

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE LIMPIEZA PARA GASODUCTO.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Presentado por los Bachilleres:

Cote C., Hebert J.

Yépez R., María A.

Para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE
LIMPIEZA PARA GASODUCTO.**

Tutor académico: Prof. Johane Bracamonte

Tutor industrial: Ing. José Márquez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Presentado por los Bachilleres:

Cote C., Hebert J.

Yépez R., María A.

Para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2015



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA

Caracas, 04 de Noviembre de 2015

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

María Yezpez y Hebert Cote

Titulado

"Selección y Evaluación de Herramientas de Limpieza para Gasoductos"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de: *Ingeniero Mecánica*



Prof. Tibisay Zambrano
Jurado



Prof. Johane Bracamonte
Tutor



Prof. Fabian Flores
Jurado

Cote C., Hebert J.
Yépez R., María Á.

SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE LIMPIEZA PARA GASODUCTO

Tutor académico: Prof. Johane Bracamonte. Tutor industrial: Ing. José Márquez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2015, 111p.

Palabras clave: Herramienta de Limpieza (HDL), Gasoducto, Parámetros, Olga, Simulación transitoria.

RESUMEN

Dentro de la industria de producción de gas se han desarrollado una serie de herramientas de limpieza (HDL) con el fin de mantener una operación continua, reducir los problemas operacionales y por ende aumentar la eficiencia en el sistema de tuberías. Elegir el tipo de herramienta correcto es fundamental para obtener un proceso de limpieza de la tubería adecuado. Para ello, se realizó una selección de herramientas de limpieza a través de una metodología matricial que consideró factores relacionados con el fluido, la tubería y la herramienta.

Predecir el comportamiento de estas herramientas no es fácil, por lo que es necesario hacer un estudio fluido dinámico para determinar cuáles parámetros influyen en el proceso de corrida, con el propósito de obtener resultados que se ajusten más a la realidad. El simulador de tubería comercial OLGA fue el utilizado en este trabajo de investigación, resultando ser una herramienta útil para estimar el comportamiento fluidodinámico de la HDL seleccionada. Los factores de fugas, la fuerza de fricción estática, la masa de la HDL, el factor de fricción de pared y las fuerzas de resistencia lineal y cuadrática, fueron algunos de los parámetros estudiados. El cálculo de estos parámetros se basó en una investigación bibliográfica exhaustiva, en la experiencia de los tutores y en el criterio de los investigadores.

**Cote C., Hebert J.
Yépez R., María Á.**

SELECTION AND EVALUATION OF PIG FOR A GAS PIPELINE

Academic Tutor: Prof. Johane Bracamonte. Industrial Tutor: Ing José Márquez. Thesis. Caracas, UCV School of Engineering. School of Mechanical Engineering. 2015, 111p.

Keywords: Pipeline inspection gauge (PIG), pipeline, parameters, OLGA, transient simulation.

ABSTRACT

In the gas production industry have been developed different cleaning tools (PIGs) in order to maintain continuous operations, reduce operational problems and thus increase pipeline system efficiency. The selection process of tool is essential to obtain a adequate pigging operation. Therefore, a tool was selected using a matrix selection methodology that considered different factors associated with fluid, pipeline and tool.

To predict the behavior of these tools is not easy, thus it is necessary to performance a fluid dynamic study to determine what parameters influence the pigging operation, in order to get results more in line with reality. The commercial simulator OLGA was used in this study, proving to be a useful tool to estimate the fluid dynamic behavior of the selected PIG tool. Some of the parameters, such as : Leak factors, the static friction force, the mass of PIG, the wall friction factor and the linear and quadratic resistance forces were studied. The calculation of these parameters were based on a comprehensive literature research, the experience of tutors and researchers criteria.

DEDICATORIA

Este trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico está dedicado a toda mi familia, a mis compañeros y a todas aquellas personas que estuvieron de alguna u otra forma apoyándome durante este proceso. Especialmente a mi madre, Gladys Castro.

El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad (Víctor Hugo 1802-1885).

Cote Castro, Hebert Jesús.

DEDICATORIA

Primeramente a Dios, creador de todos y de todo. Por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente para lograr mis objetivos.

A mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida. En especial a mis padres, por apoyarme y creer en mí.

Muy especialmente a mi abuela Carmen Narváez, por los ejemplos de perseverancia y por tu amor infinito. Este triunfo es más tuyo que mío.

A mi sobrino Miguel Eduardo, por llenar de inocencia y amor puro mis días. Espero que este logro que hoy alcanzo en mi vida te pueda dar un ejemplo para que alcances tus sueños.

Yépez Rodríguez, María de los Ángeles

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios, por habernos dado al sabiduría y fortaleza para que fuera posible alcanzar este triunfo.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, “la casa que vence la sombra” por abrir nuestros horizontes, elevar nuestros valores morales y dejarnos contribuir con un mejor desempeño en la humanidad. Por permitirnos estudiar la carrera deseada y vivir innumerables experiencias, tanto académicas como personales.

A nuestro tutor académico el Ing. Johane Bracamonte e industrial el Ing. José Márquez, por su apoyo, consejos, aportes y transmisión de conocimientos, así como su paciencia al guiarnos durante el desarrollo de este trabajo de grado.

Al Ing. Luis Pérez, por brindarnos la oportunidad de recurrir a sus conocimientos durante el desarrollo de esta investigación.

Y finalmente, a nuestros compañeros de clase, quienes nos brindaron su amistad, apoyo y contribuyeron de alguna u otra manera en el desarrollo de nuestra carrera. Sin ustedes no hubiese sido posible alcanzar esta meta.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
SELECTION AND EVALUATION OF PIG FOR A GAS PIPELINE.....	v
ABSTRACT.....	v
DEDICATORIA	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
TABLA DE CONTENIDO.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABLAS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
1. Fundamentos de la investigación.	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Antecedentes de la investigación.....	5
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general	10
.Desarrollar una metodología para seleccionar y evaluar una herramienta de limpieza para gasoducto.	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	10

CAPÍTULO II	11
2 Marco Teórico	11
2.1 Historia de la corrida de herramientas	11
2.2 Definición de herramienta de limpieza.....	12
2.3 Usos de las herramientas de limpieza.....	12
2.4 Tipos de herramientas de limpieza.....	13
2.5 Metodología de la corrida de herramientas	17
2.6 Parámetros que intervienen en la operación.....	20
2.6.1 Tiempo de corrida	20
2.6.2 Velocidad de la herramienta.....	20
2.6.3 Velocidad promedio	20
2.6.4 Eficiencia de barrido.....	21
2.6.5 Efecto de la presión	21
2.6.6 Efecto de las fugas alrededor de la herramienta.....	21
2.6.7 Efecto del líquido delante de la herramienta	21
2.7 Principio de propulsión de una herramienta de limpieza	22
2.8 Fuerza de fricción estática	22
2.9 Factor de fricción de pared.....	23
2.10 Factor de resistencia lineal y cuadrática.....	24
2.11 Factor de fuga.....	24
2.12 Transferencia de calor	26

2.12.1	Números adimensionales relacionados con el análisis de la transferencia de calor	26
2.12.2	Correlaciones empíricas para el cálculo del coeficiente convectivo	28
2.13	Definición de flujo bifásico	34
2.14	Simulador OLGA	37
CAPÍTULO III		43
3.	Marco Metodológico	43
3.1	Revisión bibliográfica	44
3.2	Definición de la matriz de selección - Método de ponderación de criterios y soluciones	44
3.3	Descripción del diseño de la HDL seleccionada	49
3.4	Calculo de los parámetros asociados a la HDL	49
3.5	Simulación fluido dinámica transitoria con Olga	51
3.5.2	Metodología del proceso de simulación	52
El proceso de simulación en general estará sujeto a las siguientes premisas:		52
3.5.2.1	Acumulación de líquido en la tubería.....	52
3.5.2.2	Caso base	52
3.5.3	Elaboración del grupo de propiedades de transporte del fluido generado por el simulador PVTsim.	56
3.5.4	Generación de la geometría y propiedades de la tubería.....	58
3.5.5	Imposición de condiciones de borde y modelo físico	58
CAPÍTULO IV		61

4. RESULTADOS	61
4.1 Resultados del proceso de selección matricial	61
4.2 Resultados del proceso de cálculo de los parámetros asociados a la HDL y la transferencia de calor.....	63
4.3 Resultados de proceso de simulación.....	64
4.3.1 Resultados para la simulación de acumulación de líquido en la tubería.....	64
4.3.2 Resultados para la simulación del caso base.....	70
4.3.3 Resultados de los estudios paramétricos	76
4.3.3.1 Factores de fuga	76
4.3.3.2 Fuerza Estática- Masa de la HDL	80
Este análisis evidencia que la fuerza de fricción estática y por ende la masa de la herramienta no es un parámetro que afecte en gran magnitud el comportamiento de la corrida de herramienta. Siendo la variable mayor impactada el flujo instantáneo que llega a la instalación receptora.	84
4.3.3.3 Factor de Fricción de Pared.....	84
4.3.3.4 Fuerza de resistencia lineal	88
4.3.3.5 Fuerza de resistencia cuadrática.....	91
4.3.3.6 Variación del Flujo másico	97
CAPÍTULO V	102
5. Conclusiones y recomendaciones	102
5.1 Conclusiones	102
5.2 Recomendaciones:.....	103

BIBLIOGRAFÍA	104
APÉNDICES.....	106
Apéndice A – Cálculos asociados a los parámetros de la HDL.....	106
Apéndice B- Cálculos del gap.....	110
Apéndice C – Ángulos de inclinación de la tubería.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Herramienta de limpieza en una línea de tubería	4
Figura 2: HDL tipo esfera. Imagen obtenida de PPSA	14
Figura 3: HDL tipo bala. Imagen obtenida de PPSA	14
Figura 4: HDL tipo mandril. Imagen obtenida de PPSA	15
Figura 5: HDL sólida. Imagen obtenida de PPSA	15
Figura 6: Herramientas inteligentes en línea. Imagen obtenida de PPSA.....	16
Figura 7: HDL tipo gel. Imagen obtenida de PPSA.....	16
Figura 8: Esquema de un lanzador	17
Figura 9: Ejemplo de lanzadores.....	17
Figura 10: Esquema de un receptor.....	18
Figura 11: Recepción de herramientas. Imagen obtenida de PPSA.....	18
Figura 12: Instalación receptora. Imagen obtenida de www.houstonvessel.com .	19
Figura 13: Coeficiente convectivo interno	30
Figura 14: Transferencia de calor a través de circuitos térmicos equivalentes.....	32
Figura 15: Transferencia de calor para sistemas combinados.....	33
Figura 16: Patrones de flujo en tubería horizontal. Imagen obtenida de Gómez (2010).....	36
Figura 17: Patrones de flujo en tubería horizontal. Imagen obtenida de Gómez (2010).....	37
Figura 18: Representación de la discretización de la tubería.....	42

Figura 19: Esquema de la metodología planteada.....	44
Figura 20: Plano de la HDL metálica.....	49
Figura 21: Flujo de trabajo en el simulador comercial OLGA. Imagen obtenida de Pérez (2015)	51
Figura 22: Condiciones de borde o frontera para el Caso Base	53
Figura 23: Transferencia de calor de caso en estudio	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones del recurso computacional disponible.....	51
Tabla 2: Parámetros de simulación para el caso base	52
Tabla 3: Parámetros de simulación para los Factores de Fuga	54
Tabla 4: Parámetros de simulación para a fuerza estática-Masa de la HDL.....	54
Tabla 5: Parámetros de simulación para el Factor de fricción de pared	54
Tabla 6: Parámetros de simulación para la Fuerza de resistencia lineal	55
Tabla 7: Parámetros de simulación para la Fuerza de resistencia cuadrática	55
Tabla 8: Parámetros de simulación para la Variación del Flujo másico	56
Tabla 9: Propiedades del fluido a presión y temperatura estándar.....	57
Tabla 10: Composición del fluido de trabajo	57
Tabla 11: Matriz de restricciones	61
Tabla 12: Matriz de selección	62
Tabla 13: Valores de Temperatura para el Caso Base	74
Tabla 14: Valores de Temperatura para la Variación de las Fugas.....	78
Tabla 15: Valores de Eficiencia para la Variación de las Fugas.....	79
Tabla 16: Valores de Temperatura para la Variación de la Fuerza Estática-Masa de la HDL.....	82
Tabla 17: Valores de Eficiencia para la Variación de la Fuerza Estática-Masa de la HDL	84
Tabla 18: Valores de Temperatura para la Variación del Factor de Fricción de pared.....	86

Tabla 19: Valores de Eficiencia para la Fuerza de Fricción de pared.....	87
Tabla 20: Valores de Temperatura para la Variación de la Fuerza de Resistencia Lineal.....	90
Tabla 21: Valores de Eficiencia para la Variación de la Fuerza de Resistencia Lineal.....	91
Tabla 22: Valores de Temperatura para la Variación de la Fuerza de Resistencia Cuadrática	95
Tabla 23: Valores de Eficiencia para la Variación de la Fuerza de Resistencia Cuadrática	97
Tabla 24: Valores de Temperatura para la Variación del Flujo Másico	99
Tabla 25: Valores de Eficiencia para la Variación del Flujo Másico	101

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

A_g :	Área de gap	m
A_t :	Área de la tubería	m
A_e :	Área externa de la tubería	m
A_i :	Área interna de la tubería	m
A_{tg} :	Área transversal al flujo de gas	m
ΔP_{HDL} :	Caída de presión en la HDL	Pa
C_p :	Calor específico del fluido	W/m. $^{\circ}$ C
Q :	Caudal volumétrico	m ³ /s
\bar{h}_i :	Coefficiente convectivo promedio interno	W/m ² . $^{\circ}$ C
\bar{h}_e :	Coefficiente convectivo promedio externo	W/m ² . $^{\circ}$ C
C_D :	Coefficiente de arrastre	(-)
c_f :	Coefficiente de fuga	(-)
f_e :	Coefficiente de resistencia efectivo	(-)
U :	Coefficiente global de transferencia de calor	W/m ² . $^{\circ}$ C
B :	Coefficiente volumétrico de expansión térmica	(-)
k_j :	Conductividad térmica del aislante	W/m. $^{\circ}$ C
k :	Conductividad térmica del gas	W/m. $^{\circ}$ C
k_m :	Conductividad térmica del material	W/m. $^{\circ}$ C
k_s :	Conductividad térmica del suelo	W/m. $^{\circ}$ C
ΔT_1 :	Delta de temperatura entre el aire ambiente y la pared de la tubería	$^{\circ}$ C
ΔT_2 :	Delta de temperatura entre el gas y el aire ambiente	$^{\circ}$ C
D_{HDL} :	Diámetro de la herramienta de limpieza	m
D_e :	Diámetro externo de la tubería	m
D_i :	Diámetro interno de la tubería	m
H :	Distancia del suelo al centro de la tubería	m
h :	Elevación	m
E :	Energía interna por unidad de masa	J
H_s :	Entalpía de las fuentes de masas	J/Kg
f_w :	Factor de fricción en la pared de la tubería	Ns/m

c_{pl} :	Factor de fuga	(-)
\dot{m} :	Flujo másico de gas	Kg/s
F_w :	Fricción en la pared de la tubería	N
F_R :	Fuerza de fricción	N
F:	Fuerza de propulsión de la HDL	N
F_e :	Fuerza estática	N
N:	Fuerza normal	N
U_{pl} :	Fuga inducida por la caída de presión	Pa
V_g :	Fracción de volumen de gas	(-)
V_L :	Fracción de volumen de líquido-película	(-)
V_D :	Fracción de volumen de líquido-gotas	(-)
R_S	Fracción de masa de gas.	(-)
g :	Gravedad	m/s ²
L:	Longitud de la tubería	m
Nu :	Numero de Nusselt	(-)
Pr :	Número de Prandtl	(-)
R_a :	Número de Rayleigh	(-)
Re :	Número de Reynolds del flujo a lo largo de la tubería	(-)
Re^* :	Número de Reynolds en el gap	(-)
Re^{**} :	Número de Reynolds del flujo frente a la HDL	(-)
P:	Presión del fluido sobre la HDL	Pa
r:	Radio de la HDL	m
r_e :	Radio externo de la tubería	m
r_{in} :	Radio intermedio tubería aislante	m
r_i :	Radio interno de la tubería	m
K_d :	Razón de diámetros	(-)
R_{cond} :	Resistencia conductiva	m.°C/ W
R_{cond_j} :	Resistencia conductiva del aislante	m.°C/ W
R_{conv_e} :	Resistencia convectiva externa	m.°C/ W
R_{conv_i} :	Resistencia convectiva interna	m.°C/ W
F_2 :	Resistencia cuadrática	N.s ² /m ²

F_1 :	Resistencia lineal	N.s/m
R_D :	Relación de deslizamiento	(-)
T_{we} :	Temperatura de la pared externa	°C
T_{wei} :	Temperatura de la pared externa a L=0	°C
T_{weL} :	Temperatura de la pared externa a una distancia L	°C
T_{win} :	Temperatura de la pared intermedia tubería aislante	°C
T_{wi} :	Temperatura de la pared interna	°C
T_{∞} :	Temperatura del aire ambiente externo	°C
T_i :	Temperatura del gas a L=0	°C
T_L :	Temperatura del gas a una distancia L	°C
T_b :	Temperatura promedio	°C
V_{HDL} :	Velocidad de la herramienta de limpieza	m/s
v_f :	Velocidad de película	m/s
v :	Velocidad del fluido	m/s
v_{0D} :	Velocidad de caída de las gotas	m/s
v_r :	Velocidad Relativa	m/s
v_c :	Viscosidad cinemática del gas	Pa.s

Letras Griegas

δ :	Ancho del gap	m
μ :	Coefficiente de fricción	(-)
α :	Difusividad térmica	m ² /s
ρ :	Densidad del fluido	Kg/m ³
γ :	Factor de forma	N.s/m
β :	Inclinación de la tubería	°(Grado)
ψ_g :	Transferencia de masa entre las fases	Kg/m ³ .s
ψ_e :	Tasa de arrastre	(-)
ψ_D :	Tasa de deposición	m/s
η	Viscosidad del gas	Pa.s

Abreviaturas

DFC: Dinámica de fluido computacional.

HDL: Herramienta de limpieza.

HIL: Herramienta inteligente en línea.

INTRODUCCIÓN

Venezuela, es el país con las mayores reservas de Gas Natural en Latinoamérica y el octavo a nivel mundial según el Informe de Gestión Anual 2010 Petróleos de Venezuela, S.A. Las reservas probadas están en el orden de los 195 billones de pies cúbicos normales.

La principal empresa del país responsable del desarrollo y valorización de este recurso, está desarrollando actualmente diferentes campos tanto costa afuera como en tierra con el fin de explotar las bastas reservas de gas. La explotación de estos campos implica la ejecución de ingeniería, procura y construcción de instalaciones tanto de subsuelo y superficie a través de las cuales se transportará, manejará y procesará la producción. Una de estas instalaciones son las líneas de flujo o tuberías a través de las cuales se transportará el gas.

Estas tuberías deben ser diseñadas considerando diversas variables como lo son: condiciones de presión, temperatura, flujos volumétricos y topografía, batimetría o el lugar por donde pasará la misma. De hecho, la trayectoria del gasoducto, sobre todo costa afuera, requiere de una gran cantidad de estudios previos, puesto que, la instalación de estos sistemas demanda de una enorme inversión.

De igual manera es el mantenimiento posterior a su instalación, debido a que al pasar el tiempo las tuberías se van deteriorando, tanto en el exterior como en el interior de la misma. Sin embargo, un mayor desafío es requerido para la limpieza y mantenimiento de la integridad interna, debido a que se pueden acumular diferentes productos como agua o sólidos que podrían obstruirla parcial o completamente, conllevando a inestabilidades o paradas operacionales, y además podrían favorecer la corrosión.

Por esta razón, dentro de la industria del gas se han desarrollado una serie de herramientas de limpieza (HDL) llamadas coloquialmente en Venezuela como “cochinos” y conocidas en inglés como *PIG* (Medidor de Inspección de la Tubería), las cuales son usadas para remover residuos adheridos a las paredes internas o remover líquido acumulado en las tuberías, con una frecuencia

determinada de acuerdo con la experiencia operacional o a través de estudios transitorios del sistema. Por lo tanto, es claro que las operaciones de corridas de HDL son esenciales para lograr mantener un flujo continuo y estable en sistemas de tuberías que transportan gas.

Sabiendo el impacto de las HDL se propuso este proyecto de investigación, el cual se enfocará en la selección y evaluación de herramientas de limpieza para gasoducto. El proyecto contempla un estudio de las tendencias tanto de tipos de herramientas de limpieza como de modelos de evaluación de procesos de corridas de HDL a nivel nacional y mundial, realizando una inteligencia tecnológica y búsqueda bibliográfica. Posteriormente, se realizará la selección de la HDL más apropiada para campos de gas, y finalmente, se efectuará un estudio transitorio sobre corridas de HDL y su comportamiento al variar diferentes variables.

La finalidad de este estudio es contribuir en un mejor entendimiento del proceso de corridas de herramientas de limpieza, así como la actualización sobre las HDL que podrían ser usadas para los campos de gas.

CAPÍTULO I

1. Fundamentos de la investigación.

1.1 Planteamiento del problema

El transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea monofásico o multifásico, es una operación cotidiana en la industria de los hidrocarburos. En el caso del gas, los sistemas de tuberías que los transportan son llamados gasoductos. Estos según su aplicación pueden transportar gas seco, húmedo o gas con condensados, cada uno de estos tipos de gas tiene una composición propia que de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura tenderán a condensar líquidos. Por lo tanto, estos líquidos se comenzarán a acumular en las tuberías, ya sean en forma de agua o hidrocarburos líquidos. El hecho es que esta acumulación poco a poco va estrangulando el flujo del gas debido a que la sección transversal de la tubería se reduce, lo que incrementa la caída de presión en el sistema y conlleva a una reducción de la producción y un mayor gasto energético para transportar el fluido. Además, si existe sulfuro de hidrogeno y/o dióxido de carbono junto con el agua acumulada se podrían favorecer procesos de corrosión, y dependiendo de las características del agua condensada, así como de la presión y/o temperatura de diseño se puede tener el riesgo de formación de hidratos y/o propiciar la precipitación e incrustaciones de escamas. Todos estos problemas llevan a restricciones de flujo e inestabilidades en las operaciones, las cuales deben ser consideradas en un estudio de aseguramiento de flujo con el fin de definir las estrategias apropiadas que conlleven a una operación continua.

Una de las estrategias que se plantean para reducir estos posibles problemas está relacionada con la remoción de los líquidos acumulados en las tuberías. Para ello, se han desarrollado una serie de herramientas de limpieza (HDL) llamadas coloquialmente en Venezuela “cochinos” y conocidas en el inglés como PIG (Medidor de Inspección de la Tubería), que son usadas para remover tanto líquidos acumulados como residuos adheridos a las paredes internas de las tuberías. Estos dispositivos son introducidos por un extremo de la línea y son

transportados al otro extremo por el empuje que le suministra el fluido en la parte posterior de la herramienta (Figura 1).



Figura 1: Herramienta de limpieza en una línea de tubería

Existen una gran cantidad de factores que pueden hacer que el comportamiento de las HDLs sean difíciles de predecir, en especial en las líneas que transportan gas, debido a los procesos de expansión y compresión del mismo, lo que puede ocasionar cambios importantes en la velocidad de la HDL (Mattheus et al, 2007), es decir, incrementos o reducciones que podrían causar daños por impactos a accesorios o en zonas donde exista algún cambio de ángulo de la tubería.

Garantizar una operación de limpieza eficiente en un sistema de transporte de gas natural está íntimamente ligado a mantener la velocidad de la herramienta de limpieza dentro de rangos establecidos, los cuales dependen del criterio y la experiencia del operador. Estos rangos han sido estudiados por diferentes autores, entre ellos se encuentra el trabajo realizado por Nguyeon, Kim, Yoo y Rho (2001), quienes definieron que para gasoductos las velocidades deberían estar entre 2 y 7 m/s. Si estas velocidades están por debajo del rango podría ocurrir un atascamiento de la herramienta, y si son excedidas por encima ocasionaría una reducción de la eficiencia de limpieza, daños en la integridad mecánica del sistema y promovería la formación de hidratos. Los daños en la tubería pueden llegar a ser costosos y complicados de resolver, ya que estas se pueden encontrar enterradas o bajo el mar, implicando la ejecución de una gran logística, así como importantes costos para realizar la reparación del sistema. Actualmente, existe una gran variedad de herramientas disponibles en el mercado, de manera que al realizar la selección de una de ellas se deben tomar en cuenta varios parámetros. Dado que estos podrían impactar sobre el desempeño de la remoción de líquido acumulado y el buen control de la herramienta dentro de la tubería, tales como: diámetro, peso, material, tipo, etc.

Con base en lo anteriormente expuesto, Intevep S.A. como brazo tecnológico de PDVSA filial de investigación, tiene como orientación estratégica desarrollar y evaluar soluciones tecnológicas integrales. En este sentido, se está requiriendo actualmente un estudio para actualizar y ampliar su base de datos en cuanto a las herramientas de limpieza de tuberías, con el fin de seleccionar y evaluar los dispositivos apropiados para la remoción de líquido acumulado en gasoductos.

1.2 Antecedentes de la investigación

Azevedo L.F.A., et. al (1999), presentaron el estudio fundamental sobre los aspectos de la dinámica del movimiento de la HDL en tuberías. Hicieron simulaciones en régimen no permanente de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno para fluido incompresible y compresible a través de una tubería, acoplado con las ecuaciones que gobiernan la dinámica de la HDL. También, estudiaron las fuerzas de contacto entre la HDL y la pared de la tubería por medio de análisis de elemento finito y validaron experimentalmente. Ejecutaron estudios numéricos y experimentales para estimar las fuerzas resistivas de los depósitos de parafinas durante las operaciones. La principal limitación de este estudio es que utilizaron una HDL de tipo disco con dos copas solamente y la interacción de contacto se modeló sobre un solo disco, esta investigación es un gran aporte al área, pero las HDL comúnmente usadas son las de tipo bala o “Polly-Pig”, ya que pueden deformarse y así evitar atascos en las líneas, en cambio las HDL de tipo disco si no se conoce bien su manejo tienen mayor probabilidad de atascamiento.

En el trabajo realizado por Ngyeyo y Kim (2001) se presenta los resultados de modelado y simulación para un medidor de inspección de tuberías PIG (por sus siglas en inglés *pipeline inspection gauge*) con control de flujo en tubería de gas natural. Este trabajo muestra que el comportamiento dinámico de la herramienta de limpieza depende de la diferencia de presión entre su cuerpo y el flujo de derivación a través de él. El modelo dinámico de simulación incluye: la dinámica de conducción de flujo de gas detrás del PIG, la dinámica de los gases emitidos en frente del PIG, la dinámica de flujo de derivación, y la dinámica del PIG. El flujo que pasa a través del agujero que posee la herramienta se denomina flujo de derivación, y para este caso se trata como flujo incompresible con la suposición de

su número de Mach menor que 0,45. Los resultados de la simulación muestran que al estudiar la velocidad de la herramienta y el diferencial de presión en diferentes intervalos de tiempo durante la corrida, el modelo matemático derivado y el esquema de cálculo propuesto son eficaces para la estimación de la posición y velocidad del PIG con flujo de derivación bajo, dadas las condiciones operativas de la tubería.

Nieckele, Braga y Azevedo (2001), presentan un estudio sobre la simulación del comportamiento dinámico de las herramientas de limpieza en las tuberías impulsados por gas o líquido, Las ecuaciones básicas que rigen el fenómeno son la conservación de la masa y de movimiento lineal para el fluido, las cuales se resuelven numéricamente, junto con la ecuación de movimiento lineal para la HDL y los modelos para el flujo de derivación a través de él. Las fuerzas de contacto de la HDL-pared fueron simulados por un modelo de arrastre espontáneo que puede ocurrir mientras que dos objetos se deslizan uno sobre otro (*stick/slip*). Las fuerzas de contacto entre las herramientas de disco y la pared de la tubería se predijeron por un análisis posterior que considera el pandeo de los disco usando el método numérico de elementos finitos. Los resultados obtenidos en relación con la velocidad y aceleración de la herramienta de limpieza, la velocidad del fluido y los campos de presión, así como la información de la fuerza de contacto, proporcionan una mejor comprensión del comportamiento de la HDL a través de una tubería.

