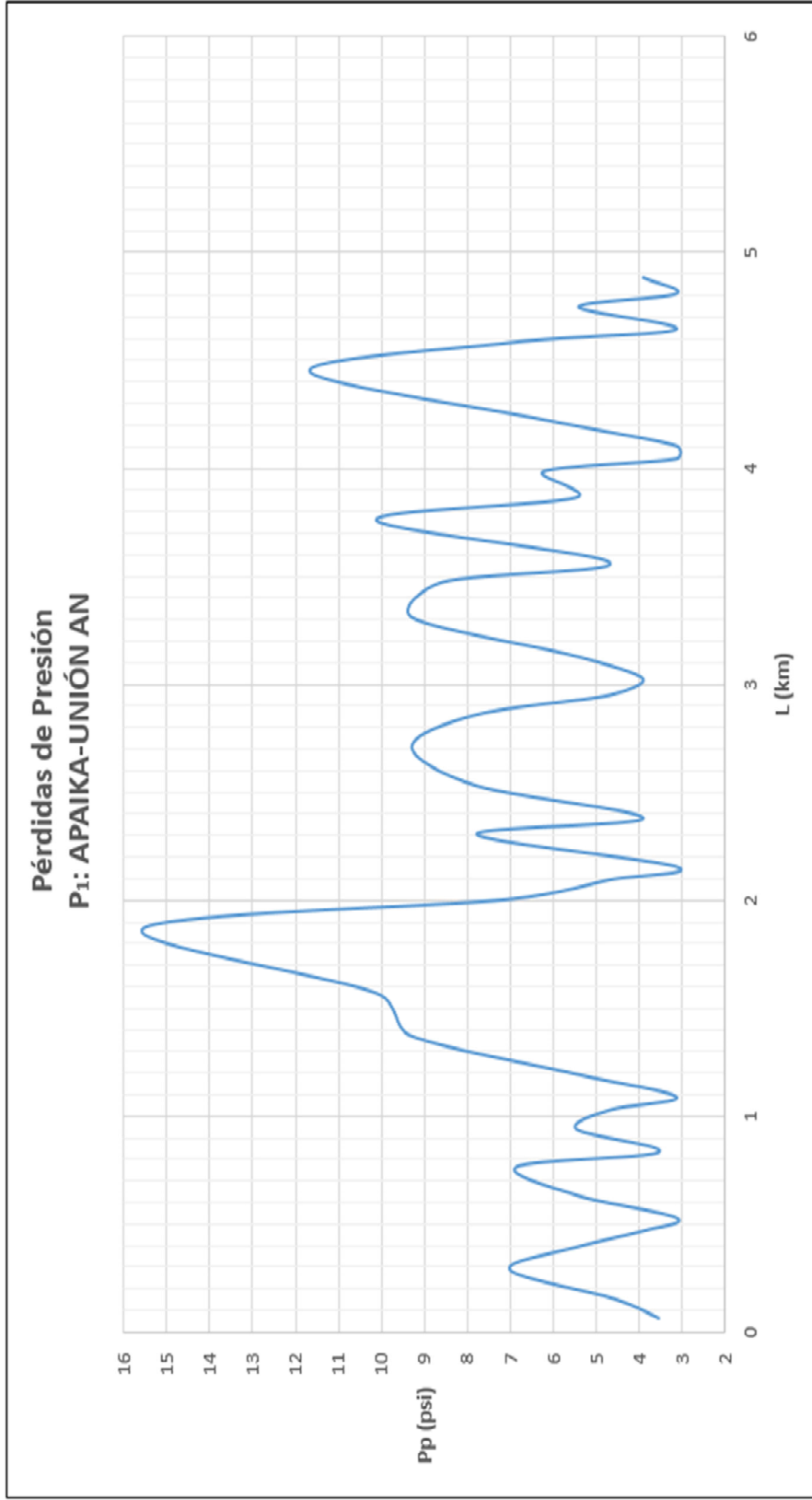
ANEXO 1.1: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
39	60.3	-5.7	0.0158	0.0000280	0.01581	3.13	4.64
40	104.2	3.4	0.0158	0.0000162	0.01580	5.40	4.75
41	60.3	5.2	0.0158	0.0000280	0.01581	3.13	4.81
42	75.0	1.9	0.0158	0.0000225	0.01581	3.89	4.88

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.1: GRÁFICO DE PÉRDIDAS DE PRESIÓN P₁: APAIKA-UNIÓN AN



Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.2: CÁLCULO PÉRDIDAS DE PRESIÓN P₃ FLUJO MONOFÁSICO

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
43	135.0	-1.3	0.023584	0.000019	0.023603	10.46	0.14
44	117.1	-2.8	0.023584	0.000022	0.023606	9.07	0.25
45	213.0	0.1	0.023584	0.000012	0.023596	16.49	0.47
46	75.1	2.7	0.023584	0.000035	0.023619	5.82	0.54
47	75.0	1.5	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	0.62
48	165.0	-0.5	0.023584	0.000016	0.023600	12.78	0.78
49	285.3	-2.7	0.023584	0.000009	0.023593	22.08	1.07
50	150.0	-0.8	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	1.22
51	134.0	-1.2	0.023584	0.000019	0.023603	10.38	1.35
52	90.0	0.3	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	1.44
53	75.0	0.0	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	1.51
54	90.0	0.3	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	1.60
55	60.0	-1.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	1.66
56	214.0	0.5	0.023584	0.000012	0.023596	16.57	1.88
57	210.0	-0.8	0.023584	0.000012	0.023596	16.26	2.09
58	76.1	2.3	0.023584	0.000034	0.023618	5.89	2.16
59	110.2	-3.0	0.023584	0.000024	0.023608	8.53	2.27
60	81.1	2.1	0.023584	0.000032	0.023616	6.28	2.36
61	827.0	0.3	0.023584	0.000003	0.023587	64.00	3.18
62	61.0	-0.7	0.023584	0.000043	0.023627	4.73	3.24
63	95.1	2.7	0.023584	0.000027	0.023611	7.37	3.34
64	345.0	0.4	0.023584	0.000008	0.023591	26.70	3.68
65	90.3	4.4	0.023584	0.000029	0.023613	6.99	3.77
66	195.0	1.0	0.023584	0.000013	0.023597	15.10	3.97
67	210.0	0.0	0.023584	0.000012	0.023596	16.26	4.18
68	165.0	-0.6	0.023584	0.000016	0.023600	12.78	4.34
69	90.2	-4.3	0.023584	0.000029	0.023613	6.99	4.43
70	106.0	0.0	0.023584	0.000025	0.023609	8.21	4.54
71	374.0	0.5	0.023584	0.000007	0.023591	28.95	4.91
72	75.0	1.1	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	4.99
73	89.2	-4.0	0.023584	0.000029	0.023613	6.91	5.08
74	150.1	2.3	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	5.23
75	140.0	-0.4	0.023584	0.000019	0.023603	10.84	5.37
76	255.0	0.0	0.023584	0.000010	0.023594	19.74	5.62
77	90.0	0.6	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	5.71
78	240.0	0.0	0.023584	0.000011	0.023595	18.58	5.95
79	165.2	-2.5	0.023584	0.000016	0.023600	12.79	6.12
80	75.0	-0.3	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	6.19