Rivera (2007), realizo un estudio numérico de la corrida de diablos (procedimiento utilizado para eliminar obstrucciones o realizar inspecciones dentro de las tuberías) para el mantenimiento de la producción de oleoductos y/o gasoductos, cuyos objetivos principales fueron resaltar la importancia de la corrida de diablos como operación de limpieza en la industria petrolera y señalar los problemas que se presentan durante esta operación y cómo se pueden resolver. Así como analizar un sistema de transporte de hidrocarburos con el problema de acumulación de parafina en donde se requiere una corrida de diablos, con la finalidad de estudiar los efectos que el cambio en los principales parámetros operaciones, de diseño y de fluidos, tienen sobre el comportamiento de los

parámetros y condiciones de flujo del mismo, realizando estudios de simulación transitoria con un simulador comercial.

Esmaeilzadeh, Mowla y Asemani (2009), aseguran que la remoción de residuos es una práctica común en la industria del petróleo y gas. El rasgado en las líneas de flujo se emplea por muchas razones incluyendo depósitos de limpieza tales como capas de cera, la eliminación de líquidos y condensado, medición y control de la línea de flujo. El proyecto de investigación presenta el modelado matemático del movimiento transitorio de una HDL a través de tuberías de líquido y gas, titulado como “*Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines*”. Para ello, las ecuaciones diferenciales parciales no lineales de flujo se obtienen en base a cuatro ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos: ecuación de continuidad, ecuación de momento, ecuación de estado de los gases ideales y ecuación de energía, junto con la ecuación dinámica de la herramienta de limpieza. La solución propuesta se puede utilizar para predecir la velocidad de la HDL, la velocidad del flujo motor y el tiempo que tarda la herramienta para llegar al final de la tubería.

Ramírez y Dutra (2012), presentan un trabajo de investigación que se titula Simulación de flujo y evaluación de la fuerza de arrastre actuando en el cuerpo de un PIG (por sus siglas en inglés *pipeline inspection gauge*) con un bypass (agujero que atraviesa el cuerpo de la herramienta), este trabajo presenta la simulación de una corrida de HDL en una tubería horizontal, recta con un diámetro nominal de 12 pulgadas, que corresponde a un tubo de diámetro interno de 304,8 mm. y externo de 323,85 mm, la longitud es de 4 m. y la rugosidad interna de 25 micrómetros.

El cuerpo del *pig* con *bypass* es representado por un cilindro con un orificio axial. El objetivo principal fue evaluar la fuerza de arrastre causada por el flujo con el *pig* parado. Para ello, se variaron algunos parámetros genéricos en tres tipos de contorno del orificio y se simulan los flujos en cada caso. Con base en los resultados de la simulación son identificados los rangos de la fuerza de arrastre y de la caída de presión. Fueron realizadas variaciones en el diámetro del orificio, longitud axial de la contracción y de la expansión y en el contorno de la sección

axial. De los resultados de la simulación, es identificado el contorno que genera la menor fuerza de arrastre. Otras condiciones como propiedades del fluido, velocidad del flujo y geometría del tubo son constantes. Fue utilizada una herramienta de software de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) para simular el flujo y calcular los resultados.

Botros y Golshan (2010), manifiestan que el recorrido de las herramientas de limpieza en los gasoductos está sujeto a parámetros más estrictos que en las tuberías de líquidos, principalmente debido a la compresibilidad del gas. Esto se acentúa cuando la HDL tiene que ascender una pendiente en una sección de la tubería, donde la fuerza de gravedad debido al peso de la herramienta y el peso de la sustancia frente a la misma puede comprometer la caída de presión a través de la tubería, así como la velocidad de la HDL. En una pendiente hacia abajo, una herramienta puede acelerar hasta una velocidad superior a la máxima requerida para su correcto funcionamiento. Por otro lado, en la línea de flujo a menudo se enfrentan desafíos en las transiciones de cambios de diámetro o curvas, esto está sujeto al diseño de cada tubería. La capacidad de predecir con precisión el desempeño funcional de las HDL es de vital importancia en el diseño y operación de tuberías, lo que favorece la reducción de costos y minimiza los problemas operacionales. Este trabajo de investigación se titula "*Field Validation of a Dynamic Model for an MFL ILI Tool in Gas Pipelines*", donde los autores presentan una formulación general para el movimiento de las herramientas de limpieza en una sección de la tubería inclinada, teniendo en cuenta los efectos de las propiedades del gas, la fricción producida por el contacto del flujo con la pared de la tubería, de by-pass para el control de velocidad, la presión diferencial generada a través de la HDL, la eficiencia del sello, y la brecha, entre otros parámetros.

Borregales (2014), hace referencia a que la creciente demanda de energía requiere de los sistemas de producción mayor confiabilidad, seguridad y vida útil. Para ello se requiere, según las nuevas legislaciones, entre otras cosas inspecciones periódicas de las líneas de hidrocarburos. En la actualidad, el uso y diseño de las herramientas de limpieza (HDL) utilizadas en gasoductos y oleoductos se basa en

gran cantidad de información experimental. Las grandes compañías de servicio y los centros de investigación construyen herramientas adecuadas para sus operaciones. Sin embargo, existen interrogantes sobre el comportamiento de estos dispositivos bajo diferentes condiciones de flujo. En los últimos años, el avance de la DFC ha permitido analizar diversos procesos donde se involucran fenómenos complejos. En consecuencia, el autor considera la simulación novedosa en DFC 2D de corridas con HDL, tomando en cuenta su movimiento lineal a través de una tubería. La metodología plantea la deformación de los elementos de la malla para representar la traslación de la herramienta relativa a la tubería. Se simuló en régimen no permanente tres tipos de herramientas (tipo bola, tipo bala y tipo mandril) en una tubería horizontal bajo condiciones de flujo de agua. Se obtuvieron perfiles de presión y las velocidades dentro de la tubería, y distribuciones de presión en las herramientas. Estos resultados permiten comprender el comportamiento del flujo durante las corridas de herramientas en línea, útil para mejorar los diseños y el funcionamiento de estos dispositivos. A título de validación, los resultados fueron comparados con valores reportados en la literatura en una HDL tipo mandril. Con la definición de parámetros dimensionales las desviaciones obtenidas fueron menores al 5 %.

Peña (2015) propone un enfoque del fluido y estructura para simular un comportamiento más realista del sistema tubería, fluido y HDL. Para el estudio, seleccionó una herramienta tipo bala (Polly-Pig). Para determinar la interacción fluido-estructura, implementó una metodología particionada donde se resuelve la fluido dinámica con volúmenes finitos y el campo de presión se introduce como condición de borde en el problema estructural resuelto con elementos finitos. Se utilizó el programa ANSYS V-14, donde se analizaron tres geometrías, HDL con flujo circundante, HDL sin flujo circundante y una HDL sin flujo circundante en un codo de 90° y tres espumas de poliuretano para la herramienta. Se estudió la influencia de la relación de velocidad fluido/herramienta y se determinó que mientras más pequeña sea ésta, la HDL estará sometida a mayores esfuerzos y cuando esta relación se acerca a 1 la distribución de los desplazamientos en la herramienta se hace uniforme. Se caracterizó una HDL en una tubería horizontal sin flujo circundante y se dedujo que el diferencial de presión que permite

movimiento, depende sólo de condiciones de contacto y propiedades de materiales (HDL/tubería). Se compararon dos formas de aproximación del comportamiento de una HDL en un codo de 90° y se observaron las ventajas y desventajas de cada aproximación

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

.Desarrollar una metodología para seleccionar y evaluar una herramienta de limpieza para gasoducto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar una inteligencia tecnológica de herramientas de limpieza para gasoductos.
- Seleccionar la o las herramientas de limpieza para un gasoducto usando una metodología de selección matricial.
- Desarrollar competencias en el uso de programas comerciales para la evaluación de flujos multifásicos en tuberías de gas.
- Determinar el factor de fricción de la interfaz HDL-tubería.
- Hacer una evaluación transitoria de operaciones de limpieza de un sistema de tubería considerando las características de la o las herramientas seleccionadas.
- Elaborar las propuestas y recomendaciones.
- Redacción del informe técnico.

CAPÍTULO II

2 Marco Teórico

2.1 Historia de la corrida de herramientas

La corrida de herramientas en tuberías fue desarrollada en Estados Unidos de América alrededor de los años 50 para limpiar las tuberías de los gasoductos y oleoductos de sustancias que se les van acumulando con el tiempo. Sin embargo, en la actualidad la corrida de herramientas ha expandido su uso en muchas otras áreas incluyendo las refinerías, las plantas químicas, las industrias petroquímicas, las centrales eléctricas y la explotación minera. Con el paso de los años, la corrida de herramientas de limpieza en tubería se ha convertido en un método sofisticado para la limpieza mecánica y mantenimiento interno de gasoductos u oleoductos.

El método de corrida de herramientas de limpieza (HDL) fue implementado para remover depósitos que obstruyen el flujo a través de una tubería. Actualmente se usan durante todas las fases en la vida de un sistema de tuberías según una publicación de la siguiente página web www.piggingassnppsa.com, 2005, no sólo para remover sólidos acumulados sino para remover líquidos acumulados, separar fluidos e inspeccionar la parte interna de tuberías.

El propósito de la operación de la corrida de herramientas es mantener la eficiencia de un sistema de tuberías estable. Lo que depende de dos reglas básicas, que son: mantener la operación continua y reducir los costos de operación.

La selección de estas herramientas de limpieza dependerá de la topología de la tubería, es decir, diámetro, rugosidad, longitud, topografía o batimetría, espesor, aplicación. Además, de las condiciones operacionales, presión, temperatura, caudales de producción, así como también, las variables medioambientales a la cual está expuesta la tubería.

El nombre del instrumento de limpieza viene de la industria del petróleo, donde discos conectados por una barra eran propulsados a través de oleoductos para quitar acumulaciones de parafinas de las paredes internas de las tuberías. Esta

acción proporcionaba un contacto metal - metal, el cual generaba un ruido como un chillido de un cochino, de allí su nombre.

2.2 Definición de herramienta de limpieza

Una herramienta de limpieza es un dispositivo que se coloca en el interior de una tubería para ser trasladado de un extremo a otro de la línea con el propósito de limpiarla o inspeccionarla; la herramienta se desplaza a través de la tubería con el empuje que le brinda el fluido en la parte posterior. Sin embargo, en la literatura existen muchas definiciones del instrumento de limpieza de tuberías, a continuación se citan algunas de ellas:

Las herramientas de limpieza son dispositivos que se insertan y viajan por el interior a lo largo de la longitud de una tubería de producción. Una HDL es un dispositivo mecánico para limpieza interior o inspección de una tubería. (Manual para el usuario V4.0, OLGA 2000). Una HDL es el objeto, que empuja fluidos a través de la tubería. La herramienta de limpieza es fabricada de materiales como el silicio de alta calidad, que son muy resistente y a la vez flexible. Las HDL están disponibles en varias formas y se hacen de varios materiales.

Otros de los nombres con los cuales son conocidas las HDL, son “Cochinos”, “Marranos”, “Diablos”, “Raspa tubos”, “Herramientas en línea”, dependiendo de la región del mundo.

2.3 Usos de las herramientas de limpieza

Las herramientas de limpieza se utilizan para diversas tareas. A continuación se presentan los diferentes usos que tienen estas herramientas:

Drenado: en la fase inicial de las tuberías, las HDL son usadas para remover el aire que queda atrapado en las líneas antes de la realización de la prueba hidroestática. Así como también para remover el agua que queda en la línea luego de la prueba. Más adelante se pueden usar de nuevo para remover acumulaciones de gas en los puntos altos de las tuberías de crudo o remoción de condensado acumulado en los puntos bajos de los gasoductos.

Sello y separación: para el caso de envío de diferentes fluidos por una misma tubería se utilizan HDL para separar dos fluidos diferentes evitando que se mezclen. Así la HDL funciona como un sello entre los fluidos. También se utilizan estas herramientas para hacer sello a las herramientas inteligentes en líneas (HIL) para minimizar el efecto del fluido sobre sus componentes electrónicos.

Limpieza mecánica: durante la fase de mantenimiento que deben tener las líneas de hidrocarburos son necesarias las HDL para remover los materiales que obstruyen el flujo. Estos materiales: parafinas, asfáltenos, hidratos, líquido acumulado, incrustaciones inorgánicas, etc., se adhieren a las paredes y van reduciendo el diámetro interno que la tubería.

Inspección: luego haber realizado una limpieza en la línea con una Herramienta de Limpieza se lanza una HIL que permite hacer inspección interna para detectar: corrosión, desgaste; inspección geométrica, detección de deformación o disminución del espesor de la tubería; incluso puede hacer un mapeo 3D de la línea.

Recuperación: cuando una HDL no se logra sacar de la línea es necesario hacer un procedimiento de recuperación. Las herramientas tipo gel por su alta viscosidad pueden recuperar este tipo de herramientas sin intervenir a la tubería.

2.4 Tipos de herramientas de limpieza

En la actualidad se conocen tres grandes grupos de herramientas de limpieza: las Herramienta Utilitarias en Línea (HUL) las Herramientas Inteligentes en Línea (HIL) y las Herramienta Tipo Gel (HTG). Estas herramientas pueden cumplir funciones de limpieza, drenado, sello, inspección y separación.

Herramienta Utilitarias en Línea: las herramientas de limpieza también llamadas Utility PIGs son utilizadas para drenar o hacer vaciados, remover material acumulado en la tubería o separar diferentes fluidos que se transporten en la tubería.

Esferas: este tipo de HDL se representa en la Figura 2. Son ideales para secciones donde exista alta probabilidad de atascamiento, ya que se pueden amoldar más fácilmente a cualquier disminución del diámetro de la línea. Se caracterizan por ser inflados con agua, glicol o una mezcla agua glicol, 2% por encima del diámetro deseado como se explica en una publicación de la página web <http://ppsa-online.com>, 2013. Es ideal en los casos donde las secciones de la tubería tengan temperatura por debajo de cero grados centígrados.



Figura 2: HDL tipo esfera. Imagen obtenida de PPSA

Bala: también conocidos como Poly-PIG, tienen forma cilíndrica o de bala, son moldeados en una sola pieza (ver figura 3). Estos están compuestos por espuma lo cual les permite reducir su diámetro hasta un 75%. También pueden estar compuestos por elastómeros que admiten un 20% de reducción en el diámetro. Son muy útiles para limpieza en aquellas tuberías con secciones de diferentes diámetros. Generalmente, son los primeros que se lanzan en el proceso de limpieza, y el grado de destrucción que tengan al salir de la línea indicará el grado de obstrucción en la tubería.



Figura 3: HDL tipo bala. Imagen obtenida de PPSA

Mandril: A diferencia de las HUL anteriores, este tipo de herramienta combina un eje central metálico con otros tipos de compuestos y accesorios. Algunos llevan discos de poliuretanos y otros llevan un disco magnético en el centro que permite remover óxidos en la línea. Son útiles para sellar y para realizar limpieza (ver figura 4).



Figura 4: HDL tipo mandril. Imagen obtenida de PPSA

Sólidos: Similares a las herramientas tipo mandril pero hechos en una sola pieza de poliuretano. Son muy útiles para sellar y sirven para remover condensado o residuos líquidos en gasoductos (ver figura 5).



Figura 5: HDL sólida. Imagen obtenida de PPSA

Herramientas inteligentes: permiten conocer el estado de la línea, mediante unos instrumentos que tienen incorporados (Figura 6). Estas herramientas son un poco más delicadas y requiere que la tubería este totalmente limpia. Para ello se lanzan las HUL a la línea hasta que deje de salir material (parafinas, escombros, entre otros) en el otro extremo. Estas herramientas son lanzadas con herramientas de sellado en la parte frontal y en la parte posterior para aislar los instrumentos del fluido. De estas se conocen tres tipos:

Magnética: esta herramienta permite localizar los defectos en la pared de la tubería mediante un generador de campo magnético.

Ultrasónica: esta herramienta tiene un dispositivo ultrasónico que permite medir el espesor de la tubería.

Inerciales: esta herramienta tiene acelerómetros y giroscopios que permiten generar un mapa en tres dimensiones con el recorrido de la línea.

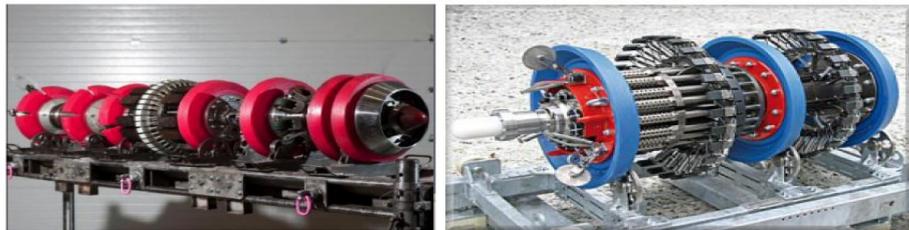


Figura 6: Herramientas inteligentes en línea. Imagen obtenida de PPSA

Herramientas tipo gel: La mayoría de las HTG son a base de agua dulce o agua de mar gelificados con un polímero bio-degradable (Ver Figura 7). También, una gama de productos químicos, disolventes, e incluso ácidos pueden ser gelificados para realizar un tratamiento químico a la línea. El diesel gelificado, por ejemplo, se usa comúnmente como un portador de inhibidor de la corrosión en las tuberías de gas. Son utilizados en combinación con otras HDL, como se observa en la Figura 1.6b, para separar los HIL del fluido o para remover mejor el material que se acumula en la línea. Tienen la desventaja de ser diluidas por el fluido o ser atravesado por el gas.

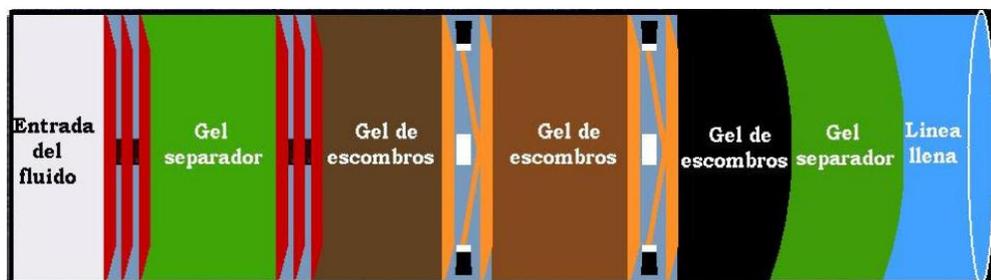


Figura 7: HDL tipo gel. Imagen obtenida de PPSA

2.5 Metodología de la corrida de herramientas

Las operaciones con herramientas de limpieza requieren que la tubería tenga un dispositivo lanzador para introducir la herramienta a la línea, y un dispositivo receptor por donde se retirará la HDL. En la figura 8 se puede ver el esquema de funcionamiento de un lanzador, la idea es derivar el flujo hacia la parte posterior de la herramienta y ésta es empujada hacia la tubería. Puede ver en la Figura 9 ejemplo de lanzadores.

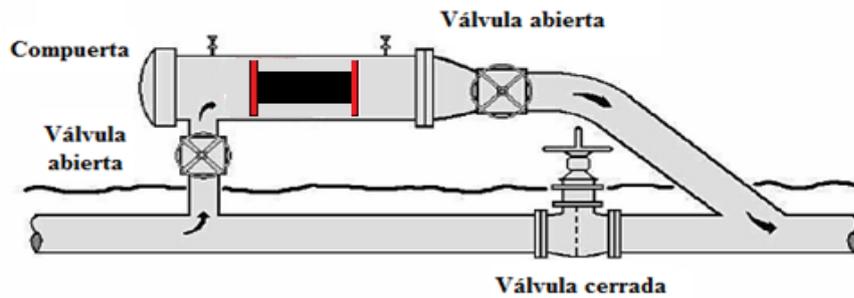


Figura 8: Esquema de un lanzador



(a) Lanzador de compuerta con seguro



(b) Lanzador con brida ciega

Figura 9: Ejemplo de lanzadores

En el caso del receptor su diseño es similar al del sistema de lanzamiento, sin embargo, debe tener válvulas de drenaje y ventilación (Ver Figura 10). De esta manera, se puede liberar la presión y puede retirarse la HDL por la compuerta del receptor como se aprecia en la Figura 11.

El proceso de recepción o lanzamiento de una HDL requiere una secuencia de aperturas y cierre de válvulas en combinación con la apertura de la compuerta. En consecuencia, un error al realizar estas operaciones puede causar severas heridas, incluso la muerte, al operador o a las personas que allí se encuentren.

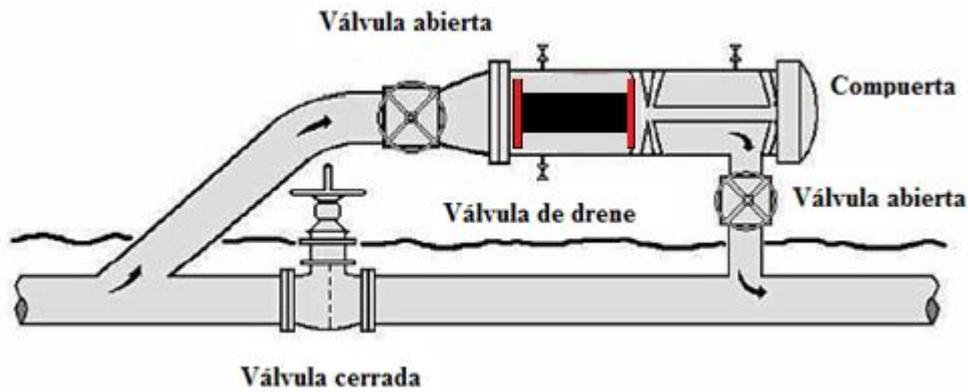


Figura 10: Esquema de un receptor



(a) Recepción de una herramienta tipo sólido

(b) Recepción de una herramienta tipo mandril

Figura 11: Recepción de herramientas. Imagen obtenida de PPSA

Otro dispositivo de interés en el proceso de corrida de herramientas son las instalaciones de recepción de los fluidos o materiales desplazados, uno de estos dispositivos es un separador llamado en Inglés *slug catcher*), este es diseñado

particularmente para recibir grandes volúmenes de líquido en intervalos irregulares (ver figura 12)



Figura 12: Instalación receptora. Imagen obtenida de www.houstonvessel.com

Gielissen (2010), explica las medidas de seguridad a la hora de abrir la compuerta para recepción o lanzamientos de HDL:

1. El contenedor de la herramienta debe estar seco y despresurizado.
2. El contenedor debe estar aislado de la línea principal cerrando las válvulas correspondientes.
3. En el caso de tener un sistema de drenaje y/o ventilación cerrado debe aislarse el contenedor, cerrando las válvulas de desagüe y las válvulas de ventilación.
4. El contenedor necesita estar libre de gases tóxicos, como por ejemplo el H₂O.
5. Cuando comience el proceso de lanzamiento o recepción la compuerta debe estar cerrada apropiadamente.

A través de los años han ocurrido muchos accidentes alrededor del mundo durante estas operaciones de lanzamiento y recepción. A pesar de que algunas válvulas grandes están equipadas con un motor el proceso no puede ser totalmente automatizado ya que la carga y la descarga de la HDL implican trabajo manual. Según las estadísticas de Gielissen, el 70% de los incidentes reportados en el mundo de la industria de petróleo y gas son atribuibles a un error humano.

2.6 Parámetros que intervienen en la operación

Para poder predecir el comportamiento que tendrá la herramienta de limpieza durante la corrida, es necesario conocer los parámetros que intervienen durante la misma; lo que nos ayudará a saber si se operará de manera óptima.

2.6.1 Tiempo de corrida

La predicción del tiempo de la corrida de herramientas es muy importante. Consiste en proveer al operador un tiempo estimado de llegada de la herramienta de limpieza. Saber cuándo llegará la HDL y además conocer los diferentes parámetros que afectan el tiempo de la corrida de herramientas de limpieza, permite al operador minimizar la duración del proceso de corrida. (Esmailzadeh, Asemani y Mowla, 2006).

2.6.2 Velocidad de la herramienta

Normalmente las herramientas de limpieza se desplazan a la misma velocidad que la corriente del flujo antes de introducirlo. Sin embargo, la velocidad a la cual deberían operar las líneas de flujo de gas deben estar entre 2 y 7 [m/s] esto según la literatura especializada en el área (Nguyeo, Kim, Yoo y Rho, 2001). La velocidad debe permanecer dentro de este rango, pues si está por debajo la HDL puede atascarse o estancarse durante la operación, y si está por encima puede no remover la mayor cantidad de líquido que se encuentre en el interior de la tubería, en los dos casos la operación resulta ser ineficiente.

2.6.3 Velocidad promedio

La velocidad promedio durante el proceso de limpieza en la tubería afecta directamente al tiempo que tardará a HDL en hacer su recorrido. La velocidad de la herramienta de limpieza determina el caudal del líquido removido, así como las fuerzas sobre los equipos submarinos en las secciones más altas y además en codos de tuberías, los cuales limitan la velocidad de la herramienta. (Esmailzadeh y otros, 2006).

2.6.4 Eficiencia de barrido

Poder predecir la cantidad de líquido que puede remover la herramienta de limpieza permite calcular la eficiencia de barrido, es decir, se podrá cuantificar qué cantidad de líquido ha sido removido y qué cantidad se está quedando a lo largo de la tubería.

2.6.5 Efecto de la presión

La presión se usa para ajustar o modificar la velocidad de la herramienta de limpieza, y por ende tiene un gran impacto en el tiempo de corrida de la misma. Aumentando la presión del separador disminuye la velocidad de la herramienta y viceversa (Dykhno et al. 2002). La excesiva velocidad de llegada de la HDL se da por la elevada presión diferencial a través del mismo. Esta diferencia de presión se incrementa con el acercamiento de la herramienta a la instalación receptora. Para reducir la velocidad de la HDL es necesario disminuir la diferencia de presión, con cualquiera de estas dos opciones:

- Incrementar la presión al frente de la herramienta de limpieza.
- Reducir presión detrás de la herramienta de limpieza.

2.6.6 Efecto de las fugas alrededor de la herramienta

Cuando se incrementan las fugas alrededor de la HDL se obtienen velocidades promedio de la herramienta más bajas, lo que genera un aumento en el tiempo que tardará la misma en llegar a su punto de extracción. Por otro lado, se desplazará menos líquido acumulado, es decir, se reducirá la eficiencia de barrido.

2.6.7 Efecto del líquido delante de la herramienta

La presencia de una gran cantidad de líquido frente de la herramienta es crucial para reducir la aceleración de la misma. Esto llega a ser un aspecto muy significativo en el control del movimiento de la HDL en segmentos de tubería horizontal y semi-horizontal. Así como puede ser un problema perjudicial en tuberías casi verticales y flujo ascendente, donde la velocidad de la HDL se puede

reducir a valores críticos que podrían llevar al atascamiento y estancamiento debido a la desaceleración ocasionada por la columna de líquido frente a la HDL.

2.7 Principio de propulsión de una herramienta de limpieza

La herramienta se desplaza debido al movimiento del fluido, pero es importante destacar que el fluido debe vencer las fuerzas que ejercen los discos o copas de la herramienta sobre las paredes de la tubería. La HDL avanza transformando la presión del fluido P , en una fuerza de propulsión (Sainson, 2007):

$$F_{pro} = \frac{\pi \cdot D_{HDL}^2 \cdot P}{4} \quad \text{Ec. 1}$$

Según Sainson (2007), en la práctica un desplazamiento correcto de HDL, es efectivo cuando la fuerza F es de dos a tres veces mayor que la fuerza de fricción.

$$F > 3 \cdot F_R \quad \text{Ec. 2}$$

2.8 Fuerza de fricción estática

La fuerza de fricción estática que se produce por la interacción entre las superficies de la tubería y la HDL es la fuerza que no permite el movimiento de la HDL. Así para poder iniciar la HDL su movimiento requiere que el fluido impulsor genere una fuerza superior a ésta. La fuerza de fricción estática F_e es el resultado de la fuerza normal de la herramienta sobre la tubería, la cual está relacionada con el coeficiente de fricción μ y viene dada por:

$$F_e = \mu \cdot N \quad \text{Ec. 3}$$

La herramienta se empieza a mover después de que la fuerza aplicada sobre ella es mayor a la fuerza de fricción estática. Así, la velocidad de la HDL aumenta cuando la fuerza de fricción disminuye.