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.2: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
81	90.2	3.9	0.023584	0.000029	0.023613	6.99	6.28
82	60.0	1.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	6.34
83	90.1	-2.9	0.023584	0.000029	0.023613	6.98	6.43
84	75.0	0.2	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	6.51
85	90.0	-0.5	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	6.60
86	124.3	3.9	0.023584	0.000021	0.023605	9.63	6.72
87	150.0	0.2	0.023584	0.000017	0.023601	11.61	6.87
88	154.3	-3.7	0.023584	0.000017	0.023601	11.95	7.03
89	97.0	0.1	0.023584	0.000027	0.023611	7.51	7.13
90	120.2	3.2	0.023584	0.000022	0.023606	9.31	7.25
91	90.0	-1.0	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	7.34
92	90.1	-3.1	0.023584	0.000029	0.023613	6.98	7.43
93	135.1	2.0	0.023584	0.000019	0.023603	10.46	7.56
94	179.0	0.2	0.023584	0.000015	0.023598	13.86	7.74
95	60.2	-4.3	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	7.80
96	225.0	0.0	0.023584	0.000012	0.023596	17.42	8.02
97	120.3	4.0	0.023584	0.000022	0.023606	9.32	8.14
98	135.0	0.7	0.023584	0.000019	0.023603	10.46	8.28
99	135.1	-2.5	0.023584	0.000019	0.023603	10.46	8.42
100	60.1	2.7	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	8.48
101	105.0	-0.5	0.023584	0.000025	0.023609	8.13	8.58
102	104.2	-3.9	0.023584	0.000025	0.023609	8.07	8.68
103	105.0	-0.1	0.023584	0.000025	0.023609	8.13	8.79
104	75.0	-0.3	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	8.86
105	60.0	-1.2	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	8.92
106	150.0	-0.9	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	9.07
107	476.0	-0.1	0.023584	0.000005	0.023589	36.84	9.55
108	105.4	5.2	0.023584	0.000025	0.023609	8.17	9.66
109	150.0	0.3	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	9.81
110	135.1	-2.2	0.023584	0.000019	0.023603	10.46	9.94
111	89.1	-2.1	0.023584	0.000029	0.023613	6.90	10.03
112	60.0	-0.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	10.09
113	60.0	-0.3	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	10.15
114	120.0	-0.4	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	10.27
115	60.0	1.4	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	10.33
116	120.0	0.7	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	10.45
117	105.0	0.0	0.023584	0.000025	0.023609	8.13	10.56
118	75.0	1.0	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	10.63

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.2: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
119	98.1	-3.1	0.023584	0.000027	0.023610	7.60	10.73
120	61.1	2.4	0.023584	0.000043	0.023627	4.73	10.79
121	127.0	0.0	0.023584	0.000021	0.023604	9.84	10.92
122	90.0	0.8	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	11.01
123	90.0	-1.0	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	11.10
124	120.0	0.1	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	11.22
125	164.5	4.3	0.023584	0.000016	0.023600	12.73	11.38
126	360.0	0.5	0.023584	0.000007	0.023591	27.86	11.74
127	240.0	-0.3	0.023584	0.000011	0.023595	18.58	11.98
128	150.0	-1.4	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	12.13
129	75.0	2.1	0.023584	0.000035	0.023619	5.82	12.21
130	120.0	0.2	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	12.33
119	98.1	-3.1	0.023584	0.000027	0.023610	7.60	10.73
120	61.1	2.4	0.023584	0.000043	0.023627	4.73	10.79
121	127.0	0.0	0.023584	0.000021	0.023604	9.84	10.92
122	90.0	0.8	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	11.01
123	90.0	-1.0	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	11.10
124	120.0	0.1	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	11.22
125	164.5	4.3	0.023584	0.000016	0.023600	12.73	11.38
126	360.0	0.5	0.023584	0.000007	0.023591	27.86	11.74
127	240.0	-0.3	0.023584	0.000011	0.023595	18.58	11.98
128	150.0	-1.4	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	12.13
129	75.0	2.1	0.023584	0.000035	0.023619	5.82	12.21
130	120.0	0.2	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	12.33
131	90.1	2.2	0.023584	0.000029	0.023613	6.98	12.42
132	120.0	-0.4	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	12.54
133	210.2	-2.6	0.023584	0.000012	0.023596	16.27	12.75
134	104.2	3.9	0.023584	0.000025	0.023609	8.07	12.85
135	109.1	-2.9	0.023584	0.000024	0.023608	8.45	12.96
136	86.0	-0.1	0.023584	0.000030	0.023614	6.66	13.05
137	60.1	-2.4	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	13.11
138	90.0	0.3	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	13.20
139	60.0	-0.3	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	13.26
140	78.2	3.7	0.023584	0.000033	0.023617	6.06	13.33
141	87.0	0.3	0.023584	0.000030	0.023614	6.74	13.42
142	135.0	0.6	0.023584	0.000019	0.023603	10.45	13.56
143	150.1	-2.0	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	13.71
144	175.0	0.0	0.023584	0.000015	0.023599	13.55	13.88

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.2: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
145	60.2	4.3	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	13.94
146	150.0	-1.2	0.023584	0.000017	0.023601	11.62	14.09
147	90.2	3.9	0.023584	0.000029	0.023613	6.99	14.18
148	60.0	-1.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	14.24
149	89.1	-2.4	0.023584	0.000029	0.023613	6.90	14.33
150	60.0	0.0	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	14.39
151	75.1	3.2	0.023584	0.000035	0.023619	5.82	14.47
152	105.0	-1.4	0.023584	0.000025	0.023609	8.14	14.57
153	75.0	-0.7	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	14.65
154	90.0	-0.3	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	14.74
155	60.1	3.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	14.80
156	60.1	-3.4	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	14.86
157	60.1	2.6	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	14.92
158	113.6	-9.5	0.023584	0.000023	0.023607	8.80	15.03
159	85.4	-5.8	0.023584	0.000031	0.023614	6.62	15.11
160	60.9	-10.0	0.023584	0.000043	0.023627	4.72	15.18
161	60.8	-9.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.71	15.24
162	60.1	-3.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	15.30
163	60.0	1.8	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	15.36
164	60.5	7.4	0.023584	0.000043	0.023627	4.69	15.42
165	60.6	8.0	0.023584	0.000043	0.023627	4.70	15.48
166	60.6	8.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.70	15.54
167	75.2	4.3	0.023584	0.000035	0.023619	5.83	15.61
168	80.0	-1.4	0.023584	0.000033	0.023616	6.20	15.69
169	107.0	1.6	0.023584	0.000024	0.023608	8.29	15.80
170	120.0	0.7	0.023584	0.000022	0.023606	9.29	15.92
171	90.1	-2.5	0.023584	0.000029	0.023613	6.98	16.01
172	60.1	3.1	0.023584	0.000043	0.023627	4.66	16.07
173	90.0	0.4	0.023584	0.000029	0.023613	6.97	16.16
174	135.0	0.0	0.023584	0.000019	0.023603	10.45	16.30
175	180.0	-0.6	0.023584	0.000014	0.023598	13.94	16.48
176	168.0	-0.5	0.023584	0.000016	0.023599	13.01	16.64
177	180.0	1.2	0.023584	0.000014	0.023598	13.94	16.82
178	205.0	1.0	0.023584	0.000013	0.023597	15.87	17.03
179	60.0	0.9	0.023584	0.000043	0.023627	4.65	17.09
180	210.0	-0.4	0.023584	0.000012	0.023596	16.26	17.30
181	75.0	-0.3	0.023584	0.000035	0.023619	5.81	17.37
182	600.0	0.3	0.023584	0.000004	0.023588	46.43	17.97