2.9 Factor de fricción de pared

El factor de fricción de pared es el que ejercen la periferia de las copas o discos sobre las paredes internas de la tubería, lo que conlleva a un proceso de disipación de energía cuya consecuencia es la disminución de la velocidad de la herramienta. Esta fuerza está asociada al valor de la fricción del fluido debido a la viscosidad del mismo en el espacio entre la herramienta y la pared de la tubería (gap), es decir, cuando la HDL se está moviendo, el fluido alrededor de ella produce una fuerza viscosa.

El simulador OLGA en su manual para el usuario (versión 7.3.3, 2013), indica que la fuerza de fricción de la pared debido al contacto entre la HDL y la pared de la tubería está dada por:

$$F_w = \max(0, F_e - f_w |V_{HDL}|) \cdot \sin(V_{HDL}) \quad \text{Ec. 4}$$

Para realizar el cálculo de la fricción en la pared de la tubería, se procede a utilizar el método propuesto por Botros y Golshan (2010) donde se hace un balance de fuerzas relacionado con el movimiento de la herramienta, tal como se muestra en la Ec. 5. Luego, se define como calcular cada fuerza, de manera tal, que establecen el procedimiento de cálculo para la fuerza de fricción entre pared y tubería, tal como se indica en las Ec. 6 y 7.

$$m_{HDL} \cdot \frac{dV_{HDL}}{dt} = \Delta P \cdot \left(A_t \cdot A_h \cdot \frac{A_g}{2} \right) + F_{hd} + F_{gd} - F_w - m_{HDL} \cdot g \cdot \sin(\alpha) - F_R \quad \text{Ec. 5}$$

$$R_e^* = \frac{4 \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_{HDL}}{\eta} \leq 2.000 \rightarrow F_w = \pi \cdot D_i \cdot L \cdot \eta \cdot \frac{V_{HDL}}{\delta} \quad \text{Ec. 6}$$

$$R_e^* = \frac{4 \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_{HDL}}{\eta} > 2000 \rightarrow F_w = \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left[\frac{f_e \cdot L}{4 \cdot \delta} \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \rho \cdot V_{HDL}^2 \right] \cdot (\pi \cdot D_i \cdot \delta) \quad \text{Ec. 7}$$

2.10 Factor de resistencia lineal y cuadrática

Las fuerzas de resistencia tanto lineal como cuadrática, son aquellas fuerzas que se oponen al movimiento de la HDL dentro de la tubería. Botros y Golshan (2010), suponen que la resistencia de fricción cumple con el siguiente polinomio:

$$F_R = F_e + F_1 \cdot V_{HDL} + F_2 \cdot V_{HDL}^2 \quad \text{Ec. 8}$$

Para realizar el cálculo de F_1 y F_2 , se procede a utilizar el método propuesto por Kane y Sternheim (1992):

$$R_e^{**} = \frac{\rho \cdot v \cdot D_i}{\eta} < 1 \rightarrow F_1 = -\gamma \quad \text{Ec. 9}$$

$$R_e^{**} = \frac{\rho \cdot v \cdot D_i}{\eta} > 1 \rightarrow F_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot C_D \quad \text{Ec. 10}$$

Según Liu (2003), el coeficiente de arrastre para una HDL se obtiene de la siguiente manera:

$$C_d = \frac{4K_d^4}{(1 - K_d^2)^2} \quad \text{Ec. 11}$$

$$K_d = 1 - \frac{2\delta}{D_{HDL}} \quad \text{Ec. 12}$$

2.11 Factor de fuga

Cuando se incrementan las fugas alrededor de la HDL, se obtienen valores bajos de la velocidad promedio. Existen dos tipos de fugas (Olga en su manual para el usuario versión 7.3.3, 2013)

Fuga inducida por la caída de presión: debido a la caída de presión sobre la HDL, el líquido puede ser empujado desde atrás de la herramienta hacia el frente de ella. El flujo volumétrico de la caída de presión está dada por:

$$U_{pl} = (c_{pl} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{HDL}}{\rho}}) \cdot \sin(\Delta P_{HDL}) \quad \text{Ec. 13}$$

$$c_{pl} = \sqrt{2} \cdot \frac{A_{fuga}}{A_t} \quad \text{Ec. 14}$$

$$C_a = \frac{A_g}{A_t} \quad \text{Ec. 15}$$

Fuga de vuelta: debido al deslizamiento entre la herramienta de limpieza y el fluido que lo rodea, algo de fluido por delante de la HDL no se llevará a lo largo de la tubería sino más bien se obtendrán fugas en el sentido contrario a la corriente del flujo. Cuando la brecha entre la herramienta y la pared del tubo es muy estrecha, los efectos de la gravedad y el gradiente de presión se pueden despreciar en el cálculo del coeficiente de película del fluido que pasa alrededor de la herramienta. Suponiendo un flujo laminar, la velocidad promedio se convierte en película.

$$v_f = \frac{1}{2} \cdot V_{HDL} \quad \text{Ec. 16}$$

$$\frac{1}{C_{pl}^2} = \frac{1}{2} C_f \quad \text{Ec. 17}$$

Usando esto, el caudal volumétrico está dado por:

$$Q = \frac{\pi \cdot (D^2 - D_{HDL}^2)}{4} \cdot v_f \quad \text{Ec. 18}$$

Por defecto, la brecha entre la pared de la tubería y la herramienta es igual a dos veces la rugosidad de la tubería (Olga en su manual para el usuario versión 7.3.3, 2013). El usuario puede anular esta configuración especificando el diámetro de la herramienta de limpieza.

2.12 Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso en el cual se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que se encuentran a distinta temperatura. Si las diferencias de temperatura en los cuerpos no se mantienen por la adición o remoción de calor, la tendencia es hacia un equilibrio de temperatura, cuando se logra el equilibrio, la transferencia de calor se hace nula.

El calor puede transferirse de tres formas: por conducción, por convección y por radiación, todos los procesos de transferencia de calor involucran una o más de estas formas.

2.12.1 Números adimensionales relacionados con el análisis de la transferencia de calor

En el análisis de la transferencia de calor resulta práctico reducir las dimensiones a las expresiones físico-matemáticas que modelan el mecanismo y agrupan las variables, dando lugar a los números adimensionales. En general los números adimensionales que se usan en las correlaciones para el cálculo y análisis de la transferencia de calor como los números de Reynolds, Nusselt, Prandtl y Rayleigh.

- Número de Reynolds: el número de Reynolds se define como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de rozamiento). En base a los experimentos realizados por Reynolds en 1874 se concluyó que las fuerzas del momento son función de la densidad, del diámetro de la tubería y de la velocidad media. Además, la fricción o fuerza viscosa depende de la viscosidad del líquido. Según dicho análisis, el número de Reynolds se definió como:

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_i}{\eta} = \frac{\dot{m} \cdot D_i}{A_g \cdot \eta} \quad \text{Ec. 19}$$

El flujo másico de gas se calcula por la ecuación 20:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad \text{Ec. 20}$$

El número de Reynolds es adimensional y se utiliza para definir las características del flujo dentro de una tubería.

$Re < 2.100$, Corresponde a un flujo laminar.

$Re > 2.100$, Corresponde a flujo turbulento para cálculos de caída de Presión.

$2100 < Re < 10.000$, Se refiere a un régimen de flujo de transición para transferencia de calor.

$Re > 10.000$, Corresponde a flujo turbulento para cálculos de transferencia de calor.

Fuente: Incropera (1.999)

- Número de Nusselt: representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si sólo existiese conducción.

$$\frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{d\Delta T}{k \frac{\Delta T}{L}} = \frac{\bar{h}L}{k} \quad \text{Ec. 21}$$

Para la transferencia de calor en cilindros el número de Nusselt se define como:

$$Nu = \frac{\bar{h}_i D_i}{k} \quad \text{Ec. 22}$$

- Número de Prandtl: el número de Prandtl, es un número adimensional que relaciona la viscosidad cinemática del fluido, con su difusividad térmica.

$$Pr = \frac{\text{Viscosidad Cinematica}}{\text{Difusividad Termica}} = \frac{v}{\alpha} = \frac{\frac{\eta}{\rho}}{\frac{k}{\rho \cdot C_p}} = \frac{\eta \cdot C_p}{k} \quad \text{Ec. 23}$$

- Número de Rayleigh: este valor adimensional es usado en la transferencia de calor para estimar cuando comienza la convección natural para tuberías que están al aire libre. El número de Rayleigh depende de las propiedades del aire ambiente como la densidad, el coeficiente de expansión térmica, el campo gravitacional, el gradiente de temperatura, la difusividad térmica y la viscosidad cinemática. La convección natural comienza generalmente cuando Ra es mayor que 1000, mientras que para Ra < 10 la transferencia de calor es considerada enteramente por conducción.

$$Ra = \frac{g \cdot B \cdot (\Delta T_1) \cdot D_e}{\nu \cdot \alpha} \quad \text{Ec. 24}$$

Si T_{we} es constante ΔT_1 se define como $\Delta T_1 = T_{we} - T_\infty$, de lo contrario:

$$\Delta T_1 = \frac{(T_{wei} - T_\infty) - (T_{weL} - T_\infty)}{\ln\left(\frac{T_{wei} - T_\infty}{T_{weL} - T_\infty}\right)} \quad \text{Ec. 25}$$

El coeficiente volumétrico de expansión térmica es una propiedad termodinámica del fluido que proporciona una medida de la cantidad por la cual cambia la densidad en respuesta a un cambio de temperatura a presión constante; matemáticamente se expresa como:

$$B = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad \text{Ec. 26}$$

2.12.2 Correlaciones empíricas para el cálculo del coeficiente convectivo

El problema del cálculo de la transferencia de calor ha sido estudiado a través de muchos años. A través del tiempo se han creado variedad de correlaciones empíricas que deducidas por medio de mediciones de transferencia de calor y de masa en condiciones de laboratorio controladas y correlacionando los datos en términos de los parámetros adimensionales apropiados. Esto se aplica a muchas geometrías y condiciones de flujo diferentes y los resultados más importantes se presentan a continuación.

- Coeficiente convectivo interno: una expresión clásica para calcular el número de nusselt para flujo turbulento completamente desarrollado en un tubo circular suave se debe a Dittus Boelter (1930).

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^n \quad \text{Ec 27}$$

- Por lo tanto se tiene que:

$$\bar{h}_i = \frac{D_i}{k} \cdot 0.023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^n \quad \text{Ec. 27}$$

De donde:

$n = 0.4$, cuando la temperatura del gas es menor que la temperatura ambiente externa (calentamiento del gas).

$n = 0.3$, cuando la temperatura del gas es mayor que la temperatura ambiente externa (enfriamiento del gas).

Fuente: Incropera (1.999)

Esta ecuación se cumple para las siguientes condiciones: $0.7 \leq Pr \leq 160$ y $Re \geq 10.000$

Todas las propiedades son evaluadas a T_b

$$T_b = \frac{T_i + T_L}{2} \quad \text{Ec. 28}$$

- Coeficiente convectivo externo: debido a que la tubería interactúa con el medio ambiente, transfiere calor a este principalmente por convección siendo necesario el cálculo de un coeficiente convectivo externo. El cálculo de este coeficiente depende del ambiente que este rodeando la tubería. Existen un numero de diferentes ambientes de transferencia de calor que rodean una tubería dependiendo de la forma como esta sea puesta en operación, para el caso en estudio la tubería está enterrada.

La temperatura y la conductividad térmica del suelo tienen un impacto directo en la tasa de transferencia de calor entre el gas y el suelo, y por lo tanto, en el flujo de gas. Generalmente, mientras más alta sea la temperatura del suelo, más baja será la tasa de transferencia de calor desde el gas (el cual normalmente se encuentra a mayor temperatura) a la superficie terrestre. Así mismo, mientras más alta sea la conductividad del suelo la tasa de transferencia de calor será mayor. El valor de la conductividad térmica del terreno aumenta con la cantidad de agua que este contenga.

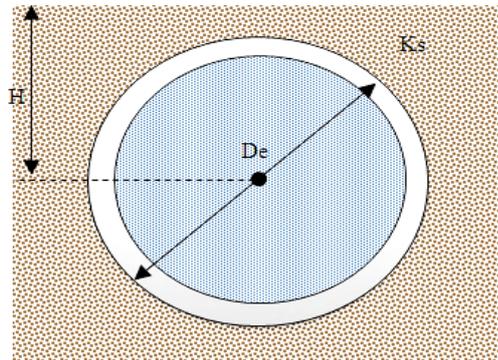


Figura 13: Coeficiente convectivo interno

Otro factor que influye en la transferencia de calor es la profundidad de enterramiento de la tubería. A mayor valor de esta la temperatura del gas se conserva más en la línea disminuyendo la transferencia.

El coeficiente promedio de transferencia de calor del fluido al suelo puede ser calculado según Davenport por la siguiente expresión:

$$\bar{h}_e = \frac{1}{\frac{D_e}{2k_s} \cdot \ln\left(\frac{4H}{D_e}\right)} \quad \text{Ec. 29}$$

Cabe resaltar que la anterior correlación está sujeta a errores, ya que valores como k_s no son constantes porque dependen del contenido de humedad que tenga el suelo, y esta varía con las condiciones atmosféricas como la presencia de lluvias. La conductividad térmica del suelo, depende además de la distribución del tamaño de grano, densidad, textura y composición mineral del suelo.

Otro factor importante en tuberías enterradas es que la temperatura del suelo que rodea la tubería tampoco es constante, pues varía mucho de estación a estación o de un piso térmico a otro. Teniendo en cuenta todo lo anterior, el estudio de la transferencia de calor en tuberías enterradas por métodos empíricos está sujeto a muchos errores por la continua variación de las condiciones reales.

2.12.3 Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia agrupa el coeficiente convectivo externo e interno y las características propias de la tubería y del aislamiento en un solo parámetro asociado directamente con la transferencia de calor.

La transferencia de calor se puede trabajar de una forma análoga a como se trabaja la ley de Ohm en física (electricidad). De la misma manera que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, se asocia una resistencia térmica con la conducción de calor.

Al definir la resistencia térmica R como la razón de una fuerza impulsora ΔT con la transferencia de calor correspondiente q , tenemos:

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad \text{Ec. 30}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad \text{Ec. 31}$$

De donde ΔT y q tienen similitud con el voltaje y la corriente, respectivamente.

Se conoce que la fórmula para la transferencia de calor por conducción en cilindros es:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_m \cdot (T_{wi} - T_{we})}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad \text{Ec. 32}$$

De igual manera que la resistencia térmica para la conducción y convección en cilindros es:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_m} \quad \text{Ec. 33}$$

Representar la transferencia de calor mediante circuitos térmicos equivalentes proporciona una herramienta útil para conceptualizar y entender con menor dificultad este fenómeno.

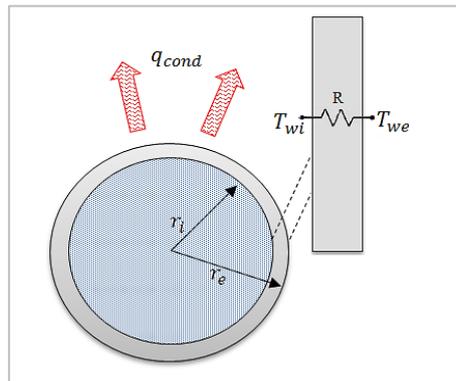


Figura 14: Transferencia de calor a través de circuitos térmicos equivalentes.

De la misma forma, una resistencia térmica también se asocia con la transferencia de calor por convección.

$$R_{conv} = \frac{1}{\bar{h} \cdot A} \quad \text{Ec. 34}$$

Para sistemas combinados en los que se incluyen varios mecanismos de transferencia de calor como convección interna, conducción en el tubo, conducción en el aislante y convección externa es muy útil el desarrollo del problema por el método de la representación gráfica de las resistencias térmicas.

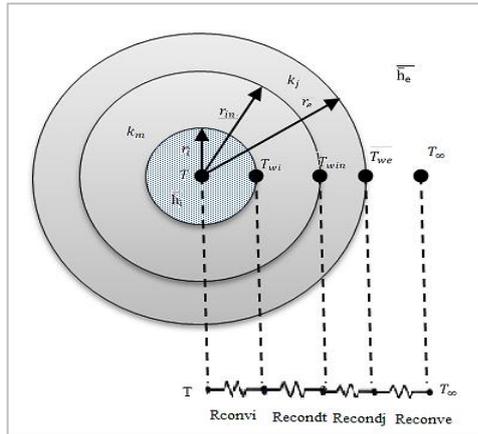


Figura 15: Transferencia de calor para sistemas combinados

La transferencia de calor se determina mediante la consideración por separado de cada mecanismo pero como q es constante a través del cilindro se sigue que el calor total transferido es:

$$q = \frac{T - T_{wi}}{\bar{h}_i \cdot A_i} = \frac{T_{wi} - T_{win}}{\frac{\ln\left(\frac{r_{in}}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_m}} = \frac{T_{win} - T_e}{\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_{in}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_j}} = \frac{T_{we} - T_\infty}{\bar{h}_e \cdot A_e} \quad \text{Ec. 35}$$

En términos de la diferencia total de temperatura y de la resistencia térmica total R_t el calor total transferido se puede expresar como:

$$q = \frac{T - T_\infty}{R_t} \quad \text{Ec. 36}$$

Como las resistencias están en serie pueden sumarse, por lo tanto la resistencia total es:

$$R_t = \frac{1}{\bar{h}_i \cdot A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_{in}}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_m} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_{in}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_j} + \frac{1}{\bar{h}_e \cdot A_e} \quad \text{Ec. 37}$$

Con sistemas compuestos es conveniente trabajar con un coeficiente global de transferencia de calor definido con una expresión análoga a la ley de enfriamiento de Newton. Por lo tanto:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_2 \quad \text{Ec. 38}$$

De lo anterior se puede deducir que:

$$U = \frac{1}{R_t A_e} \quad \text{Ec. 39}$$

El coeficiente global de transferencia de calor es el parámetro más representativo de la transferencia de calor que ocurre en una línea de transporte de gas natural y es el valor más importante para definir el perfil de la temperatura. Por lo tanto, se debe calcular correctamente para conocer los puntos críticos del sistema a considerar y así tomar las medidas necesarias para evitar los problemas que se puedan presentar.

2.13 Definición de flujo bifásico

Consiste en el flujo simultáneo de dos fases de diferentes sustancias o de una misma sustancia en dos fases diferentes. En la mayoría de las industrias se encuentran con frecuencia flujos bifásicos líquido-gas o líquido-líquido. Para predecir el comportamiento de este tipo de mezclas fluyendo por tuberías se hace necesario desarrollar modelos mecanicistas o empíricos con los cuales se puede determinar las caídas de presión y el líquido retenido (holdup) en la tubería, así como los procesos de transferencia de masa y de calor.

Muchos autores han propuesto modelos y correlaciones para describir este tipo de flujo, algunos con un intervalo amplio de aplicación y otros enfocados en cálculos particulares como orientados a la tubería o patrones de flujo específicos. Los llamados modelos empíricos han sido desarrollados correlacionando datos experimentales, mientras que los modelos mecanicistas tratan de describir el fenómeno en sí, lo cual representa la gran ventaja al no limitarse a condiciones específicas como el tipo de fluido o el intervalo del diámetro de tubería. La gran variedad de propuestas de diferentes autores amerita un estudio para la selección de la correlación o modelo que se adapte mejor al caso que se esté estudiando.

Todas las variables calculadas para el flujo bifásico son definidas para condiciones específicas, lo cual representa una problemática para casos donde las propiedades del fluido varían significativamente. Esto trae como consecuencia la incorporación de algoritmos de cálculos especiales, que se basan generalmente en la división de la línea de flujo en segmentos más pequeños cuyas propiedades varían en menor proporción. Otra dificultad existente es la presencia de accesorios en las tuberías, los cuales buscan facilitar el manejo del fluido, pero afectan de manera importante las pérdidas de presión por fricción. Otra variable que complica este tipo de flujo multifásico es el tiempo, es decir, la compresión transitoria del fenómeno.

2.13.1 Diferentes patrones de flujo

Uno de los factores de mayor relevancia en el estudio de flujo bifásico son los patrones de flujo, los cuales se refieren a las diversas configuraciones que adquieren las fases dentro de la tubería, cuando ambas viajan simultáneamente. Existen diversas clasificaciones basadas en las observaciones visuales de los diferentes autores. La predicción de estos, resulta de gran importancia en la determinación de la caída de presión y el *holdup* de líquido, pues buena parte de las correlaciones empíricas y modelos mecanicísticos empleados en estos cálculos, dependen del patrón de flujo presente para las condiciones de trabajo.

- a) Flujo segregado: dentro de esta clasificación general se presenta como característica común la baja velocidad de la fase líquida, mientras que la velocidad de la fase gaseosa puede ir entre baja a moderada. Dentro de la clasificación de flujo segregado se encuentran: flujo estratificado, flujo ondulado y flujo anular.
- b) Flujo Intermitente: en esta clasificación general se presenta como característica predominante que la fase líquida posee una velocidad moderada, mientras que la fase gaseosa está entre moderada y alta. Dentro de la clasificación de flujo Intermitente se encuentran: flujo tapón (slug) y burbuja alargada.
- c) Flujo Distribuido: dentro de esta clasificación general la característica predominante es que una de las dos fases es dominante sobre la otra, dado

que el flujo de una de estas es mucho mayor a la otra y por lo tanto su velocidad. En esta categoría de flujo distribuido se encuentran: flujo burbuja y flujo disperso.

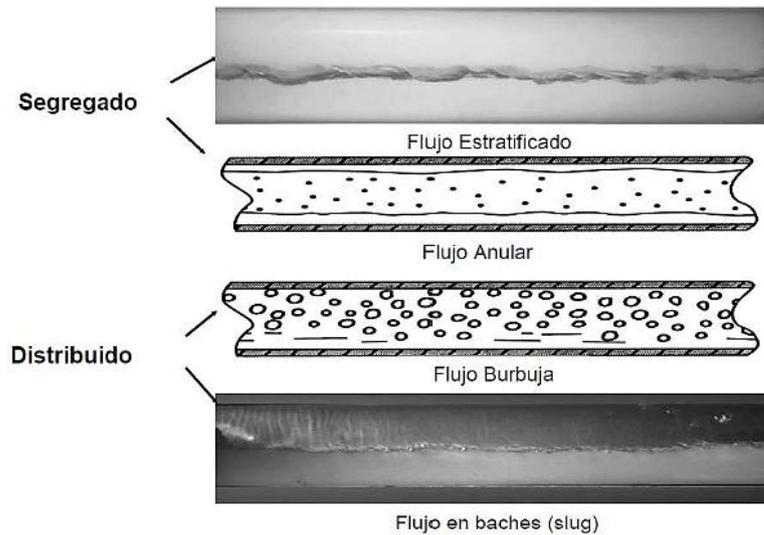


Figura 16: Patrones de flujo en tubería horizontal. Imagen obtenida de Gómez (2010)

- d) Flujo estratificado: en este patrón flujo la mayor parte del líquido se desplaza en el fondo de la tubería y el gas en la parte superior de la tubería, formando así, una inter-fase entre líquido y gas.
- e) Flujo Anular: en este patrón de flujo una de las fases forma una película alrededor de la pared interna de la tubería, la fase que presenta la mayor velocidad se encuentra en contacto con la otra fase, ya que la fase que se encuentra en contacto con la tubería es más lenta.
- f) Flujo burbuja: en este patrón las burbujas de gas se desplazan en la parte superior de la tubería de producción aproximadamente a la misma velocidad que el líquido.
- g) Flujo tapón: en este patrón de flujo la velocidad del gas es muy alta y propicia el levantamiento de ondas periódicas a lo largo de la tubería.

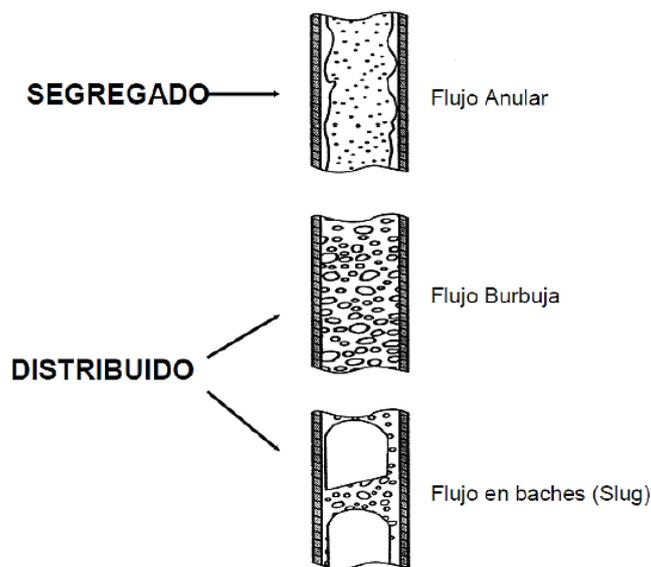


Figura 17: Patrones de flujo en tubería horizontal. Imagen obtenida de Gómez (2010)

El tipo de fluido que se espera como resultado en la tubería es estudio es de tipo estratificado, ya que este suele encontrarse en pendientes negativas o tramos horizontales, y de tipo tapón que por lo general aparece en pendientes positivas, donde se está en presencia de flujo ascendente.

2.14 Simulador OLGA

El simulador OLGA (simulador de gas y crudo) fue originalmente desarrollado por un programa conjunto de investigación, en el que estaban involucradas organizaciones de investigación y diversas compañías petroleras (Bendiksen et al., 1991). El objetivo era simular flujos transitorios lentos asociados con transporte de masa. Con OLGA se puede simular el flujo de hidrocarburos en tuberías, en redes de tuberías y en equipo de proceso que formen parte de estos sistemas.

El simulador OLGA fue desarrollado por los Institutos Noruegos SINTEF (Consortio de Institutos de Investigación) e IFE (Instituto para la Tecnología de la Energía). Desde el inicio del proyecto, el código OLGA ha sido continuamente mejorado gracias al incremento de la base de datos experimental del laboratorio de SINTEF y al uso extensivo de pruebas numéricas del IFE y las compañías

petroleras involucradas en el proyecto. Para mayores referencias consultar el trabajo de Bendiksen (1991).

OLGA puede simular flujo transitorio de tres fases. La herramienta de simulación es un modelo de dos fluidos, con una relación de deslizamiento (relación entre dos velocidades de fase) de correlación para separar el aceite y el agua. OLGA se basa en ecuaciones de masa, cantidad de movimiento y conservación de energía.

A continuación se tiene las ecuaciones de continuidad separadas que se aplican para el gas, líquidos y gotas de líquido, que pueden ser acopladas a través de la transferencia de masa en la interfaz para el modelo de dos fluidos que originalmente fue usado para el desarrollo de OLGA.

Conservación de la masa para:

Fase de Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (V_g \cdot \rho_g) = -\frac{1}{A_t} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot (A_t \cdot V_g \cdot \rho_g \cdot v_g) + \psi_g + G_g \quad \text{Ec. 40}$$

Fase líquida en la pared:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (V_L \cdot \rho_L) = & -\frac{1}{A_t} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot (A_t \cdot V_L \cdot \rho_L \cdot v_L) - \psi_g \cdot \frac{V_L}{V_L + V_D} - \psi_e \\ & + \psi_D + G_L \end{aligned} \quad \text{Ec. 41}$$

Gotas de líquido:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (V_D \cdot \rho_L) = & -\frac{1}{A_t} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot (A_t \cdot V_D \cdot \rho_L \cdot v_D) - \psi_g \cdot \frac{V_D}{V_L + V_D} - \psi_e \\ & + \psi_D + G_D \end{aligned} \quad \text{Ec. 42}$$

De donde V_g , V_L , V_D se refieren a fracciones de volumen de gas, líquido-película y líquido-gotas respectivamente, A_t es el área de la sección transversal de la tubería,

ψ_g es la tasa de transferencia de masa entre las fases, la ψ_e y ψ_D es la tasa de arrastre y deposición. Una posible fuente de masa de fase f se da como G_f . Los subíndices g, L, D e i denotan gas, líquido, gotita y la interfaz.