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

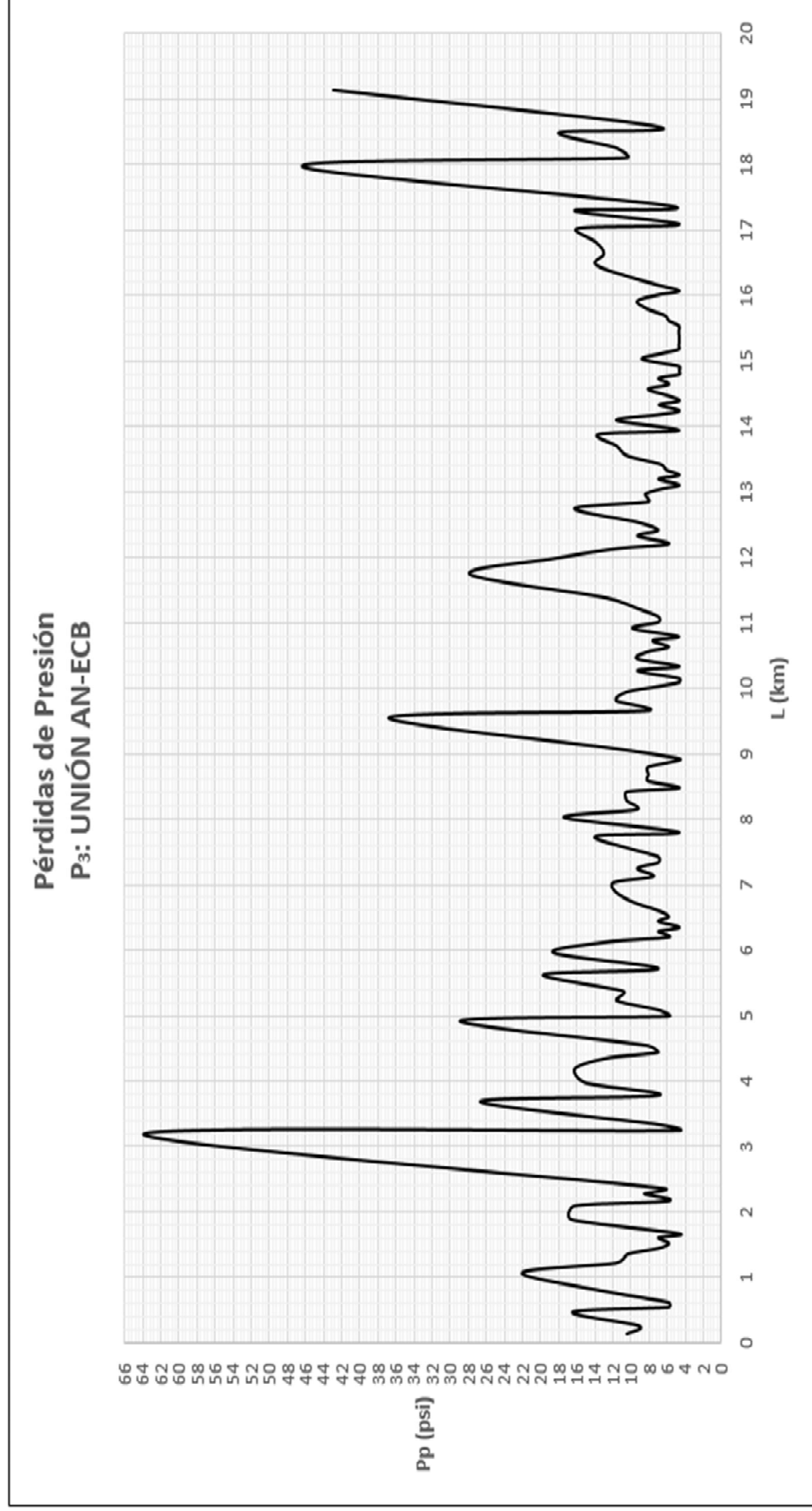
ANEXO 1.2: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
183	135.0	-0.2	0.023584	0.000019	0.023603	10.45	18.11
184	151.0	0.1	0.023584	0.000017	0.023601	11.69	18.26
185	232.0	0.1	0.023584	0.000011	0.023595	17.96	18.49
186	92.0	1.8	0.023584	0.000028	0.023612	7.13	18.58
187	555.0	0.0	0.023584	0.000005	0.023589	42.95	19.14

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.2: GRAFICO DE PERDIDAS DE PRESION P₃: UNION AN-ECB



Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor

ANEXO 1.3: CÁLCULO PÉRDIDAS DE PRESIÓN P₄ FLUJO MONOFÁSICO

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
188	159.9	-1.1	0.006213	0.0000051	0.006218	3.26	0.16
189	100.0	-0.5	0.006213	0.0000081	0.006221	2.04	0.26
190	1011.7	0.0	0.006213	0.0000008	0.006214	20.63	1.27
191	1188.7	0.0	0.006213	0.0000007	0.006214	24.23	2.46
192	294.6	0.0	0.006213	0.0000028	0.006216	6.01	2.75
193	69.1	-0.5	0.006213	0.0000118	0.006225	1.41	2.82
194	302.9	0.2	0.006213	0.0000027	0.006216	6.18	3.13
195	192.4	-1.0	0.006213	0.0000042	0.006217	3.93	3.32
196	81.0	1.6	0.006213	0.0000100	0.006223	1.65	3.40
197	120.1	0.5	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	3.52
198	68.3	-1.0	0.006213	0.0000119	0.006225	1.40	3.59
199	90.0	-2.1	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	3.68
200	90.3	0.8	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	3.77
201	89.6	-0.8	0.006213	0.0000091	0.006222	1.83	3.86
202	74.9	0.6	0.006213	0.0000109	0.006224	1.53	3.93
203	75.0	-1.8	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	4.01
204	89.9	0.1	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.10
205	120.1	0.8	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	4.22
206	89.9	0.8	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.31
207	164.9	0.7	0.006213	0.0000049	0.006218	3.36	4.47
208	75.6	0.5	0.006213	0.0000108	0.006224	1.54	4.55
209	72.4	-3.6	0.006213	0.0000112	0.006224	1.48	4.62
210	61.0	6.3	0.006213	0.0000133	0.006226	1.25	4.68
188	159.9	-1.1	0.006213	0.0000051	0.006218	3.26	0.16
189	100.0	-0.5	0.006213	0.0000081	0.006221	2.04	0.26
190	1011.7	0.0	0.006213	0.0000008	0.006214	20.63	1.27
191	1188.7	0.0	0.006213	0.0000007	0.006214	24.23	2.46
192	294.6	0.0	0.006213	0.0000028	0.006216	6.01	2.75
193	69.1	-0.5	0.006213	0.0000118	0.006225	1.41	2.82
194	302.9	0.2	0.006213	0.0000027	0.006216	6.18	3.13
195	192.4	-1.0	0.006213	0.0000042	0.006217	3.93	3.32
196	81.0	1.6	0.006213	0.0000100	0.006223	1.65	3.40
197	120.1	0.5	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	3.52
198	68.3	-1.0	0.006213	0.0000119	0.006225	1.40	3.59
199	90.0	-2.1	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	3.68
200	90.3	0.8	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	3.77
201	89.6	-0.8	0.006213	0.0000091	0.006222	1.83	3.86
202	74.9	0.6	0.006213	0.0000109	0.006224	1.53	3.93

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.3: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
203	75.0	-1.8	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	4.01
204	89.9	0.1	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.10
205	120.1	0.8	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	4.22
206	89.9	0.8	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.31
207	164.9	0.7	0.006213	0.0000049	0.006218	3.36	4.47
208	75.6	0.5	0.006213	0.0000108	0.006224	1.54	4.55
209	72.4	-3.6	0.006213	0.0000112	0.006224	1.48	4.62
210	61.0	6.3	0.006213	0.0000133	0.006226	1.25	4.68
211	88.8	-2.6	0.006213	0.0000092	0.006222	1.81	4.77
212	115.3	2.1	0.006213	0.0000071	0.006220	2.35	4.89
213	285.0	-0.3	0.006213	0.0000029	0.006216	5.81	5.17
214	225.0	0.0	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	5.40
215	975.0	0.1	0.006213	0.0000008	0.006214	19.88	6.37
203	75.0	-1.8	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	4.01
204	89.9	0.1	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.10
205	120.1	0.8	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	4.22
206	89.9	0.8	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.31
207	164.9	0.7	0.006213	0.0000049	0.006218	3.36	4.47
208	75.6	0.5	0.006213	0.0000108	0.006224	1.54	4.55
209	72.4	-3.6	0.006213	0.0000112	0.006224	1.48	4.62
210	61.0	6.3	0.006213	0.0000133	0.006226	1.25	4.68
211	88.8	-2.6	0.006213	0.0000092	0.006222	1.81	4.77
212	115.3	2.1	0.006213	0.0000071	0.006220	2.35	4.89
213	285.0	-0.3	0.006213	0.0000029	0.006216	5.81	5.17
214	225.0	0.0	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	5.40
215	975.0	0.1	0.006213	0.0000008	0.006214	19.88	6.37
203	75.0	-1.8	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	4.01
204	89.9	0.1	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.10
205	120.1	0.8	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	4.22
206	89.9	0.8	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	4.31
207	164.9	0.7	0.006213	0.0000049	0.006218	3.36	4.47
208	75.6	0.5	0.006213	0.0000108	0.006224	1.54	4.55
209	72.4	-3.6	0.006213	0.0000112	0.006224	1.48	4.62
210	61.0	6.3	0.006213	0.0000133	0.006226	1.25	4.68
211	88.8	-2.6	0.006213	0.0000092	0.006222	1.81	4.77
212	115.3	2.1	0.006213	0.0000071	0.006220	2.35	4.89
213	285.0	-0.3	0.006213	0.0000029	0.006216	5.81	5.17
214	225.0	0.0	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	5.40