A continuación las ecuaciones de conservación de momento expresada para el gas, las posibles gotas de líquidos y líquidos en la pared.

Fase de Gas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (V_g \cdot \rho_g \cdot v_g) &= -V_g \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{A_t} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot (A_t \cdot V_g \cdot \rho_g \cdot v_g^2) - \lambda_g \cdot \\ \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot |v_g| \cdot v_g \times \frac{S_g}{4 \cdot A_t} + \lambda_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot |v_r| \cdot v_r \cdot \frac{S_i}{4 \cdot A_t} + V_g \cdot \rho_g \cdot g \cdot \cos \alpha & \quad \text{Ec. 43} \\ + \psi_g \cdot v_a - F_D & \end{aligned}$$

Gotas de líquido:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (V_D \cdot \rho_L \cdot v_D) &= -V_D \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{A_t} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot (A_t \cdot V_D \cdot \rho_L \cdot v_D^2) + \\ V_D \cdot \rho_L \cdot g \cdot \cos \alpha + \psi_g \cdot \frac{V_D}{V_L + V_D} \psi_e + \psi_D \cdot v_i - \psi_D \cdot v_D + F_D & \quad \text{Ec. 44} \end{aligned}$$

La ecuación 44 y 45 se pueden combinar para no considerar el arrastre de gas y/o gotas, F_D :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (V_g \cdot \rho_g \cdot v_g + V_D \cdot \rho_L \cdot v_D) &= -(V_g + V_D) \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{A_t} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot \\ (A_t \cdot V_g \cdot \rho_g \cdot v_g^2 + A_t \cdot V_D \cdot \rho_L \cdot v_D^2) \times -\lambda_g \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot |v_g| \cdot v_g \cdot \frac{S_g}{4 \cdot A_t} - & \quad \text{Ec. 45} \\ \lambda_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot |v_r| \cdot v_r \cdot \frac{S_i}{4 \cdot A_t} + (V_g \cdot \rho_g + V_D \cdot \rho_L) \cdot g \cdot \cos \alpha + \psi_g \cdot \frac{V_L}{V_L + V_D} v_a + \\ \psi_e \cdot v_i - \psi_d \cdot v_D & \end{aligned}$$

Líquido en la pared:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (V_L \cdot \rho_L \cdot v_L) &= V_L \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{A_t} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot (A_t \cdot V_L \cdot \rho_L \cdot v_L^2) - \lambda_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot \\ |v_L| \cdot v_L \times \frac{S_L}{4 \cdot A_t} + \lambda_i \cdot \rho_g \cdot \frac{1}{2} \cdot |v_r| \cdot v_r \cdot \frac{S_i}{4 \cdot A_t} + V_L \cdot \rho_L \cdot g \cdot \cos \alpha + \psi_g \cdot \\ \frac{V_L}{V_L + v_D} \cdot v_a - \psi_e \cdot v_i - \psi_D \cdot v_D \cdot V \cdot d \cdot (\rho_L - \rho_g) \cdot g \cdot \frac{\partial V_L}{\partial z} \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad \text{Ec. 46}$$

De donde, p es la presión, α es la inclinación de la tubería vertical, el S_f son los perímetros humedecidos de la fase f dada. La fuente interna G_f se supone que entrar en un ángulo de 90° con la pared de la tubería, por lo tanto no existe un momento neto. Cuando $\psi > 0$ la evaporación de la película líquida es igual a $v_a = v_L$, y la evaporación de las gotas de líquido es igual a ($v_a = v_D$). Para $\Psi < 0$ la condensación es igual a ($v_a = v_g$). Las ecuaciones de conservación se pueden aplicar a todos los regímenes de flujo posibles. La siguiente ecuación define el deslizamiento velocidad relativa, v_r

$$v_g = R_D (v_L + v_r) \quad \text{Ec. 47}$$

El R_D es una relación de deslizamiento de distribución causada por una distribución desigual de las fases y velocidades a través de la sección transversal de la tubería. Una definición similar para la velocidad de la gota se define por v_{0D} , que es la velocidad de caída de las gotas.

$$v_D = v_g - v_{0D} \quad \text{Ec. 48}$$

El simulador OLGA reformula el problema antes de discretizar las ecuaciones diferenciales para obtener una ecuación de presión. La conservación de la masa (Ec. 41 y 43) se puede expandir con respecto a la presión, temperatura y composición de las fases. Esto supone que las densidades se dan como:

$$\rho_f = \rho \cdot (p, T, R_s) \quad \text{Ec. 49}$$

R_S es la fracción de masa de gas. Después de insertar las ecuaciones de conservación de la masa y aplicando la ecuación 51:

$$V_g + V_L + V_D = 1 \quad \text{Ec. 50}$$

Se tiene una sola ecuación para la presión y los flujos de la fase:

$$\left[\frac{V_g}{\rho_g} \cdot \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial p} \right)_{T,R_S} + \frac{1-V_g}{\rho_L} \cdot \left(\frac{\partial \rho_L}{\partial p} \right)_{T,R_S} \right] \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{A_t \cdot \rho_g} \cdot \frac{\partial (A_t \cdot V_g \cdot \rho_g \cdot v_g)}{\partial z} - \frac{1}{A_t \cdot \rho_L} \cdot \frac{\partial (A_t \cdot V_L \cdot \rho_L \cdot v_L)}{\partial z} - \frac{1}{A_t \cdot \rho_L} \cdot \frac{\partial (A_t \cdot V_D \cdot \rho_L \cdot v_D)}{\partial z} + \psi_g \cdot \left(\frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_L} \right) + G_g \cdot \frac{1}{\rho_g} + G_L \cdot \frac{1}{\rho_L} + G_D \cdot \frac{1}{\rho_L} \quad \text{Ec. 51}$$

La conservación de la energía de la mezcla se expresa por la ecuación 53:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot [m_g \cdot (E_g + \frac{1}{2} \cdot v_g^2 + g \cdot h) + m_L \cdot (E_L + \frac{1}{2} \cdot v_L^2 + g \cdot h) + m_D \cdot (E_D + \frac{1}{2} \cdot v_D^2 + g \cdot h)] = - \frac{\partial}{\partial z} \cdot [m_g \cdot v_g \cdot (H_g + \frac{1}{2} \cdot v_g^2 + g \cdot h) + m_L \cdot v_L \cdot (H_L + \frac{1}{2} \cdot v_L^2 + g \cdot h) + m_D \cdot v_D \cdot (H_D + \frac{1}{2} \cdot v_D^2 + g \cdot h)] + H_S + U \quad \text{Ec. 52}$$

E es la energía interna por unidad de masa, h es la elevación, H_S es la entalpía de las fuentes de masas y U es la transferencia de calor desde las paredes de la tubería.

La información que se necesita como entrada al simulador OLGA consiste de 7 archivos. Dos de ellos son indispensables y cinco opcionales. El primero de los archivos necesarios contiene la información particular del caso de estudio tal como la geometría, las condiciones operativas, las variables que se solicitan como salida, etc. Toda esta información está organizada en grupos de elementos físicos similares.

El segundo de estos archivos contiene las tablas de propiedades de los fluidos, el cual es una parte clave para el correcto funcionamiento de OLGA. El grupo de propiedades de transporte del fluido que requiere OLGA para resolver el sistema

de ecuaciones es generado por el simulador PVTsim™, el cual es una parte integral de OLGA. PVTsim™ es de índole predictivo, lo que significa que es capaz de estimar las propiedades PVT del fluido a partir de ecuaciones de estado, además de poseer una base de datos con las propiedades de los principales fluidos hidrocarburos y no hidrocarburos.

La información opcional está constituida por datos de equipo de proceso como bombas y compresores (cuando se desean incorporar al sistema de estudio), de otros datos (cuando se requieren realizar, por ejemplo, estudios de depósito de asfáltenos o de formación de hidratos) y de archivos como el de reinicio o “restart” (cuando se desea que el sistema realice determinados cálculos, tomando como punto de partida la información referente a un cierto tiempo, resultado de cálculos anteriormente realizados).

Los sistemas de flujo dentro de OLGA están constituidos por uno o más ramales o “branches”. Cada ramal consiste de una secuencia de tuberías o “pipes” y cada tubería está dividida en secciones. Estas secciones corresponden a las celdas de discretización empleadas en el modelo numérico.

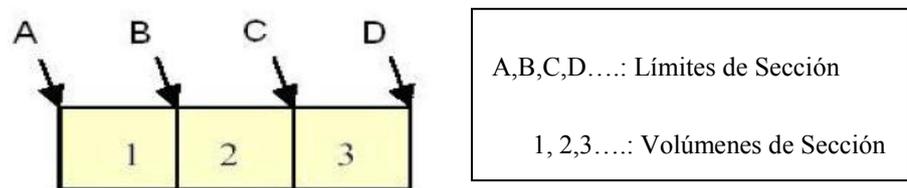


Figura 18: Representación de la discretización de la tubería

Las variables de flujo (velocidades, desplazamiento, etc.) son definidas en los límites de sección (A, B, C y D en la figura 17 mientras que otras variables como son presión, temperatura, etc., son reportados como valores promedio dentro de los volúmenes de sección 1, 2 y 3 en la figura 18).

CAPÍTULO III

3. Marco Metodológico

Este capítulo contiene los métodos, técnicas, estrategias y procedimientos necesarios para cumplir los objetivos propuestos de este proyecto. La metodología tiene por objeto proporcionar un modelo que permita elaborar un plan general, para determinar las operaciones necesarias que permitan obtener una respuesta o solución directa a las necesidades específicas de un problema (ver figura 19).

Por ello, el diseño metodológico estuvo orientado a la elaboración de una matriz de selección para obtener una herramienta de limpieza (HDL) acorde a las características de la tubería en estudio. Posterior a esta selección, se realizaron los siguientes procedimientos claves para el cumplimiento de los objetivos planteados, que fueron: realizar la selección por catálogo de la herramienta seleccionada y su posterior diseño apoyándonos en el programa de diseño Solid Word versión 2012, y determinar teóricamente todos los factores asociados a la HDL. Seguidamente, se procedió a evaluar el comportamiento fluido dinámico de la herramienta de limpieza seleccionada generando un caso base. Esta evaluación se realizó de manera transitoria a través del simulador comercial de flujo de fluidos llamado OLGA.

Por último, se realizó un estudio de sensibilidades de distintos parámetros de interés dentro de las corridas de herramientas, como lo son:

- a) Factores de fugas,
- b) Fuerza estática y peso de la herramienta
- c) Factor de fricción de pared,
- d) Fuerzas de resistencia lineal
- e) Fuerzas de resistencia cuadrática
- f) Flujo másico.

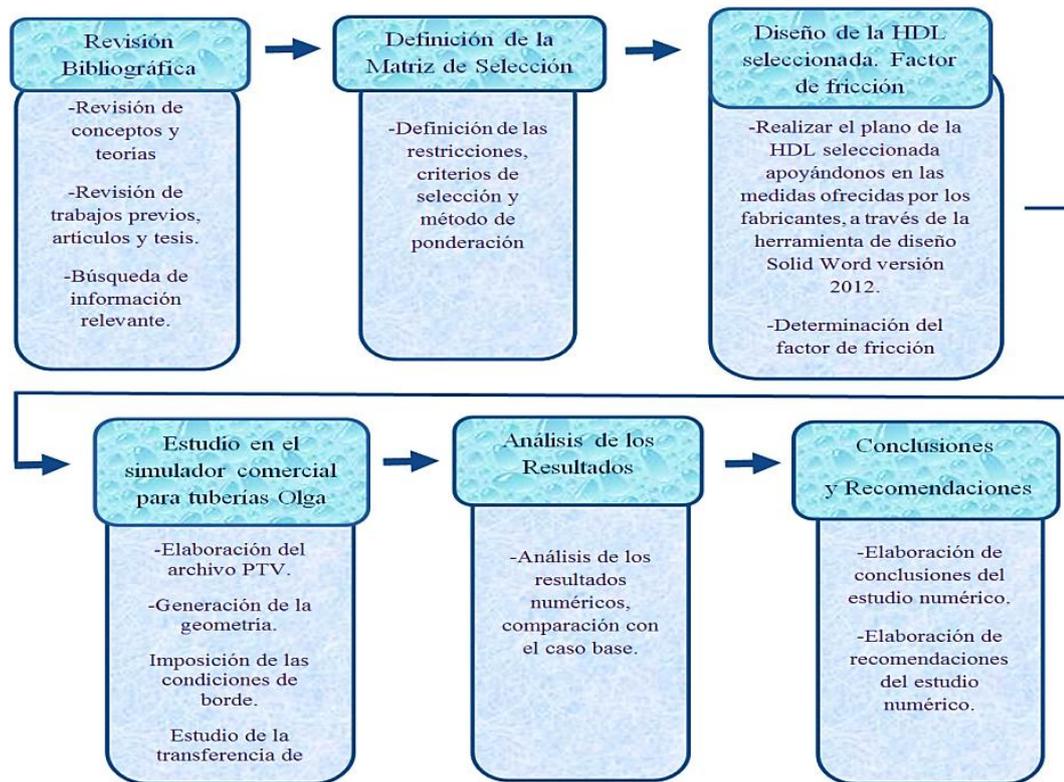


Figura 19: Esquema de la metodología planteada.

3.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica completa, iniciando con la búsqueda de tecnologías de herramientas de limpieza disponibles en el mercado nacional e internacional, así como diversas lecturas de trabajos previos y artículos relacionados a la corrida de herramientas, con el fin de obtener conocimientos generales acerca del área. Se culminó la búsqueda consultando manuales del simulador OLGA, simulación numérica y textos sobre el tema en estudio con la finalidad de conocer las lecciones aprendidas y recomendaciones que los investigadores citan en los trabajos.

3.2 Definición de la matriz de selección - Método de ponderación de criterios y soluciones

Con base en los trabajos previos y en lo que se ha derivado de la revisión bibliográfica referente a las herramientas de limpieza disponibles en el mercado, se consideró usar el método de ponderación de criterios y soluciones propuesto

por Vilchez (2008), el cual permitió desarrollar la matriz de selección en base a las especificaciones de diseño y las probables soluciones para el problema.

Las especificaciones de diseño se distinguen en tres tipos: restricciones, criterios y funciones principales. Las restricciones son especificaciones que nos permiten rechazar algunas de las probables soluciones sin necesidad de compararlas con las restantes. Los criterios son especificaciones usadas para comparar soluciones y eventualmente decidir cuál de ellas es la mejor. El analista debe indicar explícitamente cuales son las funciones principales.

Las especificaciones generan una serie de restricciones y criterios necesarios para desarrollar el método de selección. Las restricciones propuestas por los autores vienen dadas por dos tipos de especificaciones, que son: especificaciones referidas al proceso de operación y especificaciones referidas al proceso de manufactura. Mientras que los criterios están asociados a cuatro tipos de especificaciones que son referidas al: proceso de diseño, proceso de manufactura, proceso de mantenimiento y proceso de operación.

Así, fueron definidos cinco restricciones y once criterios, de donde el orden de importancia para cada uno de ellos se definió con base a las necesidades en operaciones de corridas de herramienta, experiencia de personal de operaciones y recomendaciones en la literatura especializada.

Restricciones:

1. **Capacidad para manejo de gas:** se refiere a la habilidad que debe poseer la herramienta de limpieza para trabajar con gas, es decir, la HDL debe estar diseñada bajo ciertas especificaciones que le permitan el manejo de dicho fluido.
2. **Capacidad para remoción y limpieza de líquidos:** esta restricción no es más que la destreza que posee la HDL para desplazar los residuos (líquido acumulado-condensado) presentes dentro de la tubería de un lugar a otro.
3. **Materiales de la HDL inertes al fluido:** el material del cual está hecha la HDL debe carecer de la capacidad de provocar reacciones químicas al ponerse en contacto con el fluido de trabajo. De no cumplir con esta

restricción, la herramienta de limpieza puede sufrir una degradación o desgaste durante la corrida, generando pérdida de sello en la HDL, obstrucción de la herramienta, remoción de líquido ineficiente, riesgo de la integridad interna de la tubería, paradas operacionales inesperadas, etc.

4. **Accesorios (Cepillos, Cuchillas, imanes, etc.):** aquellos elementos que pueden ser parte de un sistema o de una máquina que ejecute una función de importancia, también es una restricción a evaluar. El diseño de la HDL puede poseer elementos que aumenten la eficiencia de la remoción de líquido acumulado dentro de la tubería.
5. **Uso de HDL con la tubería sucia:** existen herramientas que debido a su configuración, requieren que antes de ser utilizadas la tubería se encuentre limpia, es decir, es necesario realizar una limpieza previa a su uso (son herramientas que cumplen funciones de inspección dentro de la tubería).

Criterios:

1. **Capacidad para manejo de gas:** este criterio de selección se refiere a qué tan eficiente es la herramienta de limpieza cuando usa como fluido para su movimiento un gas.
2. **Capacidad para remoción y limpieza de líquidos:** este criterio permite calificar la destreza que posee la HDL para desplazar el líquido acumulado presentes dentro de la tubería.
3. **Temperatura de Operación:** diversas propiedades fisicoquímicas de los materiales o las sustancias varían en función de la temperatura a la que se encuentren. Por ello, conocer el valor de temperatura al cual estará expuesta la HDL durante la corrida es de suma importancia, ya que al ser sometida a un valor de temperatura que no se encuentre dentro de su rango de diseño se podrían presentar diversos inconvenientes durante el proceso de limpieza, como la deformación del material o geometría.
4. **Capacidad para soportar presiones:** este criterio se refiere a la capacidad que debe tener la HDL para soportar la presión máxima de operación durante el proceso de limpieza sin que sufra algún cambio de geometría.

5. **Capacidad de la HDL para controlar la velocidad:** este criterio de selección está estrechamente relacionado con la capacidad que debe poseer la HDL para soportar el valor de presión máximo de operación. El control de la velocidad de la herramienta de limpieza en un gasoducto es relevante, ya que los procesos de expansión y compresión del gas tienden a acelerar o desacelerar la herramienta, lo que causará daños por impactos con los accesorios o algún cambio de ángulo que tenga la tubería. Es importante recordar que durante la corrida, la herramienta es impulsada por el fluido de trabajo, por lo tanto, es necesario mantener un diferencial de presión durante el proceso que permita mantener la velocidad de HDL dentro de valores operacionalmente manejables reduciendo problemas operacionales, por ejemplo: estancamiento y atascamiento de HDL, remoción de líquido ineficiente, paradas operacionales inesperadas, entre otras. Adicionalmente, un buen control de la velocidad de la HDL garantiza la remoción del líquido acumulado de forma más eficiente.
6. **Resistente a la abrasión:** el desgaste producido en la superficie de un cuerpo por la fricción es un criterio muy importante a evaluar, ya que durante la corrida de la HDL pudiese existir una pérdida de material de la misma, lo que podría ocasionar diversos inconvenientes en el proceso, como lo son: una mala limpieza, pérdida del sello de la herramienta, entre otras.
7. **Materiales de la HDL inertes al fluido:** este criterio de selección permite calificar qué tan bueno es el material del cual está hecha la HDL, sabiendo así si provocará alguna reacción química al ponerse en contacto con el fluido de trabajo.
8. **Accesorios (Cepillos, Cuchillas, imanes, etc.):** el diseño de la HDL puede poseer elementos que aumenten la eficiencia de la remoción de líquido acumulado dentro de la tubería, este criterio cuantifica ese valor.
9. **HDL Reusable:** este criterio se refiere a la capacidad que posee la configuración de la HDL para ser usada varias veces sin que la remoción del líquido se encuentre comprometida, es decir, la herramienta puede

utilizarse en más de un proceso de limpieza siempre y cuando su integridad no este afectada, lo que conlleva a la reducción de costos.

10. **HDL Ligera:** a pesar de que diversos estudios aseguran que el peso de la herramienta de limpieza no es un factor relevante durante la corrida (Jayawardena, Dykhno y Hudson, 2002), y al mismo tiempo otros autores opinan lo contrario (Fragoso, 2007), se tomara en cuenta este criterio para que los resultados obtenidos puedan ser comparados con la bibliografía y también con la finalidad de que nuestro estudio pueda contribuir en cierta medida con nuevos criterios que le permitan al investigador tener mayor información sobre este punto. Además, es de nuestro interés saber si el peso de la HDL repercute en la cantidad de presión necesaria para poder impulsarla a lo largo de la tubería.
11. **Costo:** este criterio de selección considera el valor monetario que tiene cada tipo de herramienta de limpieza seleccionada.

El método de ponderación de criterios y soluciones consta de las tres etapas que son:

- a) Se estudian todas las probables soluciones generada durante la etapa de búsqueda. Se debe efectuar un análisis de las probables soluciones con el propósito de comprenderlas mejor, captar sus ventajas y desventajas, e incluso hacer modificaciones si lo considera necesario.
- b) Se aplican las restricciones a todas las probables soluciones. Teniendo en cuenta las siguientes premisas: a) las restricciones permiten eliminar probables soluciones, sin necesidad de compararlas entre sí, b) para que una probable solución se convierta en solución es necesario que cumpla con todas las restricciones del problema.
- c) Se aplican los criterios a las soluciones. Esta etapa consta de tres pasos: a) ponderación de criterios, b) ponderación de soluciones de acuerdo a cada uno de los criterios y c) ponderación final de soluciones.

Para la ponderación de las soluciones, se propuso el número tres (3) como puntuación más alta y el número cero (0) como la puntuación más baja

3.3 Descripción del diseño de la HDL seleccionada

Se ha planteado un diseño de acuerdo a las HDL disponibles en el mercado, a través de la herramienta de diseño Solid Word versión 2012. El diseño consta de un cuerpo de acero de 771.89mm de longitud y dos discos de poliuretano de 482.6mm de diámetro cada uno.

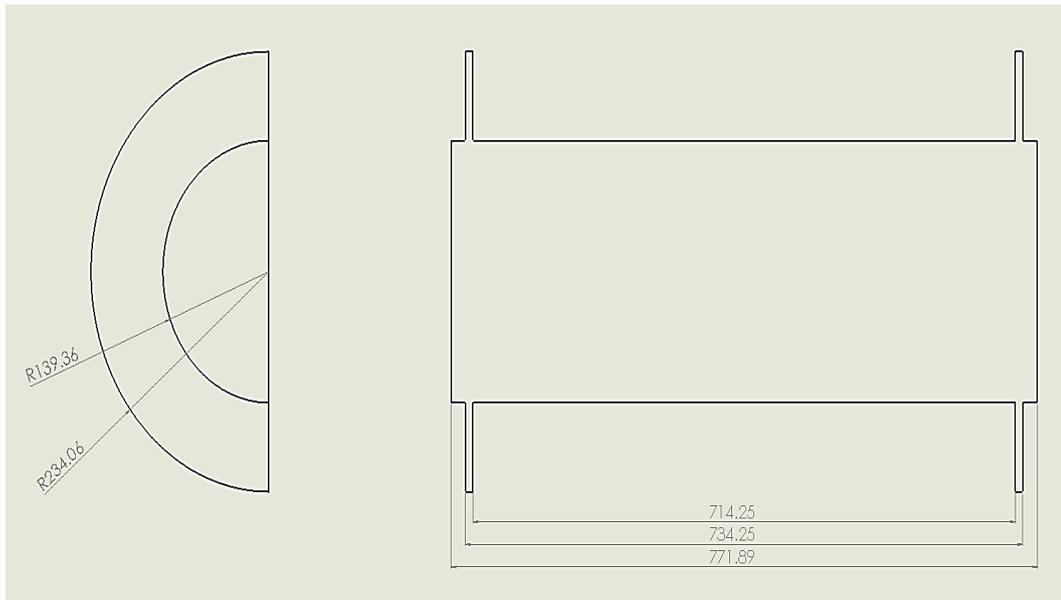


Figura 20: Plano de la HDL metálica

3.4 Calculo de los parámetros asociados a la HDL

En este estudio, uno de los mayores contratiempo estuvo relacionado con determinar los parámetros que están asociados a la herramienta de limpieza (los cuales son datos de entrada para la simulación) y su viaje a través de la tubería. Estos parámetros son: fuerza de fricción estática, factor de fricción de pared, fuerza de resistencia lineal, fuerza de resistencia cuadrática, factores de fuga (Factor de fuga, Coeficiente de fuga, Coeficiente de apertura). Todos estos parámetros son datos de entrada para el simulador, por lo tanto, es necesario desarrollar un procedimiento de cálculo que permita su estimación debido a que muchos de estos no son dados directamente por el fabricante. En ese sentido, en este trabajo se realizó una búsqueda bibliográfica sobre modelos matemáticos que permitiera determinar el valor de estas variables.

El procedimiento de cálculo de estos parámetros permitirá tener una simulación más ajustada a la realidad del proceso de corrida de herramientas. Los modelos matemáticos usados han sido evaluados en diversos estudios a través de estudios de dinámica de fluidos computacional, así como de manera experimental y analítica. A continuación se presenta la referencia usada para el cálculo de cada variable cuyo procedimiento de cálculo se presenta en el Apéndice A.

- **Fuerza de propulsión:** el procedimiento de aplicación para el cálculo de esta fuerza fue extraído de Sainson (2007), y se obtiene utilizando la ecuación 1.
- **Fuerza de fricción estática:** el procedimiento de aplicación para el cálculo de esta fuerza fue extraído de Kane y Sternheim (1992), y se obtiene utilizando la ecuación 3.
- **Factor de fricción de pared:** el procedimiento de aplicación para el cálculo de este factor fue extraído de Botros y Golshan (2010), y se obtiene utilizando la ecuación 7.
- **Fuerza de resistencia lineal:** el procedimiento de aplicación para el cálculo de esta fuerza fue extraído de Kane y Sternheim (1992), y se obtiene utilizando la ecuación 9.
- **Fuerza de resistencia cuadrática:** el procedimiento de aplicación para el cálculo de esta fuerza fue extraído de Kane y Sternheim (1992), y se obtiene utilizando la ecuación 10.
- **Factores de fuga:** el procedimiento de aplicación para el cálculo de estos tres factores fue extraído del manual para el usuario de OLGA versión 7.3.3 (2013), que son:
 1. **Factor de fuga:** se obtiene utilizando la ecuación 14
 2. **Coefficiente de fuga:** se obtiene utilizando la ecuación 17
 3. **Coefficiente de apertura:** se obtiene utilizando la ecuación 15

3.5 Simulación fluido dinámica transitoria con Olga

Se realizarán simulaciones computacionales para representar el comportamiento fluido dinámico de la herramienta de limpieza considerando la variación de diversos parámetros de interés. La simulación se realizó usando el programa comercial de flujo multifásico transitorio llamado OLGA. El flujo de trabajo que se realiza para poder llevar a cabo una simulación en OLGA se presenta en la figura 21.