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.3: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	(ΔP/ΔL)fricc	(ΔP/ΔL)acel	(ΔP/ΔL)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
215	975.0	0.1	0.006213	0.0000008	0.006214	19.88	6.37
216	89.9	-0.4	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	6.46
217	164.9	0.2	0.006213	0.0000049	0.006218	3.36	6.63
218	225.0	-0.1	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	6.85
219	201.1	-0.1	0.006213	0.0000040	0.006217	4.10	7.05
220	329.8	0.2	0.006213	0.0000025	0.006216	6.73	7.38
221	360.0	0.0	0.006213	0.0000023	0.006215	7.34	7.74
222	435.0	0.0	0.006213	0.0000019	0.006215	8.87	8.18
223	180.1	0.2	0.006213	0.0000045	0.006218	3.67	8.36
224	224.9	-0.4	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	8.58
225	240.2	0.1	0.006213	0.0000034	0.006216	4.90	8.82
226	150.0	-0.2	0.006213	0.0000054	0.006218	3.06	8.97
227	194.8	0.1	0.006213	0.0000042	0.006217	3.97	9.17
228	180.1	0.0	0.006213	0.0000045	0.006218	3.67	9.35
229	239.9	-0.3	0.006213	0.0000034	0.006216	4.89	9.59
230	360.2	0.2	0.006213	0.0000023	0.006215	7.35	9.95
231	179.5	-0.4	0.006213	0.0000045	0.006218	3.66	10.13
232	510.0	0.1	0.006213	0.0000016	0.006215	10.40	10.64
233	420.0	0.2	0.006213	0.0000019	0.006215	8.56	11.06
234	75.0	-0.4	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	11.13
216	89.9	-0.4	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	6.46
217	164.9	0.2	0.006213	0.0000049	0.006218	3.36	6.63
218	225.0	-0.1	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	6.85
219	201.1	-0.1	0.006213	0.0000040	0.006217	4.10	7.05
220	329.8	0.2	0.006213	0.0000025	0.006216	6.73	7.38
221	360.0	0.0	0.006213	0.0000023	0.006215	7.34	7.74
222	435.0	0.0	0.006213	0.0000019	0.006215	8.87	8.18
223	180.1	0.2	0.006213	0.0000045	0.006218	3.67	8.36
224	224.9	-0.4	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	8.58
225	240.2	0.1	0.006213	0.0000034	0.006216	4.90	8.82
226	150.0	-0.2	0.006213	0.0000054	0.006218	3.06	8.97
227	194.8	0.1	0.006213	0.0000042	0.006217	3.97	9.17
228	180.1	0.0	0.006213	0.0000045	0.006218	3.67	9.35
229	239.9	-0.3	0.006213	0.0000034	0.006216	4.89	9.59
230	360.2	0.2	0.006213	0.0000023	0.006215	7.35	9.95
231	179.5	-0.4	0.006213	0.0000045	0.006218	3.66	10.13
232	510.0	0.1	0.006213	0.0000016	0.006215	10.40	10.64
233	420.0	0.2	0.006213	0.0000019	0.006215	8.56	11.06

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.3: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
234	75.0	-0.4	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	11.13
235	300.0	0.2	0.006213	0.0000027	0.006216	6.12	11.43
236	120.0	-0.2	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	11.55
237	205.0	0.3	0.006213	0.0000040	0.006217	4.18	11.76
238	390.0	0.2	0.006213	0.0000021	0.006215	7.95	12.15
239	135.0	-0.3	0.006213	0.0000060	0.006219	2.75	12.28
240	540.0	0.2	0.006213	0.0000015	0.006215	11.01	12.82
241	165.0	-0.3	0.006213	0.0000049	0.006218	3.37	12.99
242	270.0	0.3	0.006213	0.0000030	0.006216	5.51	13.26
243	75.0	-0.8	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	13.33
244	195.0	-0.1	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	13.53
245	270.0	0.3	0.006213	0.0000030	0.006216	5.51	13.80
246	195.0	-0.4	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	13.99
247	330.0	-0.2	0.006213	0.0000025	0.006216	6.73	14.32
248	225.0	0.4	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	14.55
249	195.0	-0.3	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	14.74
250	390.0	0.0	0.006213	0.0000021	0.006215	7.95	15.13
251	60.0	0.2	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	15.19
252	90.0	0.4	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	15.28
253	136.0	-0.2	0.006213	0.0000060	0.006219	2.77	15.42
254	420.0	0.0	0.006213	0.0000019	0.006215	8.56	15.84
255	435.0	0.0	0.006213	0.0000019	0.006215	8.87	16.27
256	150.0	0.5	0.006213	0.0000054	0.006218	3.06	16.42
257	60.0	-1.5	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	16.48
258	60.0	0.9	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	16.54
259	165.0	-0.2	0.006213	0.0000049	0.006218	3.37	16.71
260	315.0	0.2	0.006213	0.0000026	0.006216	6.42	17.02
246	195.0	-0.4	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	13.99
247	330.0	-0.2	0.006213	0.0000025	0.006216	6.73	14.32
248	225.0	0.4	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	14.55
249	195.0	-0.3	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	14.74
250	390.0	0.0	0.006213	0.0000021	0.006215	7.95	15.13
251	60.0	0.2	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	15.19
252	90.0	0.4	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	15.28
253	136.0	-0.2	0.006213	0.0000060	0.006219	2.77	15.42
254	420.0	0.0	0.006213	0.0000019	0.006215	8.56	15.84
255	435.0	0.0	0.006213	0.0000019	0.006215	8.87	16.27
256	150.0	0.5	0.006213	0.0000054	0.006218	3.06	16.42

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.3: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
257	60.0	-1.5	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	16.48
258	60.0	0.9	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	16.54
259	165.0	-0.2	0.006213	0.0000049	0.006218	3.37	16.71
260	315.0	0.2	0.006213	0.0000026	0.006216	6.42	17.02
261	75.0	0.2	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	17.10
262	285.0	0.0	0.006213	0.0000029	0.006216	5.81	17.38
263	555.0	0.1	0.006213	0.0000015	0.006215	11.32	17.94
264	60.0	-1.6	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	18.00
265	135.0	0.7	0.006213	0.0000060	0.006219	2.75	18.13
266	195.0	0.1	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	18.33
267	280.0	0.0	0.006213	0.0000029	0.006216	5.71	18.61
268	300.0	-0.1	0.006213	0.0000027	0.006216	6.12	18.91
269	60.0	0.0	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	18.97
270	325.0	0.1	0.006213	0.0000025	0.006216	6.63	19.29
271	60.0	-2.3	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	19.35
272	75.0	-0.6	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	19.43
273	135.0	0.9	0.006213	0.0000060	0.006219	2.75	19.56
274	75.1	-2.1	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	19.64
275	75.0	1.2	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	19.71
276	60.0	0.6	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	19.77
277	67.2	-3.9	0.006213	0.0000121	0.006225	1.37	19.84
278	99.1	2.8	0.006213	0.0000082	0.006221	2.02	19.94
279	300.0	0.1	0.006213	0.0000027	0.006216	6.12	20.24
280	134.0	-0.6	0.006213	0.0000061	0.006219	2.73	20.37
281	120.0	0.7	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	20.49
282	94.1	-1.9	0.006213	0.0000086	0.006222	1.92	20.59
283	153.1	-2.0	0.006213	0.0000053	0.006218	3.12	20.74
284	80.6	6.8	0.006213	0.0000101	0.006223	1.65	20.82
285	80.0	-0.9	0.006213	0.0000102	0.006223	1.63	20.90
286	238.1	-1.3	0.006213	0.0000034	0.006216	4.86	21.14
287	60.2	4.7	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	21.20
288	60.0	1.8	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	21.26
289	75.0	-1.8	0.006213	0.0000108	0.006224	1.53	21.33
290	81.1	-2.8	0.006213	0.0000100	0.006223	1.66	21.42
291	76.2	3.8	0.006213	0.0000107	0.006224	1.56	21.49
292	135.0	-1.1	0.006213	0.0000060	0.006219	2.76	21.63
293	60.0	1.9	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	21.69
294	90.0	-1.5	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	21.78

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.3: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
295	119.0	1.3	0.006213	0.0000068	0.006220	2.43	21.90
296	195.0	-0.1	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	22.09
297	180.0	0.2	0.006213	0.0000045	0.006218	3.67	22.27
298	206.0	0.1	0.006213	0.0000039	0.006217	4.20	22.48
299	224.0	0.6	0.006213	0.0000036	0.006217	4.57	22.70
300	265.0	-0.2	0.006213	0.0000031	0.006216	5.40	22.97
301	169.0	-1.2	0.006213	0.0000048	0.006218	3.45	23.14
302	381.0	0.4	0.006213	0.0000021	0.006215	7.77	23.52
303	102.0	-0.6	0.006213	0.0000080	0.006221	2.08	23.62
304	209.0	-0.8	0.006213	0.0000039	0.006217	4.26	23.83
305	279.0	0.7	0.006213	0.0000029	0.006216	5.69	24.11
306	105.0	0.5	0.006213	0.0000077	0.006221	2.14	24.21
307	205.0	-0.2	0.006213	0.0000040	0.006217	4.18	24.42
308	585.0	0.0	0.006213	0.0000014	0.006214	11.93	25.00
309	250.0	0.2	0.006213	0.0000033	0.006216	5.10	25.25
310	600.0	-0.2	0.006213	0.0000014	0.006214	12.23	25.85
311	180.0	0.7	0.006213	0.0000045	0.006218	3.67	26.03
312	195.0	-0.2	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	26.23
313	270.0	0.1	0.006213	0.0000030	0.006216	5.51	26.50
314	225.0	-0.4	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	26.72
315	60.1	-2.6	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	26.78
316	60.1	2.5	0.006213	0.0000135	0.006227	1.23	26.84
317	205.0	0.3	0.006213	0.0000040	0.006217	4.18	27.05
318	225.0	-0.2	0.006213	0.0000036	0.006217	4.59	27.27
319	405.0	0.2	0.006213	0.0000020	0.006215	8.26	27.68
320	245.0	-0.3	0.006213	0.0000033	0.006216	5.00	27.92
321	132.0	-0.5	0.006213	0.0000062	0.006219	2.69	28.05
322	84.2	-3.7	0.006213	0.0000097	0.006223	1.72	28.14
323	66.1	-2.6	0.006213	0.0000123	0.006225	1.35	28.20
324	77.1	3.3	0.006213	0.0000105	0.006224	1.57	28.28
325	105.0	-0.2	0.006213	0.0000077	0.006221	2.14	28.39
326	70.1	2.9	0.006213	0.0000116	0.006225	1.43	28.46
327	234.0	0.3	0.006213	0.0000035	0.006217	4.77	28.69
328	105.0	1.1	0.006213	0.0000077	0.006221	2.14	28.79
329	120.0	-0.3	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	28.91
330	101.0	-0.2	0.006213	0.0000080	0.006221	2.06	29.02
331	77.3	-4.8	0.006213	0.0000105	0.006224	1.58	29.09
332	105.2	3.4	0.006213	0.0000077	0.006221	2.15	29.20

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

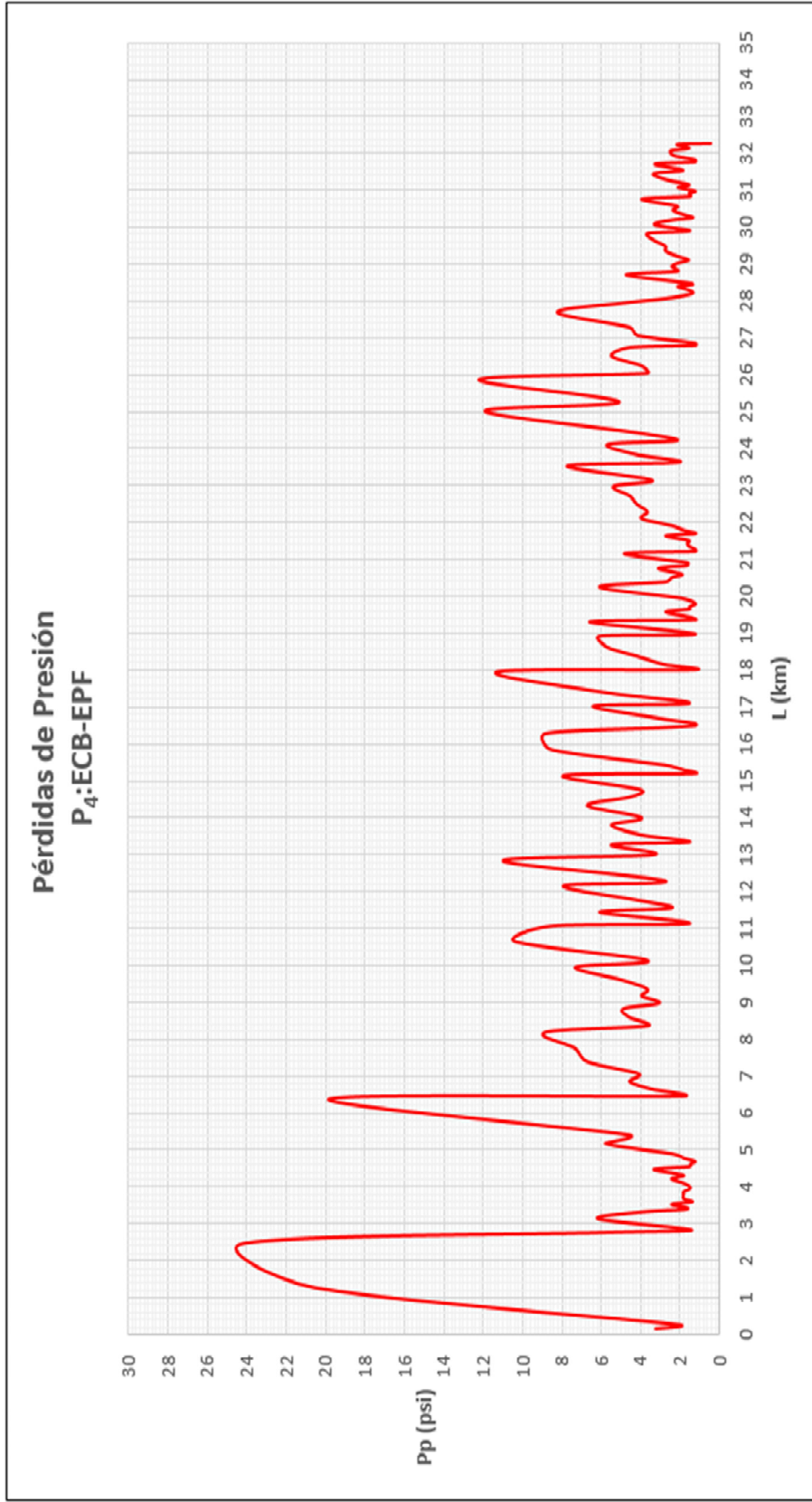
ANEXO 1.3: CONTINUACIÓN

	Lpipes	Ángulo	($\Delta P/\Delta L$)fricc	($\Delta P/\Delta L$)acel	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP	Ltotal
	m	°	psi/ft	psi/ft	psi/ft	psi	km
333	135.0	0.3	0.006213	0.0000060	0.006219	2.75	29.33
334	135.0	0.7	0.006213	0.0000060	0.006219	2.75	29.47
335	165.0	0.1	0.006213	0.0000049	0.006218	3.37	29.63
336	180.0	-0.4	0.006213	0.0000045	0.006218	3.67	29.81
337	74.2	-3.9	0.006213	0.0000110	0.006224	1.51	29.89
338	162.1	2.2	0.006213	0.0000050	0.006218	3.31	30.05
339	120.0	-0.3	0.006213	0.0000068	0.006220	2.45	30.17
340	67.0	0.4	0.006213	0.0000121	0.006225	1.37	30.24
341	90.0	-0.5	0.006213	0.0000090	0.006222	1.84	30.33
342	117.3	-4.0	0.006213	0.0000069	0.006220	2.39	30.44
343	105.3	4.6	0.006213	0.0000077	0.006221	2.15	30.55
344	195.0	-0.1	0.006213	0.0000042	0.006217	3.98	30.74
345	73.0	-1.0	0.006213	0.0000111	0.006224	1.49	30.82
346	76.0	-0.6	0.006213	0.0000107	0.006224	1.55	30.89
347	61.0	2.3	0.006213	0.0000133	0.006226	1.25	30.95
348	104.1	-2.4	0.006213	0.0000078	0.006221	2.12	31.06
349	76.0	1.9	0.006213	0.0000107	0.006224	1.55	31.13
350	134.0	0.7	0.006213	0.0000061	0.006219	2.73	31.27
351	165.0	0.5	0.006213	0.0000049	0.006218	3.37	31.43
352	91.0	-0.1	0.006213	0.0000089	0.006222	1.86	31.52
353	162.0	0.3	0.006213	0.0000050	0.006218	3.30	31.69
354	61.0	-0.8	0.006213	0.0000133	0.006226	1.25	31.75
355	61.0	0.6	0.006213	0.0000133	0.006226	1.25	31.81
356	113.7	-6.5	0.006213	0.0000071	0.006220	2.32	31.92
357	122.6	5.5	0.006213	0.0000066	0.006220	2.50	32.04
358	76.1	-2.6	0.006213	0.0000107	0.006224	1.55	32.12
359	106.1	2.1	0.006213	0.0000077	0.006221	2.16	32.23
360	22.3	9.3	0.006213	0.0000365	0.006250	0.46	32.25

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 1.3: GRAFICO DE PERDIDAS DE PRESION P₄: ECB-EPF



Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loo.