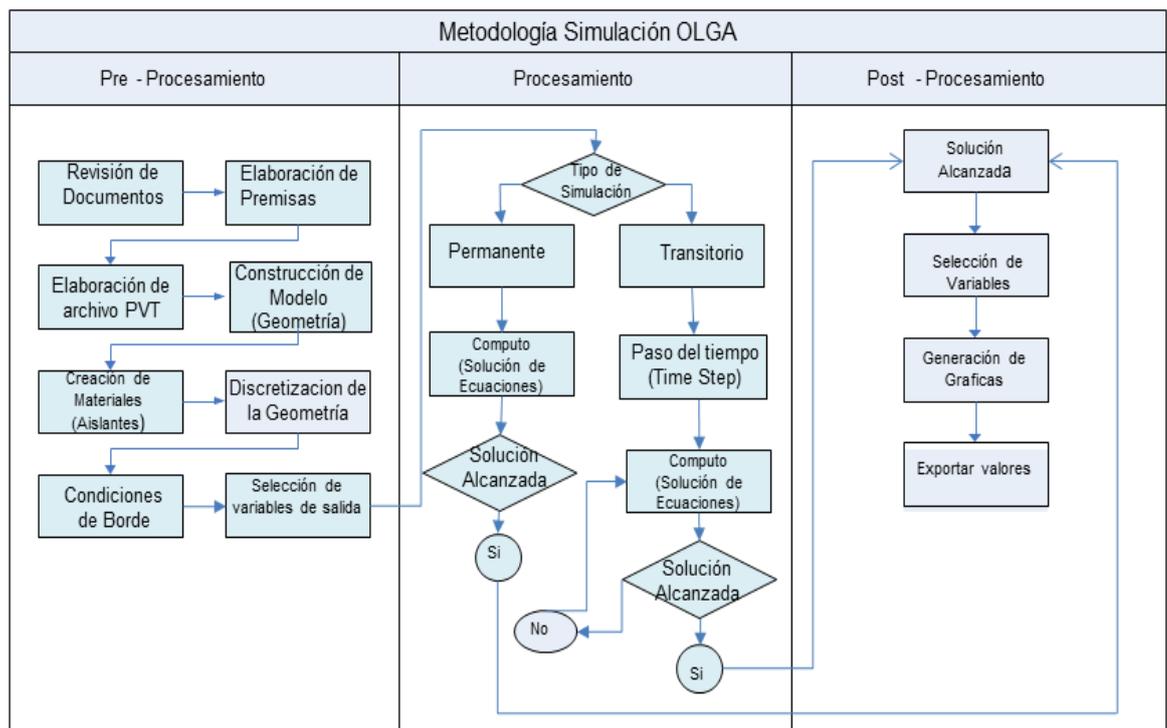


Figura 21: Flujo de trabajo en el simulador comercial OLGA. Imagen obtenida de Pérez (2015)

3.5.1 Capacidades computacionales empleado para las simulaciones

Para las simulaciones numéricas se utilizó una computadora que posee las siguientes características:

Tabla 1: Especificaciones del recurso computacional disponible

Marca y modelo	Procesador	Sistema operativo	Memoria RAM	Disco duro	Tarjeta de video
DELL	Intel Xeon	Windows	24 GB	2 Disco	Tarjeta de

Precision T5500	X5647 @2.93 Ghz Core: 4 #Threads: 8	7, 64bits.		duro de alta velocidad con 256 GB	video línea NVIDIA Quadro, con 2Gb.
-----------------	--	------------	--	-----------------------------------	-------------------------------------

3.5.2 Metodología del proceso de simulación

El proceso de simulación en general estará sujeto a las siguientes premisas:

- Tubería nueva, por lo que no existen históricos de producción para comparación y ajuste de la simulación.
- Presión y temperatura de salida igual a 6,99MPa (1.015 Psia) y 15°C, respectivamente.
- Flujo másico igual a 20Kg/s constante.
- El tamaño de la discretización de la tubería se halla en 40 secciones, con una longitud por sección entre 0,5 veces a 2 veces mayor a la longitud de la sección anterior, según el manual para el usuario de OLGA versión 7.3.3, (2013), además, la tubería debe estar discretizada al menos dos secciones. Este proceso de discretización lo realiza de manera automática el simulador.
- El paso del tiempo utilizado en las simulaciones es calculado de manera automática por el simulador, en función del número de Courant-Friedrichs-Lewy, que es igual a 0,8 según el manual para el usuario de OLGA versión 7.3.3, (2013)., y la menor velocidad del fluido en toda la tubería

3.5.2.1 Acumulación de líquido en la tubería

Se realizará una primera simulación para acumular líquido en la tubería, con la finalidad de promover obstrucciones en la línea de flujo y así generar la necesidad de hacer una corrida de herramientas para desplazar el líquido. El proceso de acumulación de líquido tendrá un tiempo de duración de 167 días.

3.5.2.2 Caso base

El “Caso base” será una simulación que tendrá una duración de 5 días, que inicia luego de los 167 días de la acumulación de líquido. La finalidad del caso base es

poder comparar los resultados obtenidos en los estudios paramétricos. Este estudio considerará las premisas iniciales y parámetros de la HDL cuyos cálculos son realizados según Apéndice A (Ver tabla 2).

Tabla 2: Parámetros de simulación para el caso base

Fuerza estática [N]	Factor de fricción de pared [Ns/m]	Fuerza de resistencia lineal [Ns/m]	Fuerza de resistencia cuadrática [Ns^2/m^2]	Masa de la HDL [Kg]	Factor de fuga [-]
223,44	111,745	0	163,148	57	0,028

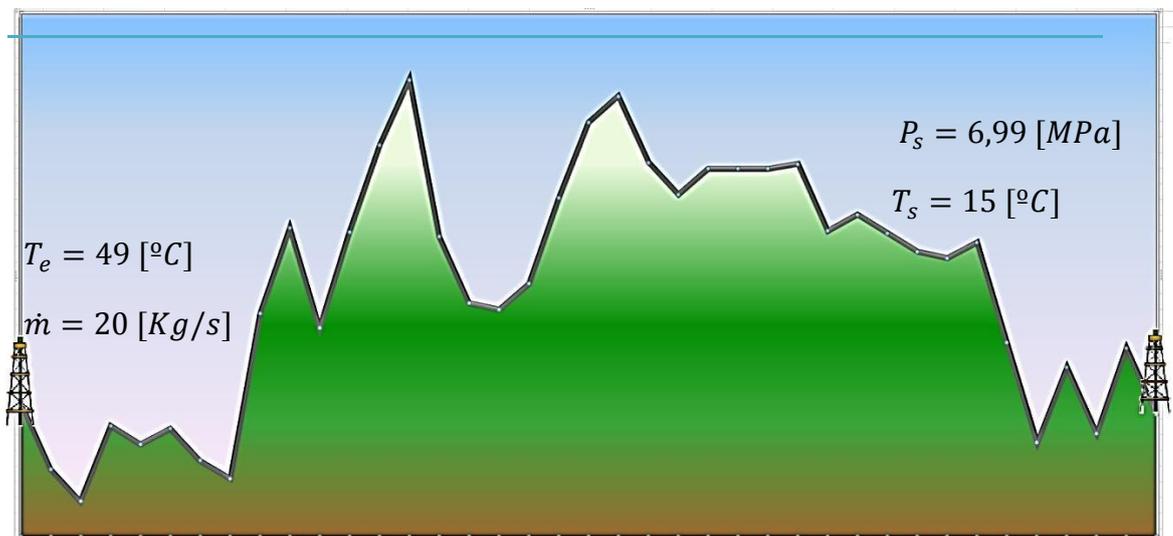


Figura 22: Condiciones de borde o frontera para el Caso Base

3.5.2.3 Estudio paramétrico

Se realizará un estudio paramétrico de seis variables asociadas a la herramienta de limpieza por 5 días, que iniciarán luego de los 167 días de la acumulación de líquido, con el propósito de obtener resultados que se ajusten más a la realidad. Dichos estudios, estarán basados en los datos descritos en la tabla 2, donde el único parámetro a variar será el estudiado en cada caso, es decir, el resto de los parámetros quedaran fijos.

Los estudios paramétricos estarán establecidos en el siguiente orden:

1. **Variación de los factores de fugas:** este estudio paramétrico estará conformado por cuatro casos, que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3: Parámetros de simulación para los Factores de Fuga

Número de caso	Factor de fuga	Gap
Caso 1	0,000539	0,0000914
Caso 2	0,00284	0,0004826
Caso 3	0,011	0,0019304
Caso Base	0,028	0,004826
Caso 4	0,084	0,01447

Cada uno de los valores asignados a las fugas se muestra en la tabla 3, y son producto de un tamaño de gap (separación que existe entre la HDL y la tubería) en específico (ver Apéndice B).

2. **Fuerza estática-Masa de la HDL:** este estudio paramétrico estará conformado por cinco casos, que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4: Parámetros de simulación para a fuerza estática-Masa de la HDL

Numero de Caso	Masa [Kg]	Fuerza Estática [N]	Factor de fricción de pared [Ns/m]
Caso 1	225	1000	499,996
Caso 2	126	493,92	246,91
Caso 3	88	344,96	172,43
Caso Base	57	223,44	111,745
Caso 4	34	133,28	66,59

La valores de la masa de la HDL están en función de tuberías de diámetro interno igual 0,4826m y fueron tomados de una publicación de la página web <http://www.tdwimages.com/>, 2007, y el cálculo posterior de la fuerza estática es producto de la ecuación 3. En este paramétrico, se estudia el valor de la fuerza estática que el simulador da por defecto, que corresponde al caso número uno (ver tabla 4).

3. **Factor de fricción de pared:** este estudio paramétrico estará conformado por cinco casos, que son:

Tabla 5: Parámetros de simulación para el Factor de fricción de pared

Numero de caso	Factor de fricción de pared [Ns/m]
Caso 1	3000
Caso 2	1559
Caso 3	1000

Caso 4	500
Caso Base	111,745

La variación del factor de fricción de pared se obtiene de la ecuación 4, suministrada en el manual de usuario de OLGA. En este paramétrico, se estudia el valor del factor de fricción de pared que el simulador da por defecto, que corresponde al caso número tres (ver tabla 5).

4. **Fuerza de resistencia lineal:** este estudio paramétrico estará conformado por cinco casos, que son:

Tabla 6: Parámetros de simulación para la Fuerza de resistencia lineal

Numero de caso	Fuerza de resistencia lineal [Ns/m]
Caso 1	30
Caso 2	20
Caso 3	10
Caso Base	0
Caso 4	-4

La variación de la fuerza de resistencia lineal parte de la ecuación 9 descrita en el capítulo II, que para nuestro caso en estudio corresponde al caso base. Sin embargo, se varió el valor obtenido (ver Apéndice A) en cierto orden de magnitud con la finalidad de observar la influencia de este parámetro en el proceso de corrida de herramientas de limpieza.

En este paramétrico, se estudia el valor de la fuerza de resistencia lineal que el simulador da por defecto, que corresponde al caso número tres, así como también se estudia el valor de esta fuerza utilizada por Botros y Golshan (2010) que corresponde al caso número 4 (ver tabla 6).

5. **Fuerza de resistencia cuadrática:** este estudio paramétrico estará conformado por seis casos, que son:

Tabla 7: Parámetros de simulación para la Fuerza de resistencia cuadrática

Numero de caso	Fuerza de resistencia Cuadrática [Ns^2/m^2]
Caso 1	482.900
Caso 2	172.400
Caso 3	1.058
Caso Base	163,148

Caso 4	2,232
Caso 5	0

La variación de la fuerza de resistencia cuadrática parte de la ecuación 10 descrita en el capítulo II, que para nuestro caso de estudio corresponde al caso base. Sin embargo, se varió el valor obtenido (ver Apéndice A) con respecto a los valores de gap propuestos por los autores, con la finalidad de observar la influencia de este parámetro en el proceso de corrida de herramientas de limpieza.

En el estudio paramétrico de la fuerza de resistencia cuadrática, se estudia el valor que trae el simulador OLGA por defecto, que corresponde al caso número cinco (ver tabla 7).

6. **Variación del flujo másico:** este estudio paramétrico estará conformado por cinco casos, que son:

Tabla 8: Parámetros de simulación para la Variación del Flujo másico

Numero de caso	Flujo másico [Kg/s]
Caso 1	80
Caso 2	60
Caso 3	40
Caso Base	20
Caso 4	10

La variación del flujo másico se muestra en la tabla 8, y parte de una propuesta de los autores, con la finalidad de observar la influencia de este parámetro en el proceso de corrida de herramientas de limpieza y al mismo tiempo realizar un mayor aporte en la investigación.

3.5.3 Elaboración del grupo de propiedades de transporte del fluido generado por el simulador PVTsim.

Para la simulación con OLGA se requieren tablas de propiedades pre-calculadas, las cuales se obtienen para un intervalo definido de presión y temperatura. Las propiedades de los fluidos se calculan a partir de la composición de los fluidos de los pozos establecidos como representativos. Estos fluidos que se tienen son caracterizados por medio del software PVTsim, el cual proporciona las tablas que son requeridas por OLGA. Para ello, se realizan los siguientes pasos:

1. Definir la composición del fluido
2. Elegir la ecuación de estado
3. Establecer el rango de temperaturas y presiones para el cálculo de propiedades
4. Definir el número de puntos a calcular
5. En la tabla 9 se muestran las propiedades del fluido a presión y temperatura estándar, 0,10MPa (14.7Psi) y 15,56°C, respectivamente. Mientras que la tabla 10 muestra la composición del fluido de trabajo.

Tabla 9: Propiedades del fluido a presión y temperatura estándar

Propiedades del fluido	Valor	Unidades
Fracción total de agua	$2,79 \cdot 10^{-3}$	
Relación gas líquido	0,99	
Densidad del gas	0,775	[Kg/m ³]
Densidad del agua	1000	[Kg/m ³]
Viscosidad del gas	$1,25 \cdot 10^{-5}$	[Pa·s]
Viscosidad del agua	$1 \cdot 10^{-3}$	[Pa·s]

Tabla 10: composición del fluido de trabajo

Componentes del Gas		
No.	Nombre	%Molar
1	H ₂ O	0,25
2	N ₂	0,32
3	CO ₂	0,09
4	CH ₄	99,22
5	C ₂ H ₆	0,07
6	C ₃ H ₈	0,05

Para el cálculo de las propiedades del archivo PVT del fluido se eligió la ecuación propuesta por Soave-Redlich-Kwong (SRK) (1972), que se define como:

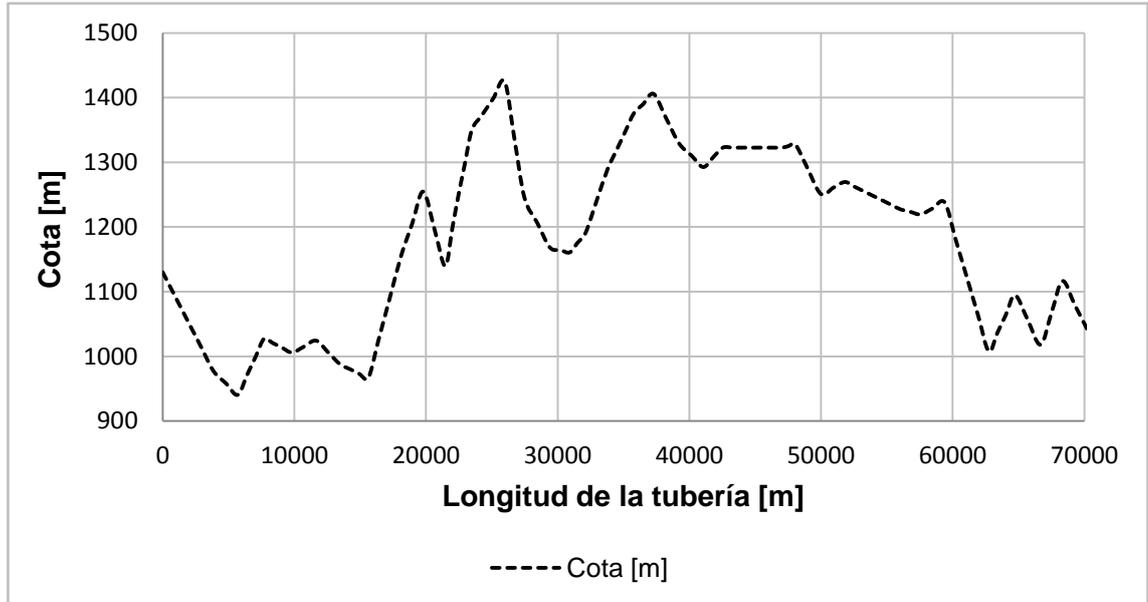
$$P_o = \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{a \cdot T}{V \cdot (V + b)} \quad \text{Ec. 54}$$

El intervalo de presión y temperatura con los cuales se genera el archivo PVT del fluido son: 0 a 27,57MPa (4000 Psi) y -44 a 70°C. En este intervalo se genera 50 puntos para cada propiedad del fluido.

3.5.4 Generación de la geometría y propiedades de la tubería

La creación de la geometría consiste en importar un archivo tipo .xy al simulador OLGA que contenga el perfil topográfico de la tubería en estudio. Para este caso, el archivo fue suministrado por PDVSA-Intevep.

La tubería de gas tiene una longitud de 70.000m y un diámetro externo de 0,50m



Gráfica 1: Perfil topográfico de la tubería en estudio. Imagen suministrada por PDVSA-Intevep.

Una vez identificada la topografía de la tubería, se procede a definir el o los materiales por los cuales está compuesta la misma, así como identificar su espesor y los distintos aislantes térmicos que posea.

3.5.5 Imposición de condiciones de borde y modelo físico

Las condiciones de borde son una formulación matemática preestablecida para el conjunto de nodos pertenecientes a la frontera del dominio computacional. Para nuestro caso fueron definidos dos nodos como fronteras: un nodo se presión, de 6,99MPa (1.015Psia) y 15°C, y un nodo cerrado que contiene el archivo PVT del fluido en estudio. Así como también se definió como condición de borde una

fuelle, caracterizada por un flujo másico de 20kg/s constante para un tiempo de 172 días.

3.5.6 Transferencia de calor

La información con que se dispone debe conducir al conocimiento del perfil de temperatura a lo largo de las tuberías en estudio.

Para resolver el problema, dentro del simulador comercial utilizado, se tienen diferentes niveles de rugosidad para el cálculo de las transferencias de calor a través de las tuberías. Sin embargo, para la tubería en estudio se emplea un valor de rugosidad absoluto porque no posee revestimiento interno. Por ello, se define de forma “manual” el perfil de temperatura en el sistema, se asignan coeficientes de transferencia de calor generales para cada sección de tubería y, los materiales aislantes y el medio externo al sistema.

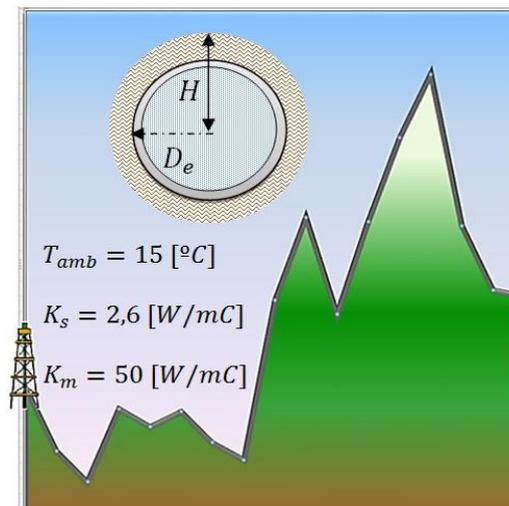


Figura 23: Transferencia de calor de caso en estudio

3.5.7 Comparación de resultados con el caso base

Una vez obtenido los resultados de todas las simulaciones, se procederá a realizar cada análisis haciendo énfasis en los resultados del caso base, es decir, se realizará un proceso de comparación con la finalidad de indicar cuáles son los parámetros que afectan el comportamiento de la simulación de corrida de herramienta, así

como establecer valores óptimos a utilizar en las herramientas computacionales con el fin de tener simulaciones que se ajusten más a la realidad.

3.5.8 Elaboración de conclusiones y recomendaciones

Se deberán realizarse las conclusiones y recomendaciones respectivas, con la finalidad de contribuir con futuras investigaciones en el área.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos durante la realización de este Trabajo Especial de Grado. En primer lugar se presentan los resultados del proceso de selección matricial, luego se observa el diseño de la HDL a través del programa Solid Word versión 2012 y se detallan los cálculos de los parámetros asociados a la herramienta de limpieza seleccionada, su diseño y el coeficiente global de transferencia de calor para el caso en estudio. Posteriormente, se detallan los resultados obtenidos para cada proceso de simulación, iniciando con el proceso de acumulación de líquido, y finalizando con los estudios paramétricos propuestos. En dichos resultados se reflejará gráficas del tipo X-Y para la caída de presión y presión en el sistema, valores de temperatura, fracción de líquido y patrones de flujo, velocidad de la HDL, caudal de líquido instantáneo, eficiencia de barrido, entre otros. Cada resultado será comparado con el caso base a fin de determinar cuáles son los parámetros que influyen o no en el comportamiento de la simulación de la corrida de herramienta. Esto permitirá definir qué variables son las que más afectan el comportamiento de la corrida de la HDL en la simulación, así como los valores óptimos a utilizar en el simulador para representar el comportamiento fluido dinámico de la corrida de la HDL del caso de estudio.

4.1 Resultados del proceso de selección matricial

Los resultados de la matriz de restricciones y de selección se muestran en las tablas 11 y 12, respectivamente.

Tabla 11: Matriz de restricciones

Restricciones-Herramientas	HDL Inteligente	Polly PIG	HDL Metálica	HDL Sólida	HDL Esférica	HDL Gel
Capacidad para manejo de gas	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Capacidad para remoción y limpieza de líquidos	NO	SI	SI	SI	SI	SI
Materiales inertes al fluido	SI	SI	SI	SI	SI	NO
Accesorios (Cepillos, cuchillas, imanes, etc.)	SI	SI	SI	SI	SI	NO

Uso de la HDL con la tubería sucia	NO	SI	SI	SI	SI	SI
------------------------------------	----	----	----	----	----	----

La matriz de restricción muestra que las HDLs inteligentes y las HDLs de gel no son candidatas para el proceso de selección, ya que ambas no cumplen de entrada con los parámetros o restricciones propuestos en este trabajo de investigación. Por lo cual, las herramientas llamadas Polly pig, HDL metálica, HDL sólida y HDL esférica serán las posibles soluciones tecnológicas preseleccionadas. Estas posibles soluciones tecnológicas son valoradas según como se presenta en la tabla 12.

Tabla 12: Matriz de selección

Criterios de Selección – Herramientas	Ponderación	Polly PIG	HDL Metálica	HDL Sólida	HDL Esférica
Capacidad para manejo de Gas	11	3	3	3	3
Capacidad para remoción y limpieza de líquidos	10	2	3	3	2
Temperatura de Operación	9	2	3	3	3
Capacidad para soportar presiones	8	2	3	3	3
Capacidad de la HDL para controlar la velocidad	7	0	3	2	0
HDL Ligera	6	3	0	2	3
Resistente a la abrasión	5	1	3	3	2
Materiales de la HDL inertes al fluido	4	2	3	3	2
Accesorios (Cepillos, Cuchillas, imanes, etc.)	3	1	3	2	1
HDL Reusable	2	0	3	1	1
Total		121	153	151	121

De acuerdo con el resultado de la matriz de selección la HDL metálica es la que tiene la mayor puntuación, por lo tanto, es la herramienta seleccionada para este estudio. La razón por la cual esta herramienta obtuvo la mayor valoración, es que en la mayoría de los criterios tuvo el valor más alto de la escala de ponderación de soluciones propuesta en el capítulo III, apartado 3.2, siendo igual a tres (3), sólo en el relacionado al peso tuvo la más baja, igual a cero (0). Otra de las herramientas que obtuvo un buen puntaje fue la HDL sólida que se proyecta a ser estudiada en próximas investigaciones.

4.2 Resultados del proceso de cálculo de los parámetros asociados a la HDL y la transferencia de calor

Se muestran los resultados de todos los parámetros asociados a la herramienta de limpieza y el coeficiente global de transferencia de calor para el caso en estudio, los cuales son utilizados para el proceso de simulación.

- **Fuerza de propulsión:** para una presión de entrada de 9.3769 [MPa] = 1.360 [Psia]

$$F = 1.696,798 \text{ kN}$$

La fuerza de roce que se opone al movimiento de la HDL, tiene una magnitud igual a:

$$F_R = 876,032 \text{ N}$$

Se observa que la fuerza de propulsión es mayor a la fuerza de roce, por lo tanto la HDL podrá realizar la remoción de líquidos.

- **Fuerza de fricción estática:** para un valor de masa de 57 [Kg]

$$F_e = \mu \cdot N = 223,44 \text{ N}$$

- **Factor de fricción de pared:** para un número de Reynolds igual a 2393.696

$$f_w = 111,74 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

- **Fuerza de resistencia lineal:** para un número de Reynolds igual a $42.44131 \cdot 10^5$

$$F_1 = 0$$

- **Fuerza de resistencia cuadrática:** para un valor de coeficiente de arrastre de $2.327 \cdot 10^3$

$$F_2 = 163,148 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

- **Factores de fuga:** para un valor de gap de $3.62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Factor de Fuga (*LeakageFactor*): $C_p = 0,028$

Coefficiente de fuga (*LeakCoeff*): $C_f = 2.498 \cdot 10^3$

Coefficiente de apertura (*Leakopening*): $C_a = 0,02$

- **Coefficiente global de transferencia de calor:** para una tubería enterrada 0,60 [m], con un espesor de 0,025 [m] y un coeficiente calorífico de 2,232 [kJ/m.K]

$$U = 173,48 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

4.3 Resultados de proceso de simulación

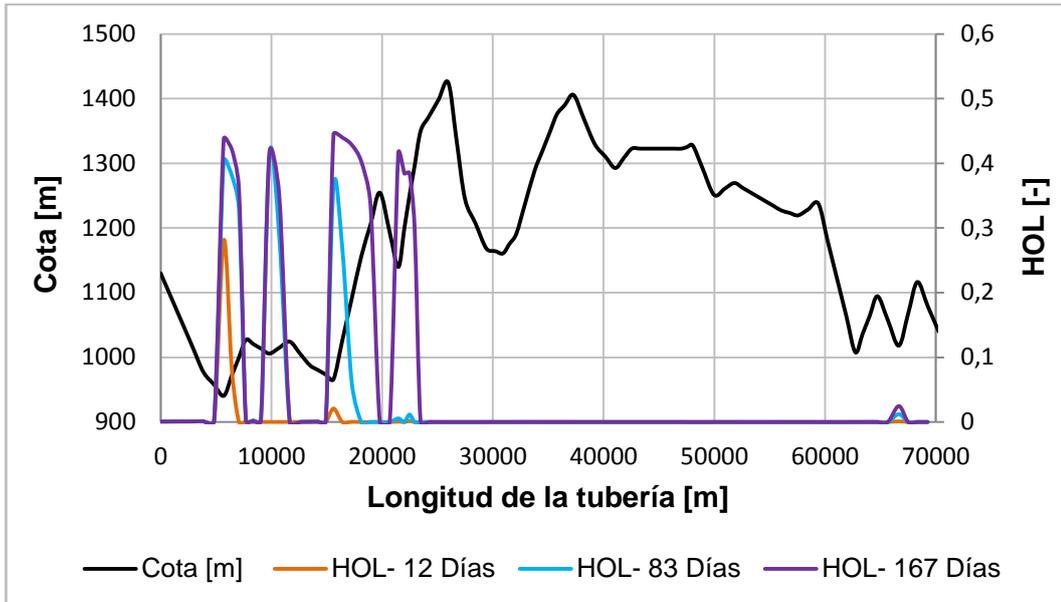
A continuación se presentan los resultados obtenidos del proceso de simulación a través de la herramienta computacional OLGA.

4.3.1 Resultados para la simulación de acumulación de líquido en la tubería

Los parámetros o características asociados a este proceso de simulación se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2 y 4.5.2.1.

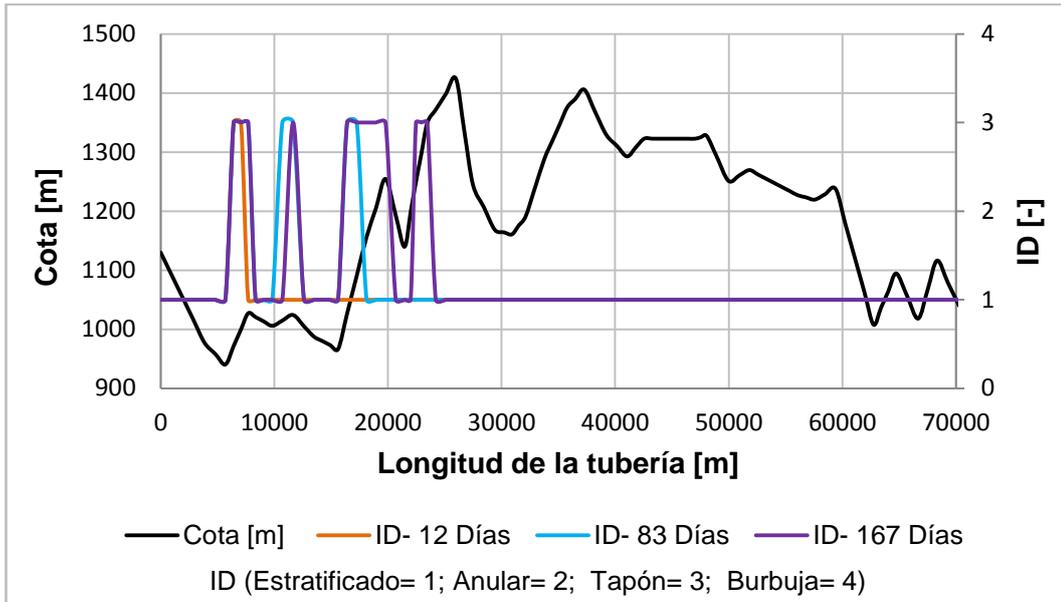
Se puede observar en la gráfica 2 la acumulación de líquido desde el día 0 hasta el día 167, intervalo en cual se alcanza una reducción del área de transporte del gas mayor a un 40%, por lo que obtendremos resultados asociados a condiciones críticas de operación.