ANEXO No 2

**DETERMINACIÓN DEL COLGAMIENTO CON Y SIN
RESBALAMIENTO, REGÍMENES DE FLUJO Y PÉRDIDAS
DE PRESIÓN DE FLUJO BIFÁSICO**

ANEXO 2.1: P₁, TRAMO APAIKA-JUNIÓN NA

Patrón de Flujo	Límites					
	AI		L	NFR		L
Distribuido	0.233	< 0.4		0.336	≥	203.572
	0.233	≥ 0.4		0.336	>	9114.284
Intermitente	0.01 ≤	0.233 < 0.4	L3	0.828 <	0.336 ≤	203.572
		0.233 ≥ 0.4	L3	0.828 <	0.336 ≤	9114.284
Segregado		0.233 < 0.01		0.336 <		203.572
		0.233 ≥ 0.01		0.336 <	0.034	L2
Transitorio		0.233 ≥ 0.01	L2	0.034 <	0.336 <	0.828

Transitorio	
I.	$H_j = \frac{0,845 \lambda_j^{0,5331}}{N_{FR}^{0,0173}} = 0.396$
S.	$H_j = \frac{0,98 \lambda_j^{0,4846}}{N_{FR}^{0,0868}} = 0.532$
$H_j = A * H_{j(\text{segregado})} + (1-A) * H_{j(\text{intermitente})} = 0.480$	
$A = \frac{L_3 - N_{FR}}{L_3 - L_2} = 0.620$	

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 2.2: P₃, TRAMO UNIÓN AN-ECB

Patrón de Flujo	Límites					
	AI		L	NFR		L
Distribuido	0.210	< 0.4		0.642	≥	197.119 L1
	0.210	≥ 0.4		0.642	>	18700.995 L4
Intermitente	0.01 ≤ 0.210	< 0.4	L3	0.966 < 0.642	≤	197.119 L1
	0.210	≥ 0.4	L3	0.966 < 0.642	≤	18700.995 L4
Segregado	0.210	< 0.01		0.642	<	197.119 L1
	0.210	≥ 0.01		0.642	<	0.044 L2
Transitorio	0.210	≥ 0.01	L2	0.044 < 0.642	<	0.966 L3

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Transitorio
<p>I. $H_I = \frac{0,845\lambda_f^{0,5331}}{N_{FR}^{0,0173}} = 0.370$</p>
<p>S. $H_I = \frac{0,98\lambda_f^{0,4846}}{N_{FR}^{0,0868}} = 0.478$</p>
<p>$H_I = A * H_{I(\text{segregado})} + (1-A) * H_{I(\text{intermitente})} = 0.408$</p>
<p>$A = \frac{L_3 - N_{FR}}{L_3 - L_2} = 0.351$</p>

ANEXO 2.3: P₄, TRAMO ECB-EPF

Patrón de Flujo	Límites					
	AI		L	NFR		L
Distribuido	0.210	<0.4		0.150	≥	197.119 L1
	0.210	≥0.4		0.150	>	18700.995 L4
Intermitente	0.01 ≤ 0.210	<0.4	L3	0.966 < 0.150	≤	197.119 L1
	0.210	≥0.4	L3	0.966 < 0.150	≤	18700.995 L4
Segregado	0.210	< 0.01		0.150	<	197.119 L1
	0.210	≥ 0.01		0.150	<	0.044 L2
Transitorio	0.210	≥0.01	L2	0.044 < 0.150	<	0.966 L3

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

Transitorio
<p>I. $H_I = \frac{0,845 \lambda_y^{0,5331}}{N_{FR}^{0,0173}} = 0.380$</p>
<p>S. $H_I = \frac{0,98 \lambda_y^{0,4846}}{N_{FR}^{0,0868}} = 0.542$</p>
<p>$H_I = A * H_{I(\text{segregado})} + (1-A) * H_{I(\text{intermitente})} = 0.523$</p>
<p>$A = \frac{L_3 - N_{FR}}{L_3 - L_2} = 0.885$</p>

ANEXO 2.4: CÁLCULO PÉRDIDAS DE PRESIÓN P₁ FLUJO BIFÁSICO

	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP		($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP
	psi/ft	psi		psi/ft	psi
1	0.12985	29.00	39	0.12987	25.69
2	0.12980	37.47	40	0.12977	44.35
3	0.12974	57.48	41	0.12987	25.67
4	0.12977	44.71	42	0.12982	31.96
5	0.12982	31.95	39	0.12987	25.69
6	0.12987	25.57	40	0.12977	44.35
7	0.12977	44.71	41	0.12987	25.67
8	0.12974	56.19	42	0.12982	31.96
9	0.12985	28.97			
10	0.12977	44.71			
11	0.12979	38.32			
12	0.12987	25.57			
13	0.12977	44.70			
14	0.12971	76.60			
15	0.12970	82.98			
16	0.12968	127.63			
17	0.12974	57.51			
18	0.12979	38.35			
19	0.12987	25.57			
20	0.12973	63.84			
21	0.12982	31.95			
22	0.12973	63.84			
23	0.12971	76.25			
24	0.12973	63.88			
25	0.12979	38.42			
26	0.12982	32.00			
27	0.12977	44.75			
28	0.12971	76.21			
29	0.12972	70.26			
30	0.12979	38.37			
31	0.12970	83.04			
32	0.12977	44.77			
33	0.12975	51.08			
34	0.12987	25.57			
35	0.12987	25.59			
36	0.12975	50.66			
37	0.12969	95.77			
38	0.12974	57.09			

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 2.5: CÁLCULO PÉRDIDAS DE PRESIÓN P₃ FLUJO BIFÁSICO

	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP		($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP		($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP
	psi/ft	psi		psi/ft	psi		psi/ft	psi
43	0.235875	104.50	81	0.235964	69.83	119	0.235943	75.97
44	0.235903	90.66	82	0.236099	46.49	120	0.236093	47.29
45	0.235810	164.79	83	0.235965	69.76	121	0.235887	98.29
46	0.236019	58.14	84	0.236019	58.08	122	0.235965	69.68
47	0.236019	58.09	85	0.235965	69.68	123	0.235965	69.68
48	0.235843	127.68	86	0.235891	96.19	124	0.235898	92.87
49	0.235781	220.70	87	0.235857	116.07	125	0.235843	127.25
50	0.235857	116.08	88	0.235853	119.42	126	0.235763	278.47
51	0.235877	103.72	89	0.235946	75.09	127	0.235797	185.67
52	0.235965	69.68	90	0.235897	93.02	128	0.235857	116.10
53	0.236019	58.08	91	0.235965	69.68	129	0.236019	58.11
54	0.235965	69.68	92	0.235965	69.77	130	0.235898	92.87
55	0.236099	46.49	93	0.235875	104.54	131	0.235965	69.72
56	0.235809	165.57	94	0.235831	138.50	132	0.235898	92.88
57	0.235811	162.49	95	0.236098	46.61	133	0.235811	162.64
58	0.236014	58.90	96	0.235804	174.07	134	0.235928	80.68
59	0.235916	85.26	97	0.235897	93.09	135	0.235918	84.47
60	0.235995	62.76	98	0.235875	104.48	136	0.235978	66.58
61	0.235725	639.59	99	0.235875	104.57	137	0.236099	46.52
62	0.236093	47.25	100	0.236099	46.53	138	0.235965	69.68
63	0.235951	73.62	101	0.235927	81.28	139	0.236100	46.48
64	0.235766	266.87	102	0.235928	80.69	140	0.236006	60.52
65	0.235964	69.88	103	0.235927	81.27	141	0.235974	67.36
66	0.235820	150.89	104	0.236019	58.08	142	0.235875	104.48
67	0.235811	162.47	105	0.236099	46.49	143	0.235857	116.14
68	0.235843	127.68	106	0.235857	116.09	144	0.235834	135.40
69	0.235964	69.87	107	0.235747	368.16	145	0.236098	46.61
70	0.235924	82.05	108	0.235926	81.61	146	0.235857	116.10
71	0.235761	289.30	109	0.235857	116.07	147	0.235964	69.84
72	0.236019	58.09	110	0.235875	104.55	148	0.236099	46.49
73	0.235967	69.07	111	0.235968	68.95	149	0.235968	68.96
74	0.235857	116.17	112	0.236100	46.48	150	0.236100	46.48
75	0.235869	108.34	113	0.236100	46.48	151	0.236018	58.17
76	0.235791	197.27	114	0.235898	92.88	152	0.235927	81.30
77	0.235965	69.68	115	0.236099	46.49	153	0.236019	58.08
78	0.235797	185.67	116	0.235898	92.88	154	0.235965	69.68
79	0.235843	127.79	117	0.235927	81.27	155	0.236099	46.55
80	0.236019	58.08	118	0.236019	58.08	156	0.236099	46.56