Se aprecia que existe aproximadamente una fracción de líquido acumulado (HOL) que va desde casi 0 a 43%, consiguiéndose los mayores valores en algunas secciones de los primeros 25.000m de la tubería, justo en aquellos valles donde se tienen los ángulos de inclinación más importantes (Apendice C). La mayor acumulación ocurre en estas secciones debido a que existe un resbalamiento de las gotas de líquido que no pueden ser arrastradas por el gas y se van acumulando en esos valles, ya que el fluido no tiene la energía necesaria que permita trasportar dichas gotas.



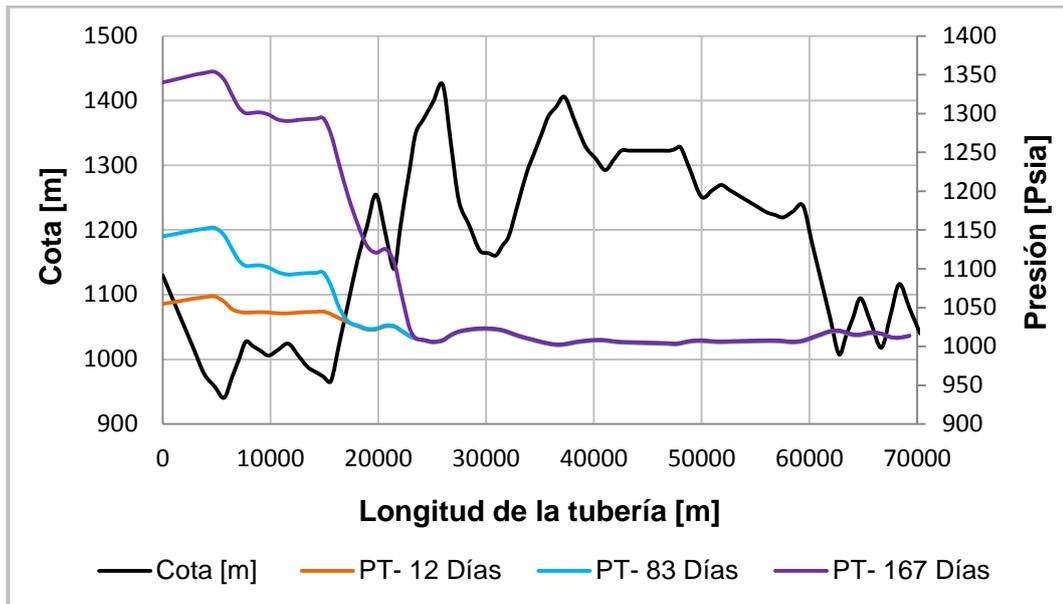
Gráfica 2: Fracción de Líquido (HOL) antes de realizar la corrida de herramienta

La gráfica 3 muestra los patrones de flujo presente en la tubería antes de realizar la corrida de herramienta. Se observan dos patrones de flujo a lo largo de la tubería: flujo estratificado (1) y flujo tipo tapón (3). Como se esperaba el patron de flujo estratificado se suele encontrar en pendientes negativas o tramos horizontales; y flujo tapón donde existe flujo ascendente y donde se tienen los mayores ángulos, es decir, en los primeros 25.000m de la tubería. También, es claro que existe una fuerte relación con los máximos valores de la fracción volumétrica de líquido con la formación de flujo tapón, tal como se detalla en la gráfica 2.



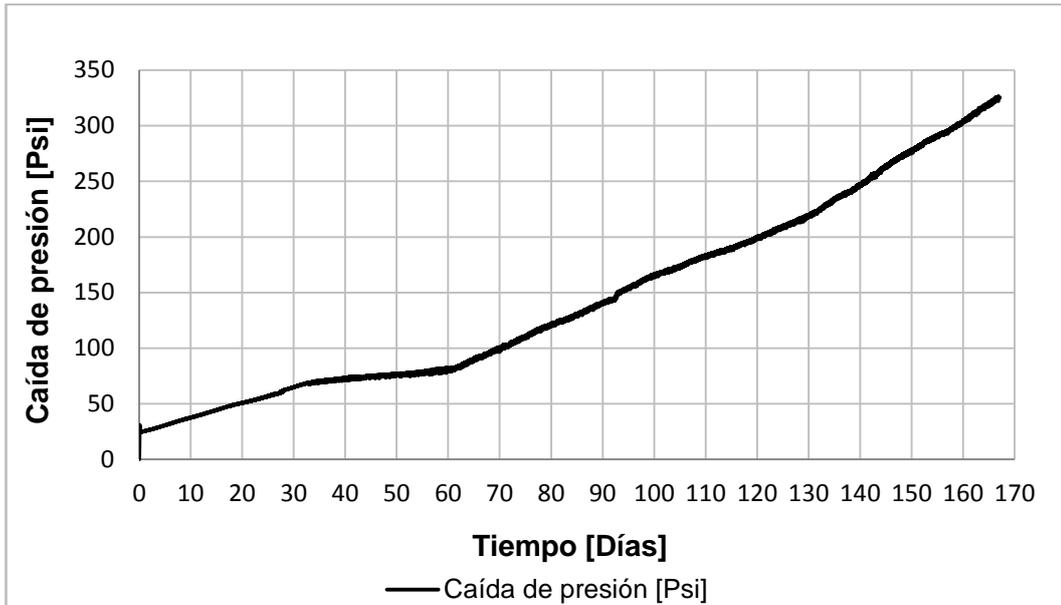
Gráfica 3: Patrón de flujo (ID) antes de realizar la corrida de herramienta

En la gráfica 4 se observa el comportamiento de la presión desde el inicio de la corrida hasta alcanzar los 167 días. Como se puede observar la presión de entrada se incrementa a medida que el tiempo transcurre, esto es debido a que comienza a acumularse líquido, lo que conlleva a una disminución del área de sección transversal de la tubería sobre todo en los primeros 25.000m donde se tiene mayores valores de líquido acumulado (ver gráfica 2). El hecho es que debido a esta acumulación de líquido, la caída de presión se incrementa y por ende se requiere mayor energía en la fuente (en este caso presión) con el fin de poder mantener la presión de llegada establecida como un valor constante igual a 6,99MPa (1.015 Psia). La presión para el día 12 es de 7,28MPa (1.056 Psia) y para el día 167 es de 9,37MPa (1.360 Psia) que representa aproximadamente un aumento del 30%.



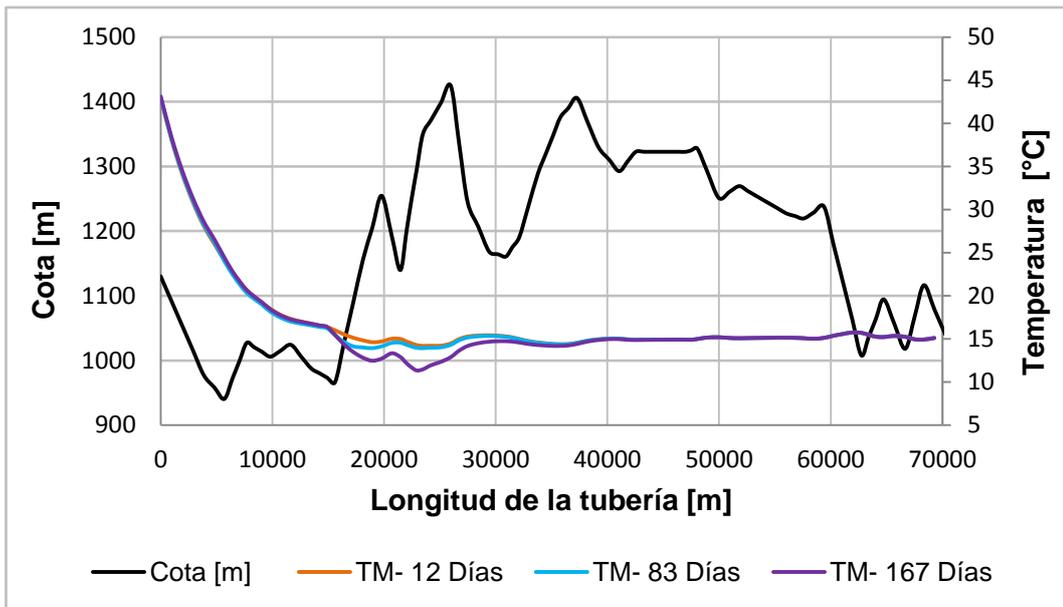
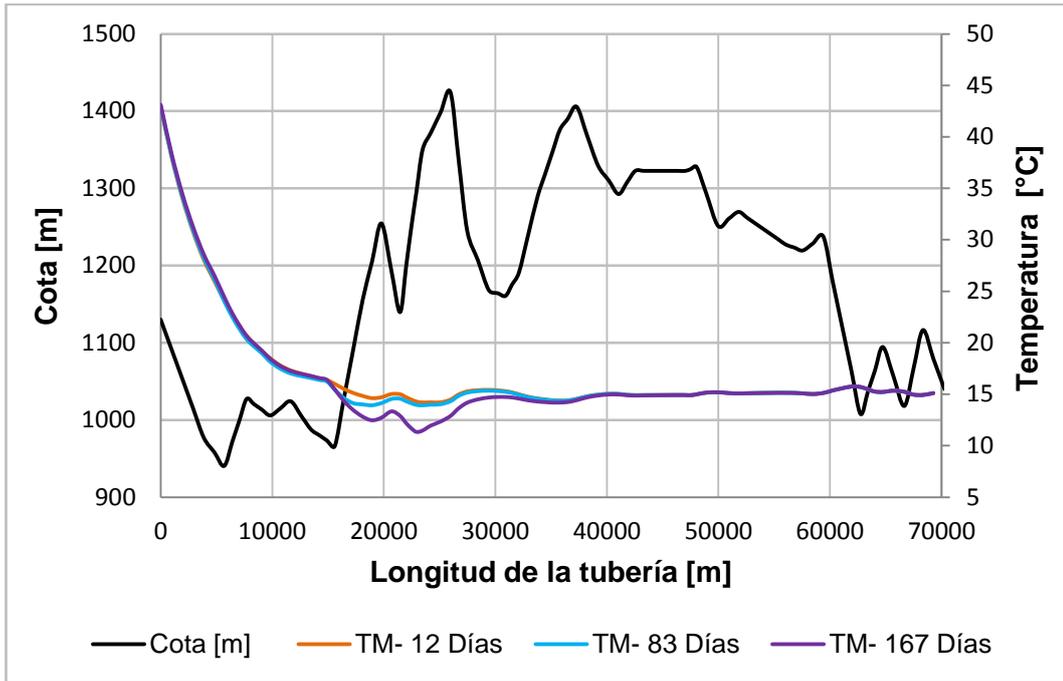
Gráfica 4: Presión antes de realizar la corrida de herramienta

La caída de presión durante el proceso de acumulación de líquido, es decir, antes de realizar la corrida de herramienta se muestra en la gráfica 5. Se evidencia que la caída de presión en el sistema se va incrementando en la medida en que se incrementa el tiempo. Se observa que para el día 20 se tiene una caída de presión de 0,34MPa (50 Psi) y para el día 160 la caída de presión es de 2,06MPa (300 Psi), fenómeno que se debe a la disminución del área transversal de la tubería, lo que impacta negativamente en la eficiencia de la tubería. Estos aumentos de presión y caídas de presión, son un indicativo de que el gasoducto necesita mantenimiento mediante el uso de HDL con el fin de desplazar el volumen de líquido acumulado.



Gráfica 5: Caída de presión antes de realizar la corrida de herramienta

La gráfica 6 muestra los valores de temperatura antes de realizar la corrida de herramienta. Se observa que la temperatura a medida de que el fluido se va desplazando, va tendiendo naturalmente a la temperatura del ambiente. Se detalla que entre los 15.000m y los 30.000m existe un descenso a los 12 y 83 días poco apreciable, de 2°C aproximadamente, y a los 167 días la disminución es de 4°C. Esto se debe a que se produce una reducción del área de la tubería, generada porque la fracción de líquido alcanza un 43% en ese tramo, lo que conlleva a un proceso de estrangulación del gas produciendo una expansión del mismo y por ello se genera un descenso en el valor de la temperatura, fenómeno que ocurre en los gases no ideales como es el caso en estudio.

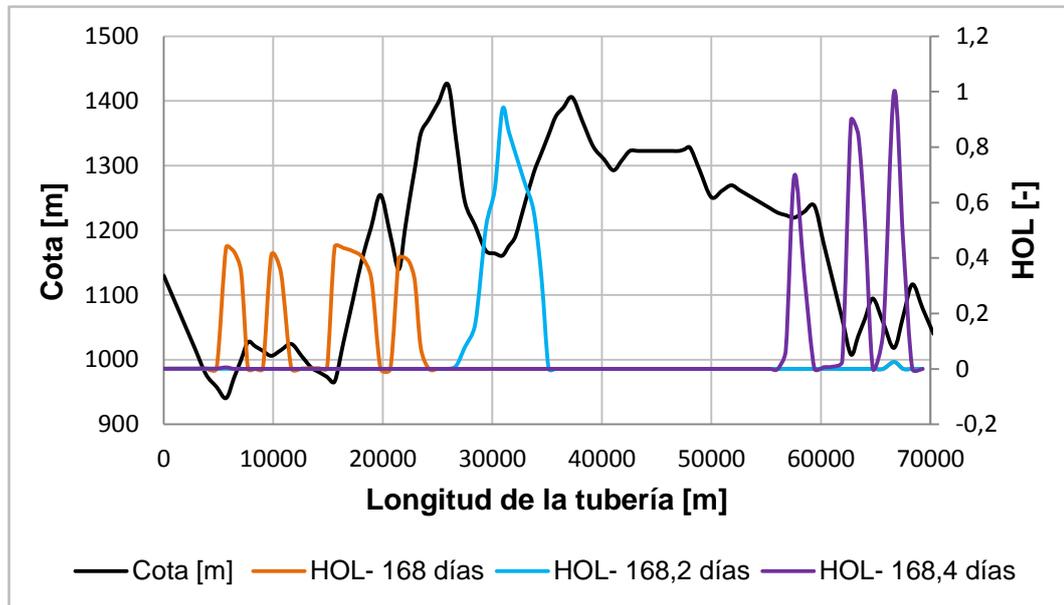


Gráfica 6: Temperatura antes de realizar la corrida de herramienta

4.3.2 Resultados para la simulación del caso base

Los parámetros o características asociados a este proceso de simulación se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2.2 y en la tabla 2.

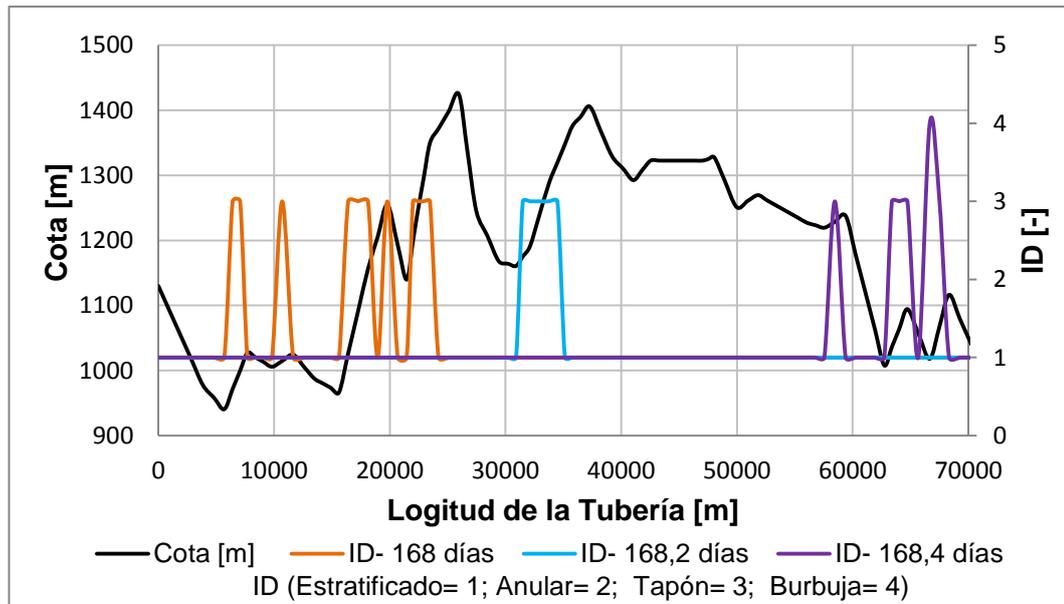
Como se ha mencionado anteriormente, la corrida de herramientas tiene como función remover líquidos acumulados y/o los residuos adheridos a las paredes internas de la tubería, disminuir la caída de presión en el sistema y en consecuencia aumentar la producción. La gráfica 7 muestra que desde el ingreso de la HDL a la tubería (día 168) el líquido acumulado comienza a desplazarse drásticamente, hasta remover más del 90% del líquido acumulado.



Gráfica 7: Fracción de líquido (HOL) para el caso base

La gráfica 8 muestra el patrón de flujo para el caso base para tres periodos de tiempo diferente durante la corrida de la herramienta, es decir, 168, 168,2 y 168,4 días. Durante esta operación se observan tres patrones a lo largo de la tubería, que son: estratificado (1), tapón (3) y burbuja (4). El flujo estratificado es consecuencia de las secciones planas o descendentes que se tiene en el perfil topográfico, mientras que el flujo tapón se debe al líquido acumulado en la tubería que viaja delante de la herramienta y, el flujo tipo burbuja se observa en los últimos tramos de la tubería donde se consiguen las velocidades de mezcla más

altas que conlleva a que la fase gaseosa se distribuya en forma de burbujas inmersas en la fase líquida. Este fenómeno se muestra en la gráfica 7, donde se tiene un 99,9 % en fase líquida y un 0,01% en la fase gaseosa a una longitud de 66.770m aproximadamente, cuando la herramienta de limpieza está a punto de salir de la tubería.

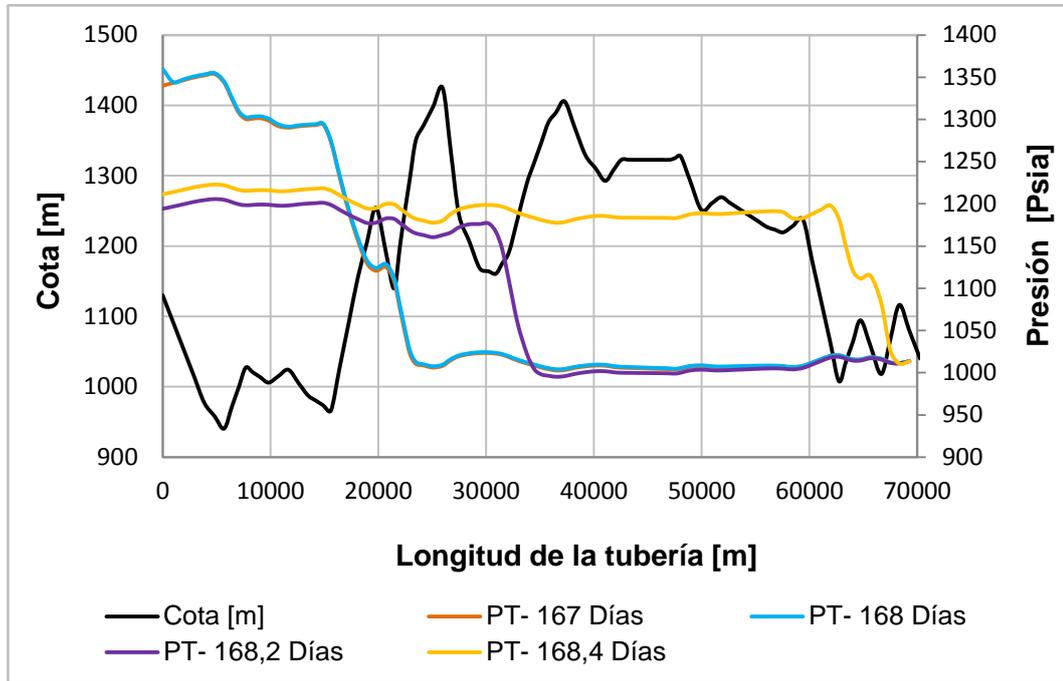


Gráfica 8: Patrón de flujo (ID) para el Caso Base

Los resultados obtenidos para la presión del caso base, se muestran en la gráfica 9. Dicha presión está íntimamente relacionada con la fracción de líquido resultante de este caso (gráfica 7), ya que al momento en que la herramienta ingresa a la tubería (día 168) se tiene una presión de 9,37MPa(1.359 Psia) y con fracciones volumétrica de líquido en algunas secciones al inicio de la tubería de hasta 43%. Una vez se introduce la herramienta y comienza a desplazarse el líquido acumulado la presión disminuye aproximadamente a 8,26MPa (1.199 Psia) con un HOL de aproximadamente 93% delante de la herramienta.

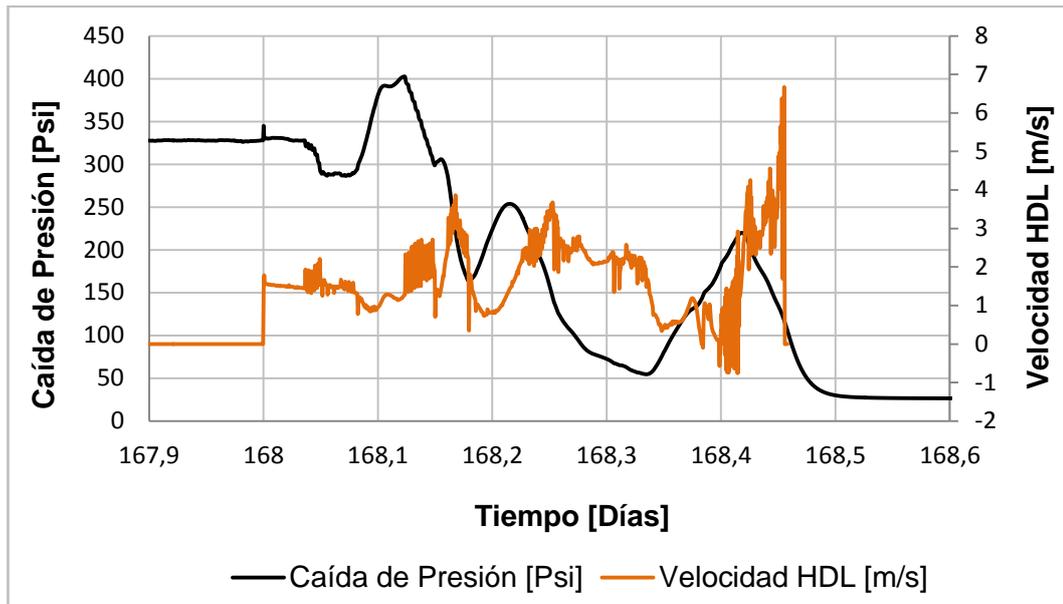
Adicionalmente, se observa que para el día 168,2 la presión disminuye a 8,26MPa (1.199 Psia) aproximadamente, y para este punto el ángulo de inclinación de la tubería es de -2,26 grados (ver Apéndice C), es decir, que se requiere una presión menor en la fuente para mover la HDL dado que por energía potencial el desplazamiento de la herramienta se verá favorecido. Por el contrario, se

necesitarán mayores valores de presión para los casos donde se tengas grandes obstrucciones y/o altos ángulos de inclinación, como se observa para el día 168,4.



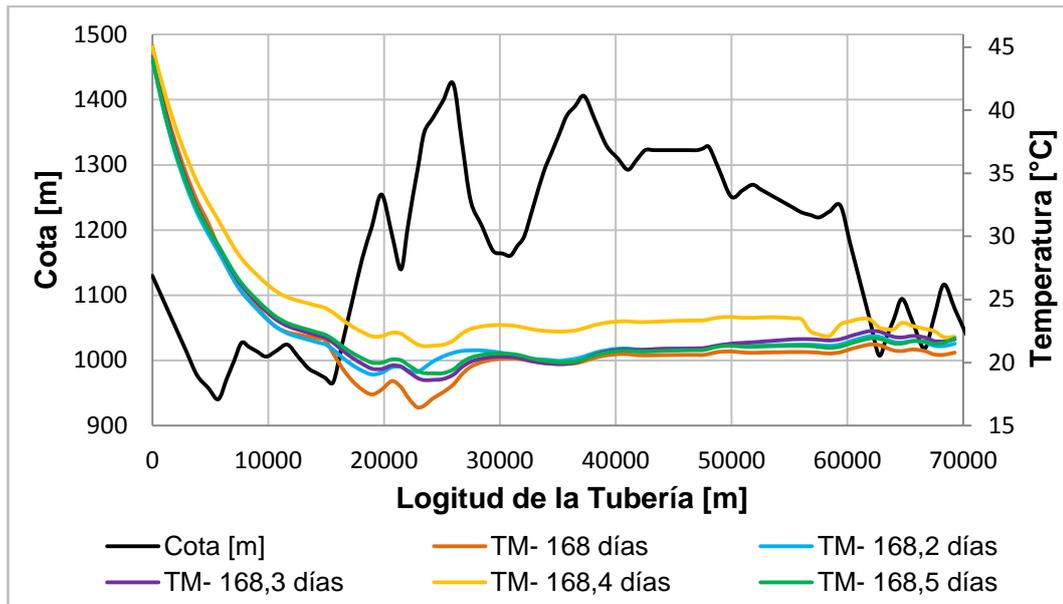
Gráfica 9: Presión para el Caso Base

En la gráfica 10 se observa la caída de presión y velocidad de la HDL para el caso base. Dichas variables se encuentran estrechamente relacionadas, ya que donde existen las mayores caídas de presión, se tendrán los valores más bajos de velocidad de la herramienta. Este fenómeno está estrechamente relacionado con la acumulación de líquido frente a la HDL, la cual desacelera la herramienta en aquellas secciones de la tubería donde se tiene flujo ascendente debido al peso de la columna de líquido. Esta para poder ser desplazada debe hacer un incremento de presión en la fuente, la cual se verá reflejada como un incremento de caída de presión en el sistema. Para el día 168,4 se observa un valor de velocidad de la HDL negativo, lo que implica que la herramienta se está “regresando” (se desplaza en sentido contrario al fluido). Esto se debe a la alta acumulación de líquido que se encuentra frente de la HDL, que es aproximadamente de 60% (gráfica 7), y al ángulo de inclinación que tiene la tubería en este tramo (3,37 grados, apéndice C).



Gráfica 10: Caída de Presión y Velocidad de la HDL para el Caso Base

En la gráfica 11 se observa el comportamiento de la temperatura para el caso base. Es notable que a partir del día 168 (momento en el cual ingresa la HDL a la tubería) la temperatura va aumentando a medida que la herramienta se desplaza por la tubería. La principal razón de este aumento se debe al efecto de compresión que se genera para poder desplazar la fracción de líquido que se encuentra en la línea. Adicionalmente, en el caso de sistemas de flujo gas, el aumento de presión (gráfica 9) conlleva al aumento de la temperatura, esto según la ley de gases ideales.



Gráfica 11: Temperatura para el Caso Base

La tabla 13 muestra el diferencial de temperatura para el caso base. Se observa una diferencia de 2°C entre el día 168 y el día 168,5, esto se debe a que a medida de que la HDL se desplaza dentro de la tubería la cantidad de líquido que se acumula frente a la misma es cada vez mayor, generando un mayor efecto de compresión para poder desplazar el tapón, aumentos de presión y por ende un incremento en la temperatura.

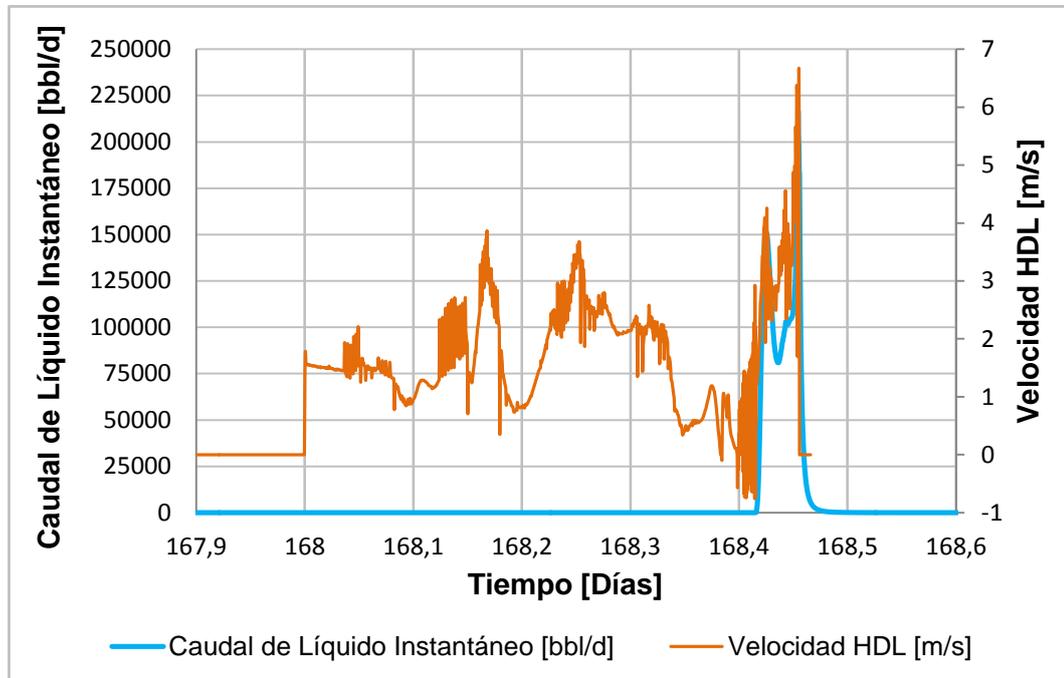
Tabla 13: Valores de Temperatura para el Caso Base

Día	Ti	Tf	ΔT
168	45,11	20,79	24,32
168,2	44,20	21,49	22,71
168,3	44,23	21,84	22,39

La gráfica 12 muestra la cantidad de líquido instantáneo que llega a la instalación receptora y la velocidad de la HDL. Se observa que la mayor velocidad de la herramienta corresponde con el mayor caudal de líquido instantáneo entregado en la instalación receptora, por lo que la HDL y el fluido tienen velocidades muy parecidas en ese instante de tiempo.

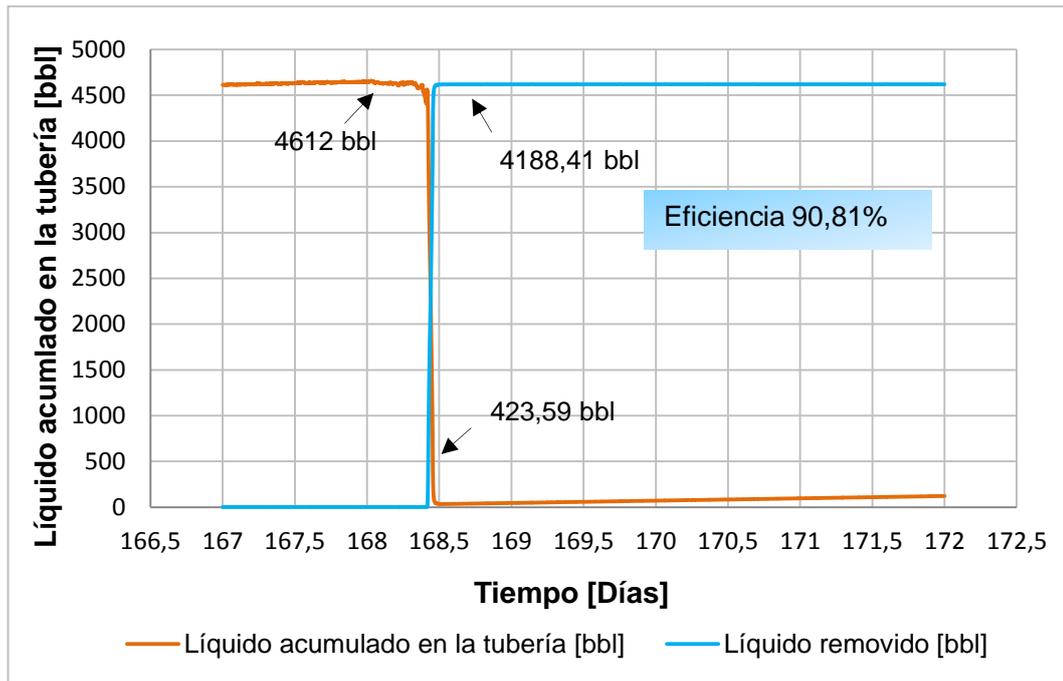
Se evidencia que la salida de líquido comienza aproximadamente en el día 164,4 con un caudal instantáneo de 23.850.000L/d (150.000bbl/d), y culmina el día

168,45 con un caudal de líquido instantáneo de 31.800.000L/d (200.000bbl/d). Los distintos picos de caudal instantáneo se deben a que no todo el fluido llega al mismo tiempo a la instalación receptora.



Gráfica 12: Caudal de Líquido Instantáneo para el Caso Base

La eficiencia de barrido de la HDL se define como la cantidad de líquido acumulado que tiene la tubería antes de realizar la corrida menos la cantidad de líquido que queda dentro de la tubería luego de que la HDL sale de la línea. La gráfica 13 muestra estos resultados, donde para el día 168 justo antes del ingreso de la herramienta a la línea se observa una acumulación de líquido de 733.308L (4.612bbl) y al finalizar el proceso de limpieza la cantidad de líquido que quedó dentro de la tubería es de 67.350,81L (423,59bbl), removiendo un total de 665.957,19L (4.188,41bbl) arrojando un valor de eficiencia de 90,81%.



Gráfica 13: Líquido acumulado y removido en la tubería para el Caso Base

4.3.3 Resultados de los estudios paramétricos

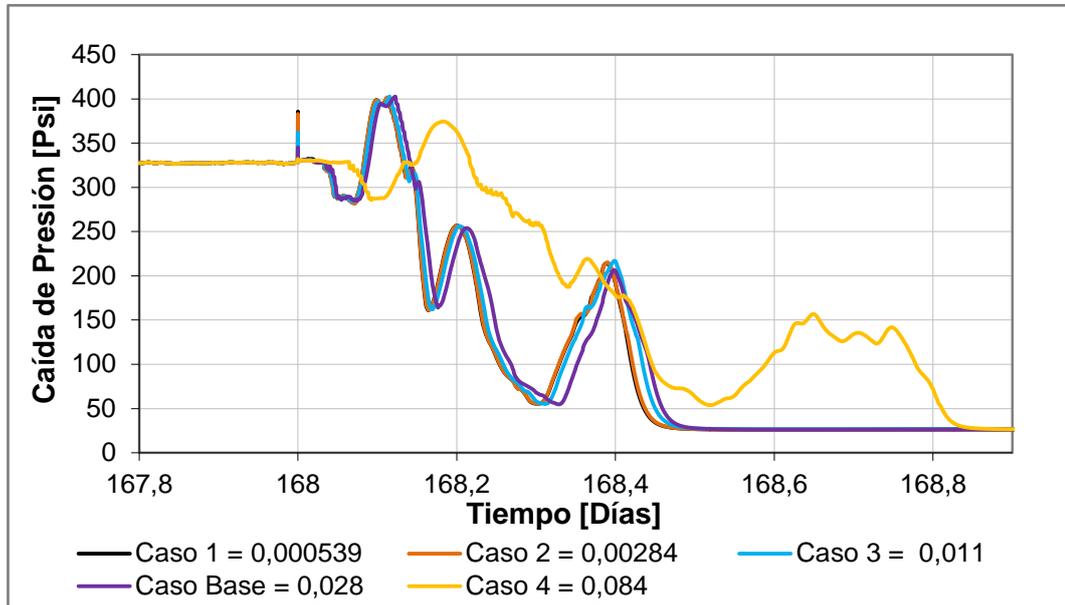
La esencia de estos estudios es identificar que parámetros dentro de la simulación afectan el comportamiento de la corrida de la herramienta. A continuación se presentan los resultados obtenidos de estos estudios.

4.3.3.1 Factores de fuga

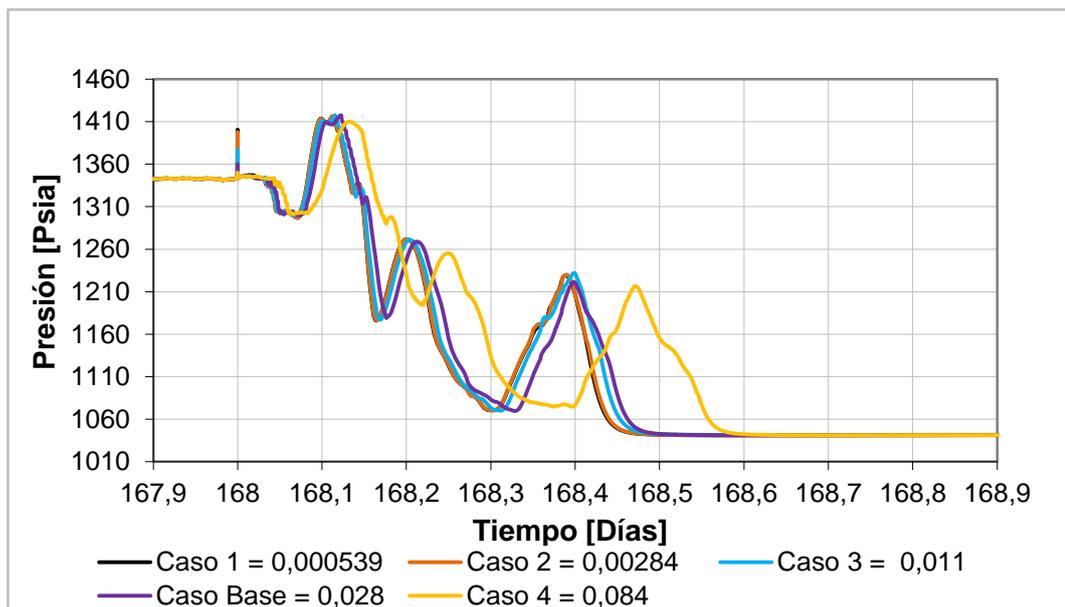
Los casos y características asociados a este estudio paramétrico se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2.3 y en la tabla 3.

La gráfica 14 y 15 muestran el impacto que tienen los factores de fuga sobre la caída de presión y presión en el sistema, respectivamente. Se observa que para los tres primeros casos la variación es muy pequeña, lo que es un comportamiento esperado, ya que para estos casos el valor de la fuga se encuentra en aproximadamente el mismo orden de magnitud. Con respecto al caso 4, donde el valor de la fuga es 3,5 veces más grande que para el caso base (ver apéndice B), existe una mayor variación, esto es producto de que mientras el área de la fuga aumenta, una mayor cantidad de flujo se puede estar escapando por el gap en

sentido contrario al proceso de limpieza (desde adelante hacia atrás) ocasionando inestabilidades y problemas operacionales en el sistema.



Gráfica 14: Impacto de las Fugas sobre la Caída de Presión

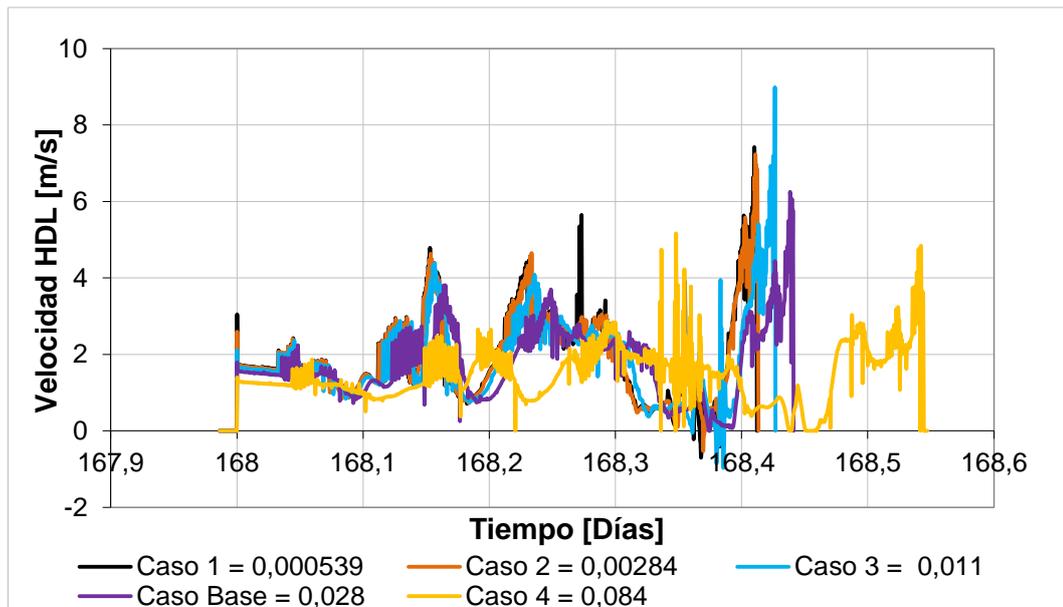


Gráfica 15: Impacto de las Fugas sobre la Presión

El impacto de las fugas sobre la velocidad de la HDL se observa en la gráfica 16. Es evidente que mientras el valor de la fugas sea más grande, la herramienta tardará más tiempo en realizar la remoción de líquido. Este fenómeno es uno de

los problemas operacionales o inestabilidades de los cuales se comentaron para las gráficas 14 y 15.

Por otra parte, en la gráfica 16 se aprecia que para el caso 3 existe un pico de velocidad de aproximadamente 9m/s, lo que se debe a un ligero incremento en la caída de presión y en la presión (gráficas 14 y 15) en el mismo punto.



Gráfica 16: Impacto de las Fugas sobre la Velocidad de la HDL

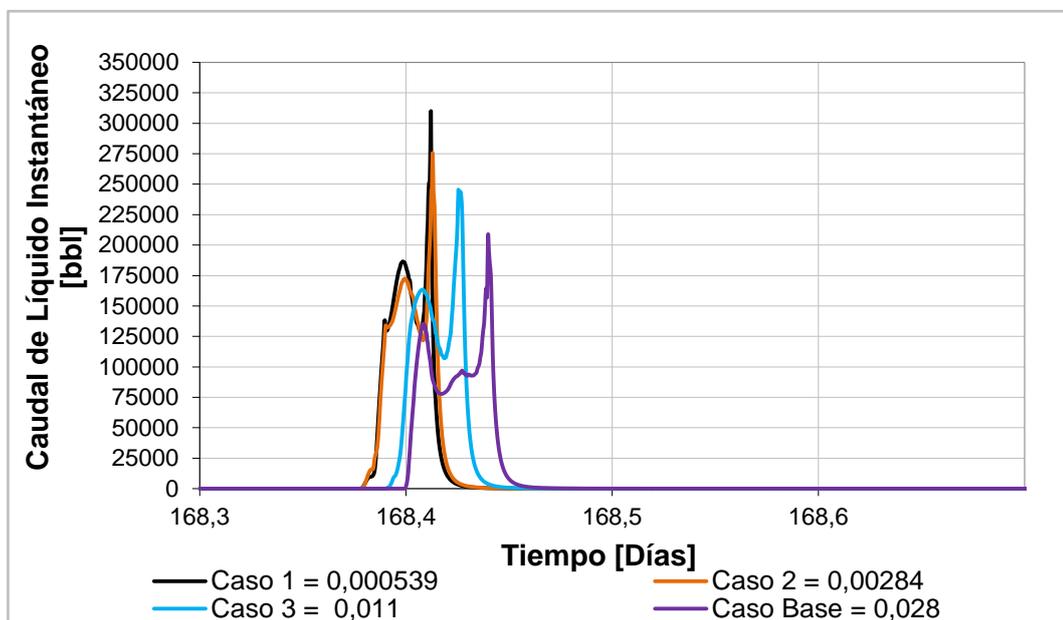
Los valores de temperatura para la variación de las fugas se muestran en la tabla 14. Se observa que para todos los casos existe un ligero aumento en la temperatura, lo que se debe al efecto de compresión que se genera mientras la HDL desplaza todo el líquido que está acumulado frente a ella.

Tabla 14: Valores de Temperatura para la Variación de las Fugas

	Día	Ti	Tf	ΔT
Caso 1	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	43,7	21,3	22,3
	168,3	44,1	21,7	22,3
	168,4	44,1	22,5	21,6
	168,5	44,3	21,9	22,4
Caso 2	168	44,4	20,8	23,5
	168,2	44,0	21,3	22,6
	168,3	44,1	21,7	22,3
	168,4	44,3	22,5	21,7

	168,5	44,3	21,9	22,4
Caso 3	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	43,8	21,3	22,5
	168,3	44,1	21,7	22,3
	168,4	44,8	22,4	22,3
	168,5	44,2	21,8	22,3
Caso Base	168	44,4	20,8	23,5
	168,2	44	21,3	22,6
	168,3	44,0	21,7	22,2
	168,4	45,0	22,1	22,9
	168,5	43,8	21,9	21,9
Caso 4	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	44,7	21,2	23,5
	168,3	44,3	21,8	22,5
	168,4	44,2	22,1	22,1
	168,5	44,0	22,3	21,7

La gráfica 17 muestra el caudal de líquido instantáneo. Se observa que para el Caso 1 el caudal de líquido es de 47.700.000 (300.000bbl), y conforme el factor de fuga aumenta el caudal de líquido instantáneo desplazado decrece. Es así como para el caso 4, donde el valor de la fuga es mayor, el caudal de líquido instantáneo es de 21.064.797L (132,483bbl).



Gráfica 17: Impacto de las Fugas sobre el Caudal de Líquido Instantáneo

Los valores de eficiencia para el estudio paramétrico de las fugas se observan en la tabla 13. En los resultados obtenidos para los primeros tres casos no se

evidencia una variación considerable, mientras que para el caso base donde el valor de la fuga es mayor, la eficiencia alcanza hasta un 87,81%, es decir, a mayor valor de fuga, menor será la cantidad de líquido desplazado por la HDL.

Tabla 15: Valores de Eficiencia para la Variación de las Fugas

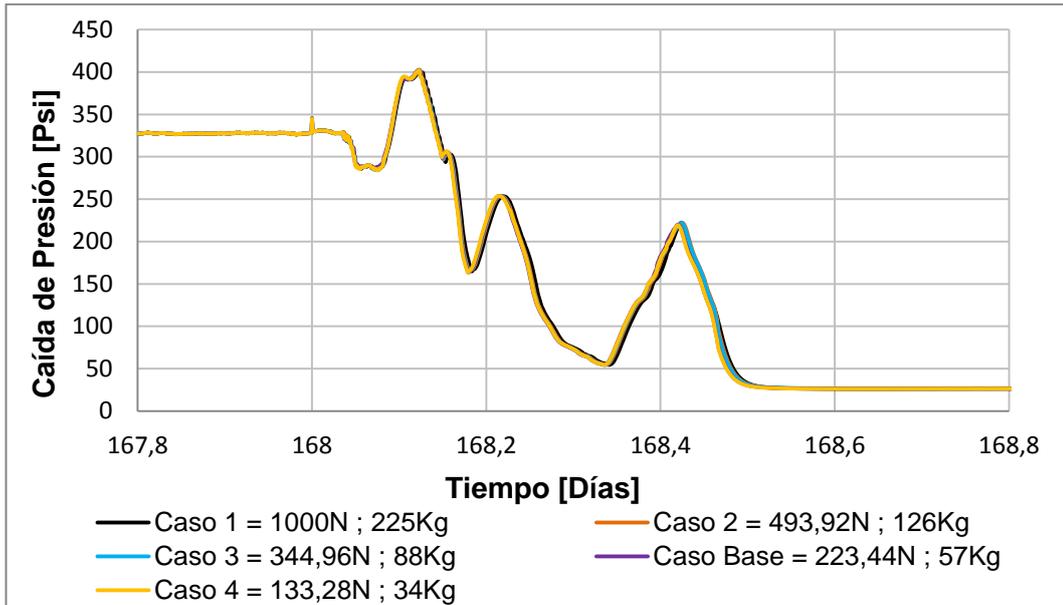
Número de caso	Líquido acumulado en la tubería [L]	Líquido removido [L]	Eficiencia [%]
Caso 1	733.449,76	652.841,1	89
Caso 2	733.449,76	655.144,7	89,32
Caso 3	733.449,76	650.688,8	88,71
Caso base	733.449,76	666.099,0	90,81
Caso 4	733.449,76	495.335,4	67,53

En resumen se puede decir que la fuga es un parámetro que debe ser considerado con precisión dado que variaciones en este conllevan a diferentes comportamientos de la herramienta durante su corrida por la tubería.

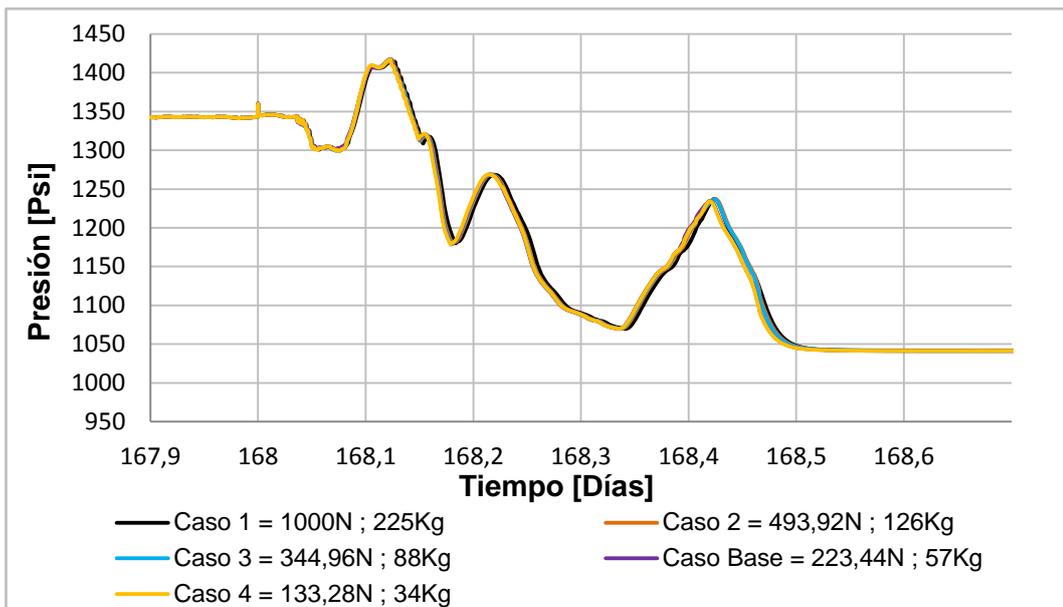
4.3.3.2 Fuerza Estática- Masa de la HDL

Los casos y características asociados a este estudio paramétrico se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2.3 y en la tabla 4.

El impacto de la variación de la masa de la HDL y por ende de la fuerza estática sobre la caída de presión y presión en el sistema, se observan en las gráficas 18 y 19, respectivamente. En ambos casos no se evidencia una variación considerable, por lo que se podría deducir que estos factores no influyen de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.



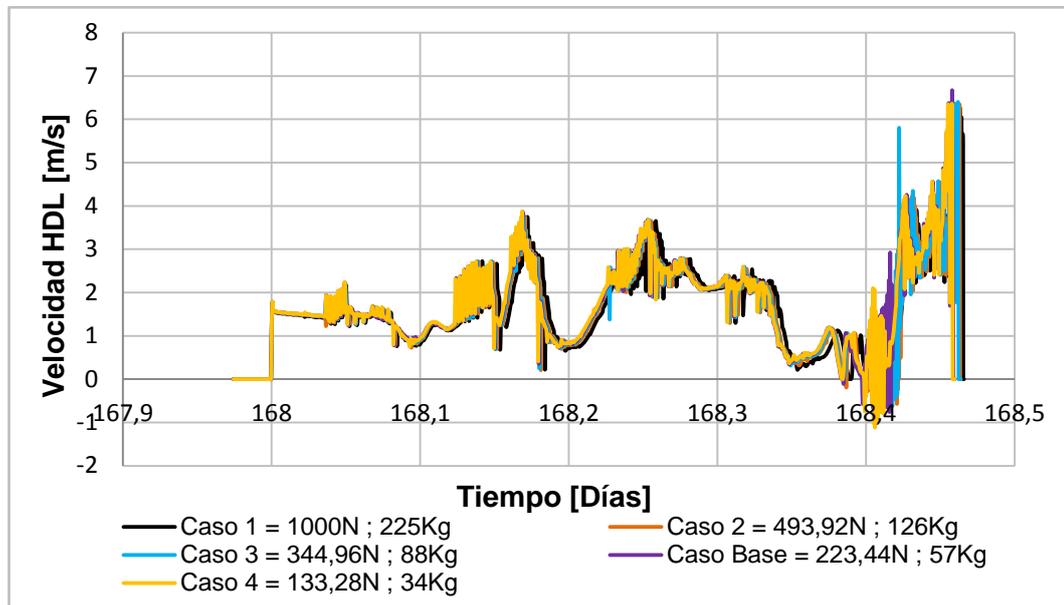
Gráfica 18: Impacto de la variación de la Fuerza Estática y Masa de la HDL sobre la Caída de Presión



Gráfica 19: Impacto de la variación de la Fuerza Estática y Masa de la HDL sobre la Presión

El impacto de la variación de la masa de la HDL y fuerza estática sobre la velocidad de la HDL se muestra en la gráfica 20. Los resultados revelan que no existe una variación grande entre cada caso, sin embargo, se observa que mientras la herramienta es menos pesada y por ende posee una fuerza estática menor, la

velocidad de la HDL aumenta, lo que trae como consecuencia que el proceso de limpieza se realice en menor tiempo.