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 2.5: CONTINUACIÓN

	$(\Delta P/\Delta L)$ total	ΔP
	psi/ft	psi
157	0.236099	46.52
158	0.235909	87.90
159	0.235979	66.15
160	0.236093	47.19
161	0.236095	47.07
162	0.236099	46.55
163	0.236099	46.50
164	0.236096	46.87
165	0.236096	46.93
166	0.236096	46.94
167	0.236018	58.24
168	0.235999	61.96
169	0.235922	82.85
170	0.235898	92.88
171	0.235965	69.74
172	0.236099	46.55
173	0.235965	69.68
174	0.235875	104.47
175	0.235831	139.28
176	0.235840	130.00
177	0.235831	139.30
178	0.235814	158.62
179	0.236100	46.48
180	0.235811	162.47
181	0.236019	58.08
182	0.235736	464.05
183	0.235875	104.47
184	0.235856	116.85
185	0.235800	179.48
186	0.235959	71.26
187	0.235740	429.25

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 2.6: CÁLCULO PÉRDIDAS DE PRESIÓN P₄ FLUJO BIFÁSICO

	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP		($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP		($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP
	psi/ft	psi		psi/ft	psi		psi/ft	psi
188	0.046595	24.45	195	0.046585	29.41	233	0.046558	64.16
189	0.046632	15.30	196	0.046654	12.40	234	0.046664	11.48
190	0.046544	154.49	197	0.046616	18.37	235	0.046567	45.83
191	0.046543	181.51	198	0.046677	10.46	236	0.046616	18.35
192	0.046568	45.01	199	0.046643	13.77	237	0.046582	31.33
193	0.046675	10.58	200	0.046642	13.82	238	0.046560	59.57
194	0.046567	46.28	201	0.046643	13.71	239	0.046607	20.64
195	0.046585	29.41	202	0.046664	11.47	240	0.046553	82.48
196	0.046654	12.40	203	0.046664	11.49	241	0.046594	25.22
197	0.046616	18.37	204	0.046643	13.76	242	0.046571	41.25
198	0.046677	10.46	205	0.046615	18.37	243	0.046664	11.48
199	0.046643	13.77	206	0.046643	13.76	244	0.046584	29.80
200	0.046642	13.82	207	0.046594	25.21	245	0.046571	41.25
201	0.046643	13.71	208	0.046663	11.57	246	0.046584	29.80
202	0.046664	11.47	209	0.046669	11.09	247	0.046564	50.41
203	0.046664	11.49	210	0.046694	9.34	248	0.046578	34.38
204	0.046643	13.76	211	0.046644	13.59	249	0.046584	29.80
205	0.046615	18.37	212	0.046619	17.63	250	0.046560	59.57
206	0.046643	13.76	213	0.046569	43.54	251	0.046696	9.19
207	0.046594	25.21	214	0.046578	34.38	252	0.046643	13.77
208	0.046663	11.57	215	0.046545	148.89	253	0.046606	20.80
209	0.046669	11.09	216	0.046643	13.76	254	0.046558	64.15
210	0.046694	9.34	217	0.046594	25.21	255	0.046557	66.44
211	0.046644	13.59	218	0.046578	34.38	256	0.046599	22.93
212	0.046619	17.63	219	0.046583	30.73	257	0.046696	9.20
213	0.046569	43.54	220	0.046564	50.38	258	0.046696	9.19
214	0.046578	34.38	221	0.046562	54.99	259	0.046594	25.22
215	0.046545	148.89	222	0.046557	66.44	260	0.046566	48.12
216	0.046643	13.76	223	0.046589	27.53	261	0.046664	11.48
217	0.046594	25.21	224	0.046578	34.37	262	0.046569	43.54
218	0.046578	34.38	225	0.046575	36.70	263	0.046552	84.77
188	0.046595	24.45	226	0.046599	22.93	264	0.046696	9.20
189	0.046632	15.30	227	0.046585	29.77	265	0.046607	20.64
190	0.046544	154.49	228	0.046589	27.53	266	0.046584	29.80
191	0.046543	181.51	229	0.046575	36.66	267	0.046569	42.78
192	0.046568	45.01	230	0.046562	55.02	268	0.046567	45.83
193	0.046675	10.58	231	0.046589	27.44	269	0.046696	9.19
194	0.046567	46.28	232	0.046554	77.90	270	0.046565	49.65

Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO 2.6: CONTINUACIÓN

	($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP		($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP		($\Delta P/\Delta L$)total	ΔP
	psi/ft	psi		psi/ft	psi		psi/ft	psi
271	0.046696	9.20	309	0.046574	38.20	347	0.046694	9.35
272	0.046664	11.48	310	0.046551	91.64	348	0.046628	15.92
273	0.046607	20.65	311	0.046589	27.51	349	0.046662	11.64
274	0.046664	11.49	312	0.046584	29.80	350	0.046607	20.49
275	0.046664	11.48	313	0.046571	41.25	351	0.046594	25.22
276	0.046696	9.19	314	0.046578	34.38	352	0.046641	13.93
277	0.046679	10.28	315	0.046696	9.20	353	0.046595	24.77
278	0.046633	15.16	316	0.046696	9.20	354	0.046694	9.35
279	0.046567	45.83	317	0.046582	31.33	355	0.046694	9.35
280	0.046607	20.49	318	0.046578	34.38	356	0.046620	17.40
281	0.046616	18.35	319	0.046559	61.86	357	0.046614	18.74
282	0.046638	14.39	320	0.046574	37.44	358	0.046662	11.65
283	0.046598	23.41	321	0.046608	20.19	359	0.046626	16.23
284	0.046655	12.33	322	0.046650	12.88	360	0.046970	3.44
285	0.046656	12.25	323	0.046682	10.12			
286	0.046575	36.38	324	0.046660	11.81			
287	0.046696	9.22	325	0.046627	16.06			
288	0.046696	9.20	326	0.046673	10.73			
289	0.046664	11.49	327	0.046576	35.76			
290	0.046654	12.41	328	0.046627	16.07			
291	0.046662	11.66	329	0.046616	18.35			
292	0.046607	20.65	330	0.046631	15.45			
293	0.046696	9.20	331	0.046660	11.83			
294	0.046642	13.78	332	0.046627	16.09			
295	0.046616	18.20	333	0.046607	20.64			
296	0.046584	29.80	334	0.046607	20.64			
297	0.046589	27.51	335	0.046594	25.22			
298	0.046582	31.48	336	0.046589	27.51			
299	0.046578	34.23	337	0.046666	11.36			
300	0.046571	40.49	338	0.046595	24.78			
301	0.046592	25.84	339	0.046616	18.35			
302	0.046560	58.20	340	0.046680	10.26			
303	0.046630	15.61	341	0.046643	13.77			
304	0.046581	31.94	342	0.046617	17.94			
305	0.046570	42.63	343	0.046627	16.11			
306	0.046627	16.06	344	0.046584	29.80			
307	0.046582	31.33	345	0.046668	11.18			
308	0.046551	89.35	346	0.046662	11.64			

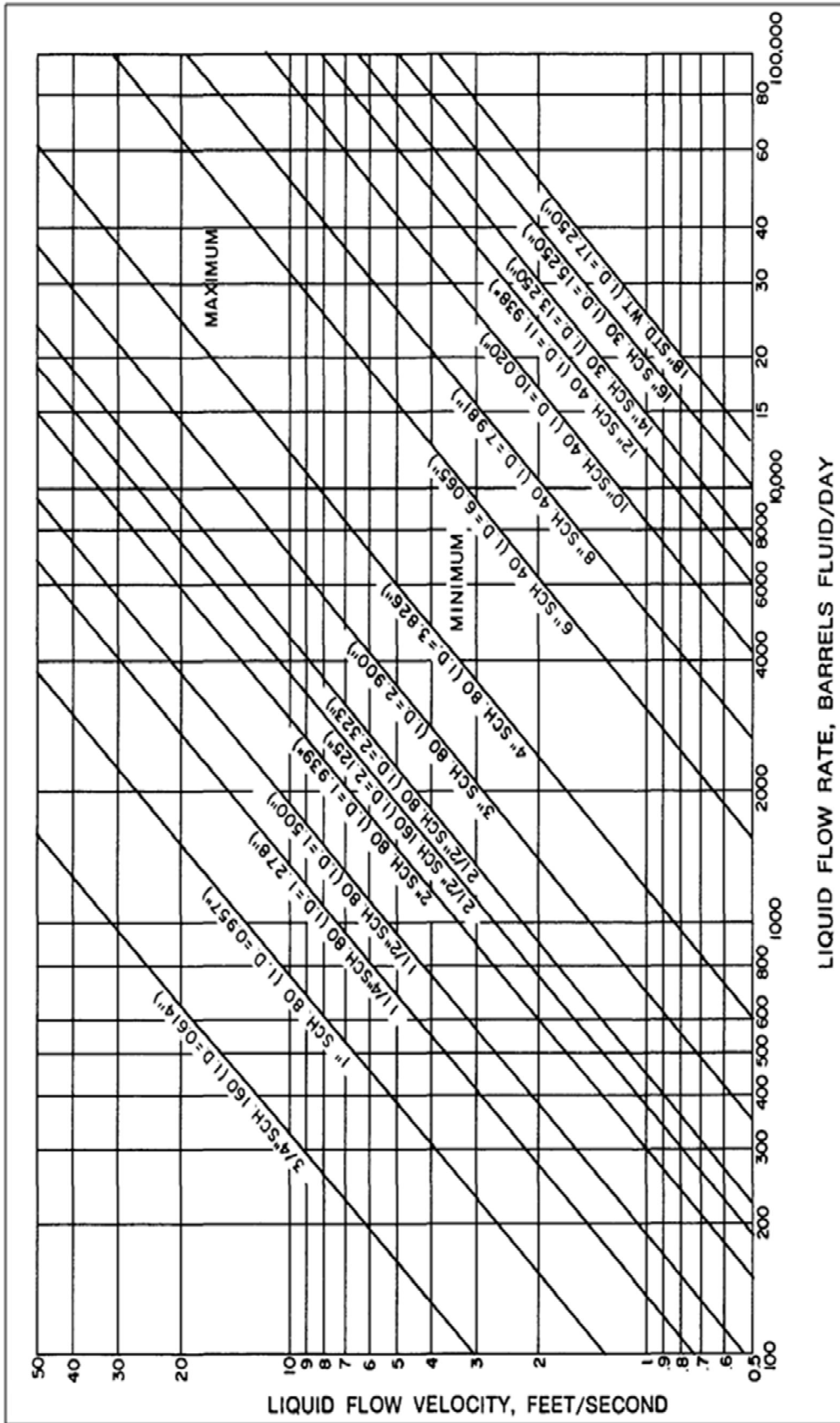
Fuente: Excel.

Elaboración: Luis Barreno y Robert Loor.

ANEXO No 3

**GRÁFICAS DE LA NORMA API RP 14E PARA EL DISEÑO
DE TUBERÍAS FLUJO MONOFÁSICO**

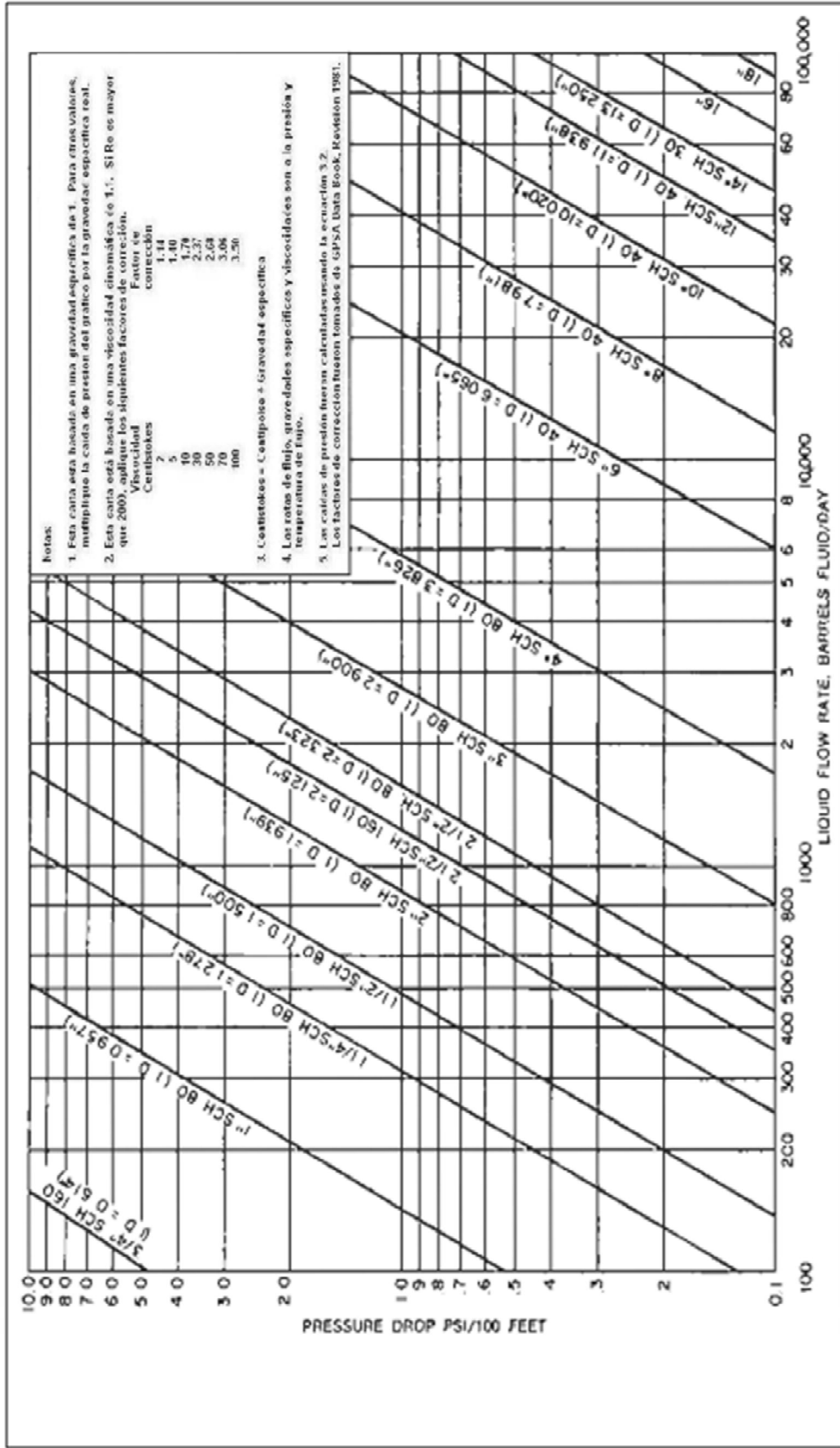
ANEXO 3.1: VELOCIDAD EN LÍNEAS DE LÍQUIDO, CONSIDERANDO EL CAUDAL PRODUCIDO, API RP 14E



LIQUID FLOW RATE, BARRELS FLUID/DAY

Fuente: Surface production operations, design of oil handling systems and facilities, 1998.

ANEXO 3.2: PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN LÍNEAS DE LÍQUIDO, CONSIDERANDO EL CAUDAL PRODUCIDO, API RP 14E



Fuente: Surface production operations, design of oil handling systems and facilities, 1998.