Gráfica 20: Impacto de la variación de la Fuerza Estática y Masa de la HDL sobre la Velocidad de la HDL

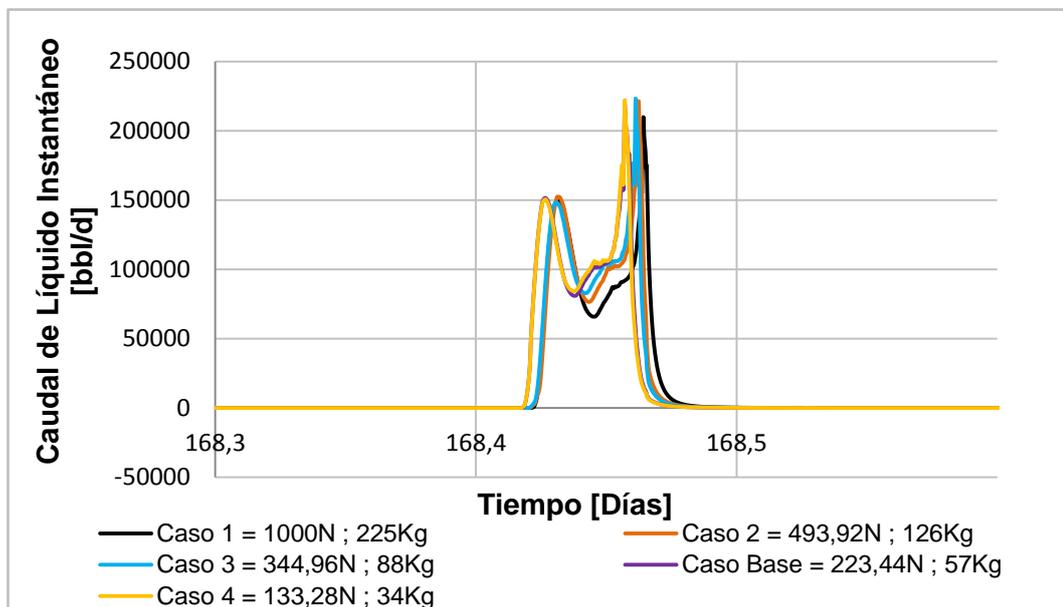
El impacto que tiene la variación de fuerza estática y masa de la HDL sobre la temperatura se observa en la tabla 16. Se evidencia que no existe variación considerable en la temperatura para cada uno de los casos, por lo que se podría deducir que estos factores no influyen de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

Tabla 16: Valores de Temperatura para la Variación de la Fuerza Estática-Masa de la HDL

	Día	Ti	Tf	ΔT
Caso 1	168	44,4	20,6	23,7
	168,2	43,3	21,4	21,8
	168,3	43,9	21,8	22,1
	168,4	45,0	22,0	23,0
	168,5	44,0	21,9	22,1
Caso 2	168	44,4	20,6	23,7
	168,2	43,7	21,4	22,2
	168,3	44,0	21,8	22,2
	168,4	45,0	22,0	22,9
	168,5	44,1	21,9	22,1

Caso 3	168	44,4	20,6	23,7
	168,2	43,5	21,4	22,1
	168,3	43,9	21,7	22,2
	168,4	45,0	22,0	23,0
	168,5	44,1	21,9	22,1
Caso Base	168	44,4	20,6	23,7
	168,2	43,9	21,4	22,4
	168,3	44,0	21,8	22,2
	168,4	45,0	22,0	22,9
	168,5	44,1	21,9	22,1
Caso 4	168	44,4	20,6	23,7
	168,2	43,9	21,4	22,4
	168,3	44,0	21,8	22,2
	168,4	45,0	22,0	23
	168,5	44,2	21,9	22,2

La gráfica 21 muestra el impacto de la variación de fuerza estática y masa de la HDL sobre el caudal de líquido instantáneo. Los resultados muestran que no existe una variación grande entre cada caso, sin embargo, se observa que mientras la herramienta es menos pesada y por ende posee una fuerza estática menor, el caudal de líquido instantáneo llega en un tiempo menor, esto es consecuencia de que la HDL presenta mayores valores de velocidad (gráfica 20).



Gráfica 21: Impacto de la variación de la Fuerza Estática y Masa de la HDL sobre el Caudal de Líquido Instantáneo

Los valores de eficiencia para el estudio paramétrico de la masa de la HDL y fuerza estática se observan en la tabla 15. Los resultados obtenidos para los cinco casos muestran que no existe una variación considerable, por lo que se podría deducir que estos factores no influyen de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

Tabla 17: Valores de Eficiencia para la Variación de la Fuerza Estática-Masa de la HDL

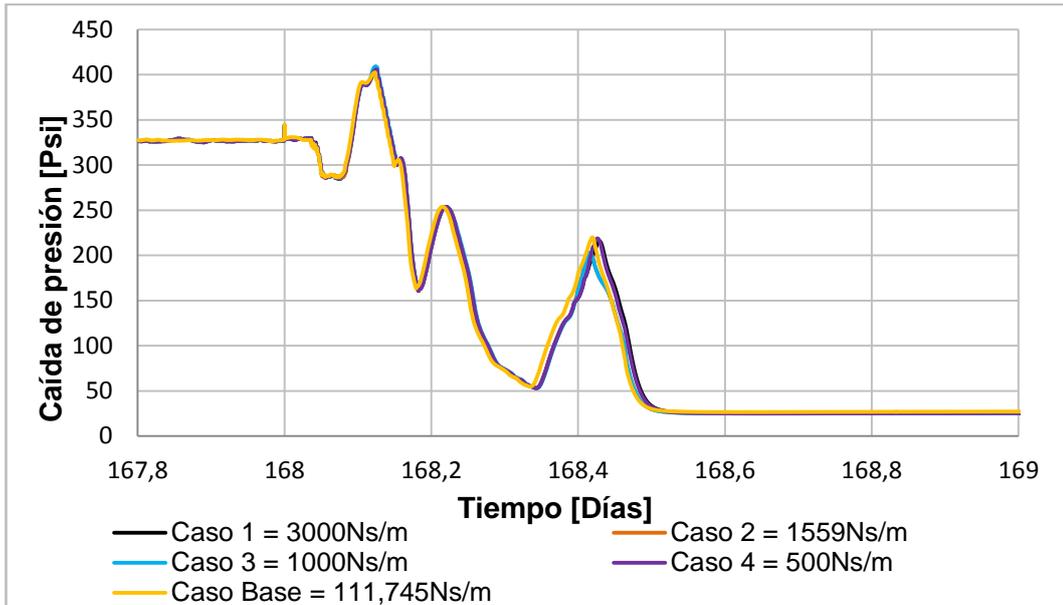
Número de caso	Líquido acumulado en la tubería [L]	Líquido removido [L]	Eficiencia [%]
Caso 1	733.449,76	668.162,3	91,09
Caso 2	733.449,76	662.849,7	91,37
Caso 3	733.449,76	661.335,3	90,16
Caso base	733.449,76	666.099,0	90,81
Caso 4	733.449,76	664.350,6	90,57

Este análisis evidencia que la fuerza de fricción estática y por ende la masa de la herramienta no es un parámetro que afecte en gran magnitud el comportamiento de la corrida de herramienta. Siendo la variable mayor impactada el flujo instantáneo que llega a la instalación receptora.

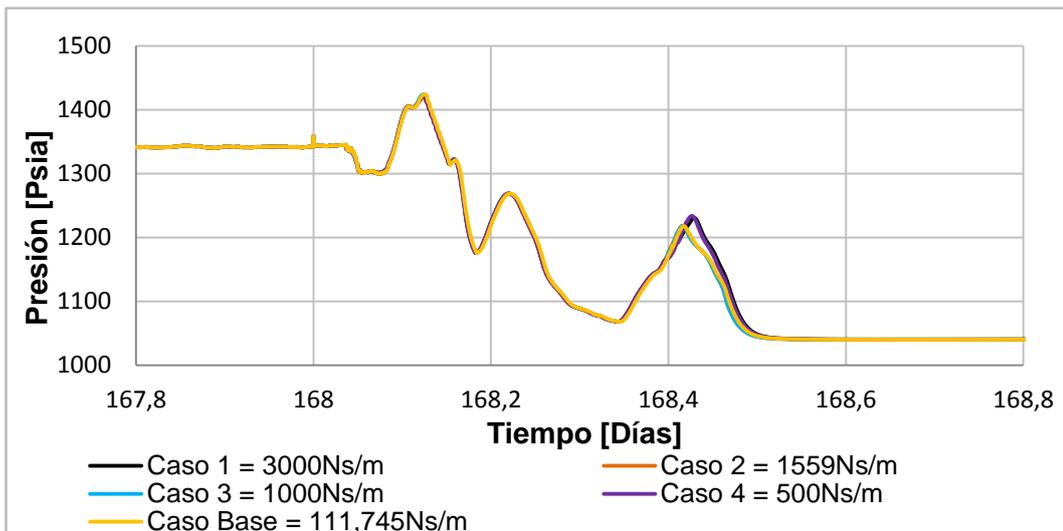
4.3.3.3 Factor de Fricción de Pared

Los casos y características asociados a este estudio paramétrico se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2.3 y en la tabla 5.

El impacto del factor de fricción de pared sobre la caída de presión y presión en el sistema se observan en las gráficas 22 y 23, respectivamente. Los resultados muestran que para los cinco casos en estudio no existe una variación considerable, por lo que se podría deducir que este factor no influye de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

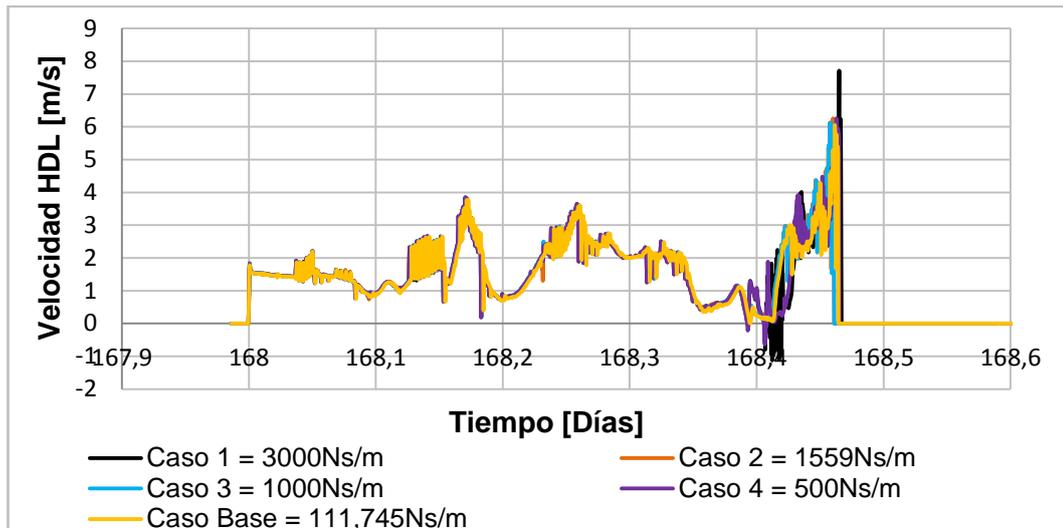


Gráfica 22: Impacto del Factor de Fricción de pared sobre la Caída de Presión



Gráfica 23: Impacto del Factor de Fricción de pared sobre la Presión

La gráfica 24 muestra el impacto que tiene el factor de fricción de pared sobre la velocidad de la HDL. Los resultados revelan que para los cinco casos en estudio no existe una variación considerable. Sin embargo, se observa que para el día 168,4 se tienen valores de velocidad negativa, que se deben a que en ese momento la fracción de líquido alcanza un valor aproximado de 89% y está en presencia de flujo ascendente, lo que ocasionó que la HDL se devolviera en ese punto.



Gráfica 24: Impacto del Factor de Fricción de pared sobre la Velocidad de la HDL

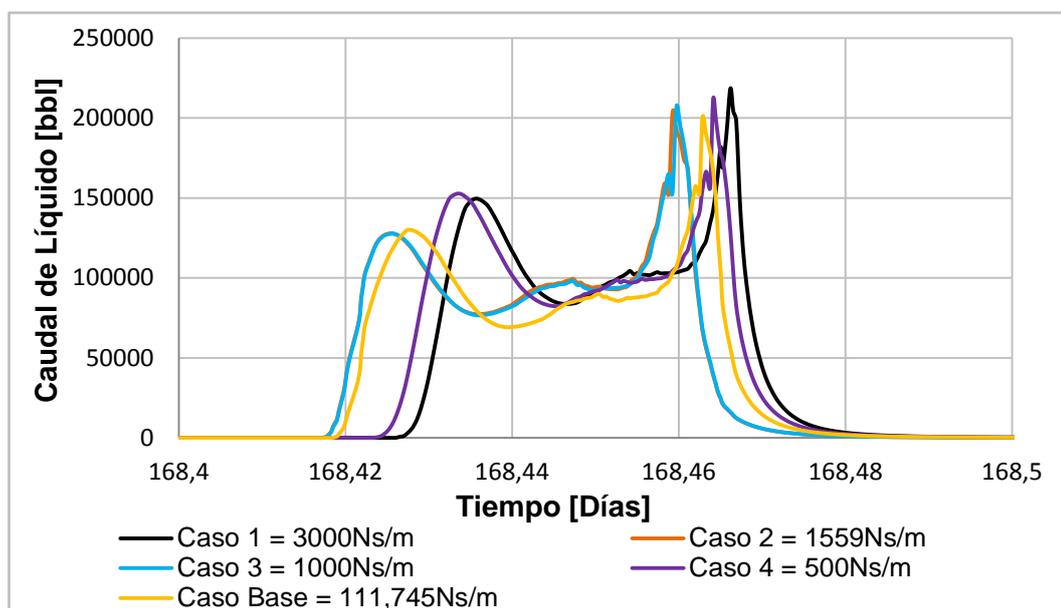
El impacto que tiene la variación del factor de fricción de pared sobre la temperatura se observa en la tabla 18. Se evidencia que no existe variación considerable en la temperatura para cada uno de los casos, por lo que se podría deducir que este factor no influye de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

Tabla 18: Valores de Temperatura para la Variación del Factor de Fricción de pared

	Día	Ti	Tf	ΔT
Caso 1	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	43,7	21,3	22,3
	168,3	44,1	21,7	22,4
	168,4	44,1	22,5	21,6
	168,5	44,3	21,9	22,4
Caso 2	168	44,4	20,8	23,5
	168,2	44,0	21,3	22,6
	168,3	44,1	21,7	22,3
	168,4	44,3	22,5	21,8
	168,5	44,3	21,9	22,4
Caso 3	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	43,8	21,3	22,5
	168,3	44,1	21,7	22,4
	168,4	44,8	22,4	22,3
	168,5	44,2	21,8	22,3
Caso Base	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	44	21,3	22,6
	168,3	44,0	21,7	22,2

	168,4	45,0	22,1	22,8
	168,5	43,8	21,9	21,9
Caso 4	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	44,7	21,2	23,5
	168,3	44,3	21,8	22,5
	168,4	44,2	22,1	22,1
	168,5	44,0	22,3	21,7

El impacto que tiene el factor de fricción de pared sobre el caudal de líquido instantáneo se muestra en la gráfica 25. Los resultados revelan que para los cinco casos en estudio no existe una variación considerable, ya que la diferencia de tiempo en el cual llega el líquido a la trampa receptora es de aproximadamente 15 minutos entre un caso y otro.



Gráfica 25: Impacto del Factor de Fricción de pared sobre el Caudal de Líquido

La tabla 19 muestra el impacto que tiene el factor de fricción de pared sobre la eficiencia de barrido. Los resultados revelan que para los cinco casos en estudio no existe una variación considerable, ya que la variación máxima entre un caso y otro es del 1%, por lo que se podría deducir que este factor no influye de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

Tabla 19: Valores de Eficiencia para la Fuerza de Fricción de pared

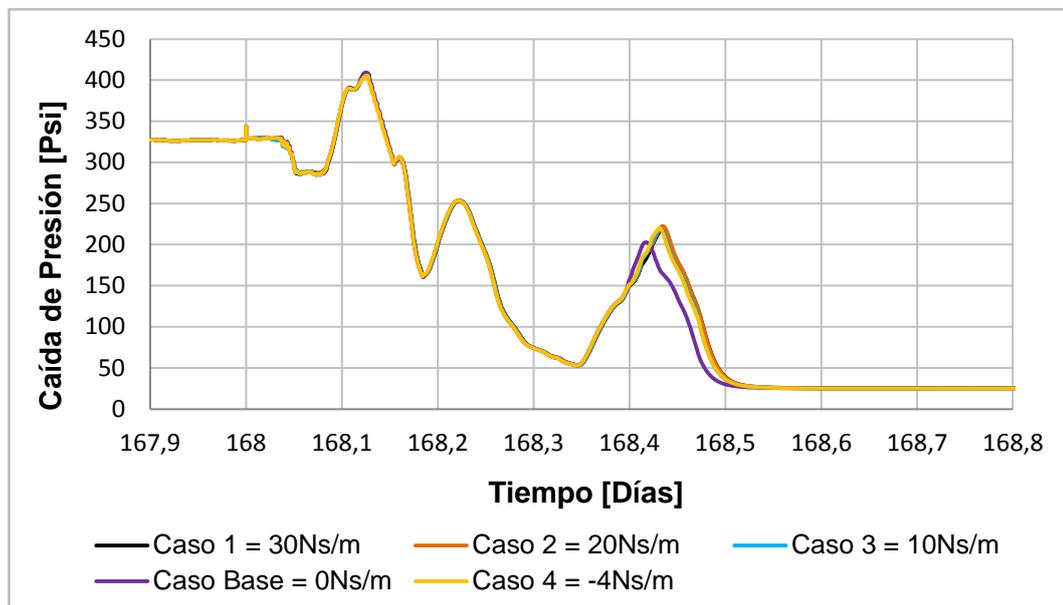
Número de caso	Líquido acumulado en la	Líquido removido [L]	Eficiencia [%]
----------------	-------------------------	----------------------	----------------

	tubería [L]		
Caso 1	733.449,76	662.651,5	90,34
Caso 2	733.449,76	671.540,7	91,55
Caso 3	733.449,76	669.590,1	91,29
Caso 4	733.449,76	668.310,5	91,11
Caso base	733.449,76	675.519,1	92,10

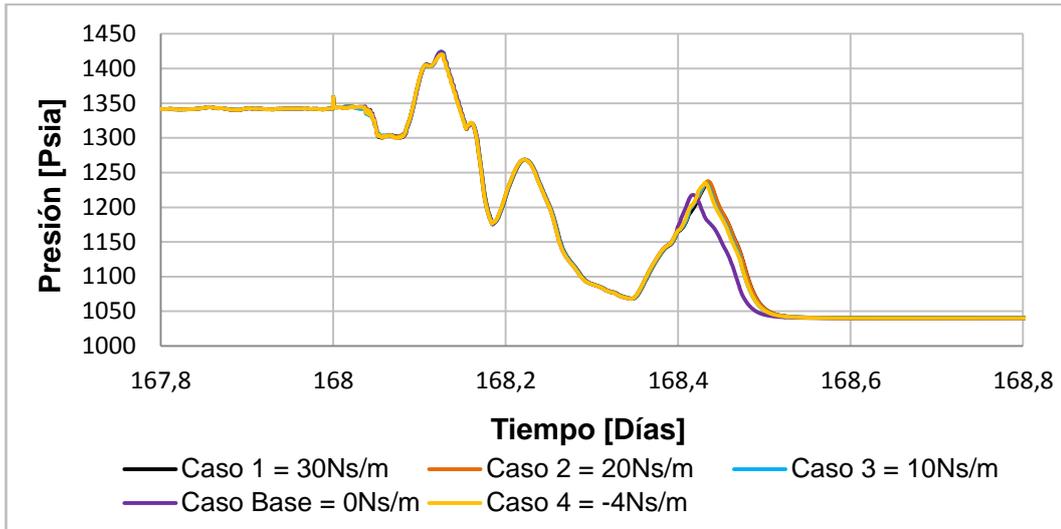
4.3.3.4 Fuerza de resistencia lineal

Los casos y características asociados a este estudio paramétrico se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2.3 y en la tabla 6.

El impacto de la fuerza de resistencia lineal sobre la caída de presión y presión en el sistema se observan en las gráficas 26 y 27, respectivamente. Se evidencia que para los casos 1, 2, 3 y 4 no existe una variación considerable, mientras que para el caso base si se observa una pequeña diferencia. Esto se debe a que la fuerza de resistencia lineal es una de las fuerzas que se oponen al movimiento de la herramienta, siendo nula para el caso base, la cantidad de energía que se necesitará para poner en movimiento la HDL será menor que para el resto de los casos.

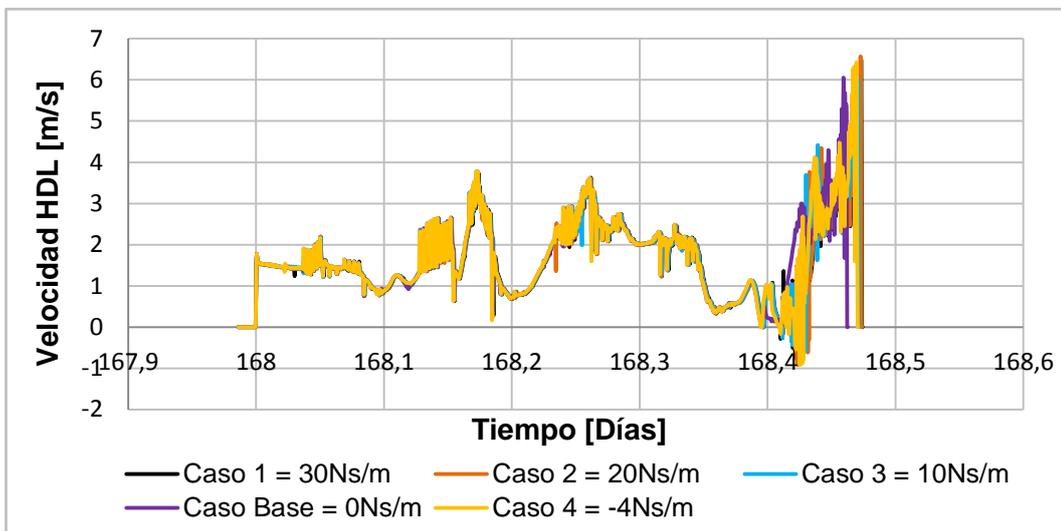


Gráfica 26: Impacto de la Fuerza de resistencia Lineal sobre la Caída de Presión



Gráfica 27: Impacto de la Fuerza de resistencia Lineal sobre la Presión

El impacto de la fuerza de resistencia lineal sobre la velocidad de la herramienta de limpieza se observa en la gráfica 28. Se evidencia que para los casos 1, 2, 3 y 4 no existe una variación considerable, mientras que para el caso base si se observa una pequeña diferencia, ya que la fuerza de resistencia lineal es nula, y por ende la HDL realiza el proceso de limpieza en un tiempo menor en comparación al resto de los casos.



Gráfica 28: Impacto de la Fuerza de resistencia Lineal sobre la Velocidad de la HDL

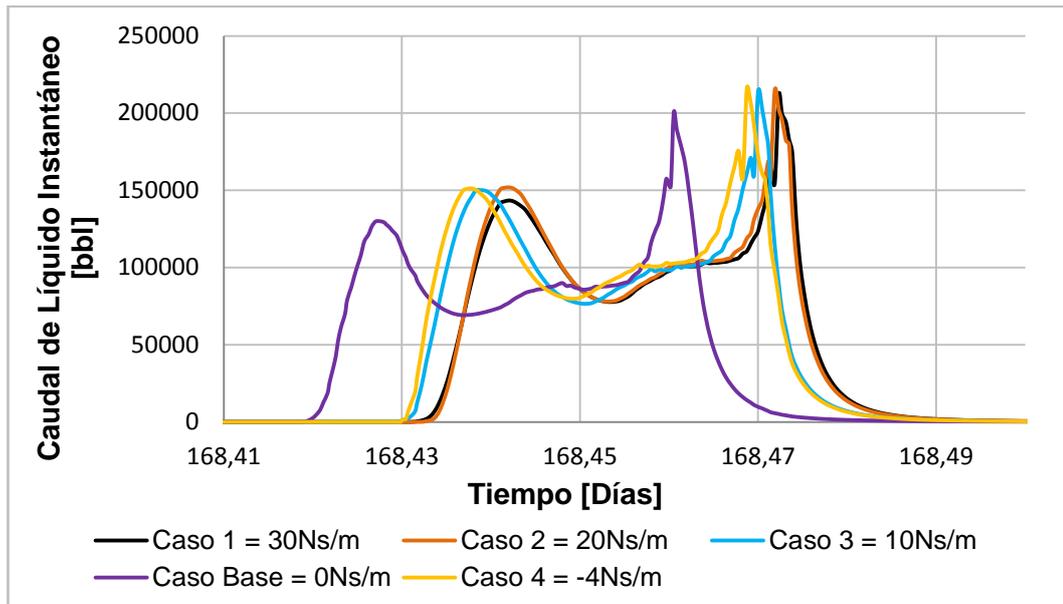
El impacto que tiene la variación de fuerza de resistencia lineal sobre la temperatura se observa en la tabla 20. Se evidencia que no existe variación

considerable en la temperatura para cada uno de los casos, por lo que se podría deducir que este factor no influye de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

Tabla 20: Valores de Temperatura para la Variación de la Fuerza de Resistencia Lineal

	Día	Ti	Tf	ΔT
Caso 1	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	43,7	21,3	22,4
	168,3	44,1	21,7	22,4
	168,4	44,1	22,5	21,6
	168,5	44,3	21,9	22,4
Caso 2	168	44,4	20,8	23,5
	168,2	44,0	21,3	22,6
	168,3	44,1	21,7	22,3
	168,4	44,3	22,5	21,7
	168,5	44,3	21,9	22,4
Caso 3	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	43,8	21,3	22,5
	168,3	44,1	21,7	22,4
	168,4	44,8	22,4	22,3
	168,5	44,2	21,8	22,3
Caso Base	168	44,4	20,8	23,5
	168,2	44	21,3	22,6
	168,3	44,0	21,7	22,2
	168,4	45,0	22,1	22,9
	168,5	43,8	21,9	21,9
Caso 4	168	44,4	20,8	23,5
	168,2	44,7	21,2	23,5
	168,3	44,3	21,8	22,5
	168,4	44,2	22,1	22,1
	168,5	44,0	22,3	21,7

La gráfica 29 muestra el impacto de la fuerza de resistencia lineal sobre el caudal de liquido instantáneo. Se observa que a medida que el valor absoluto de la fuerza de resistencia lineal disminuye, el caudal de liquido instantáneo llega más rápido a las instalaciones de recepción.



Gráfica 29: Impacto de la Fuerza de resistencia Lineal sobre el Caudal de Líquido Instantáneo

El impacto que tiene la fuerza de resistencia lineal sobre la eficiencia de barrido se observa en la tabla 21. Los resultados obtenidos para los cinco casos muestran que no existe una variación considerable, por lo que se podría deducir que estos factores no influyen de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

Tabla 21: Valores de Eficiencia para la Variación de la Fuerza de Resistencia Lineal

Número de caso	Líquido acumulado en la tubería [L]	Líquido removido [L]	Eficiencia [%]
Caso 1	733.449,76	669.320,8	91,25
Caso 2	733.449,76	666.901,2	90,92
Caso 3	733.449,76	663.671,3	90,48
Caso base	733.449,76	666.099,0	90,81
Caso 4	733.449,76	670.592,7	91,42

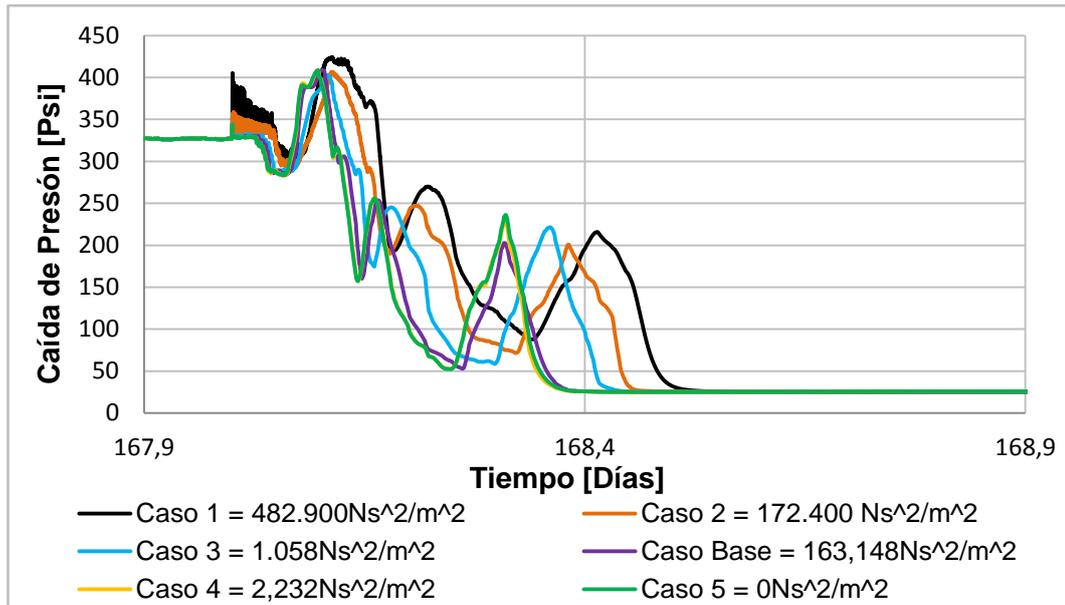
4.3.3.5 Fuerza de resistencia cuadrática

Los casos y características asociados a este estudio paramétrico se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2.3 y en la tabla 7.

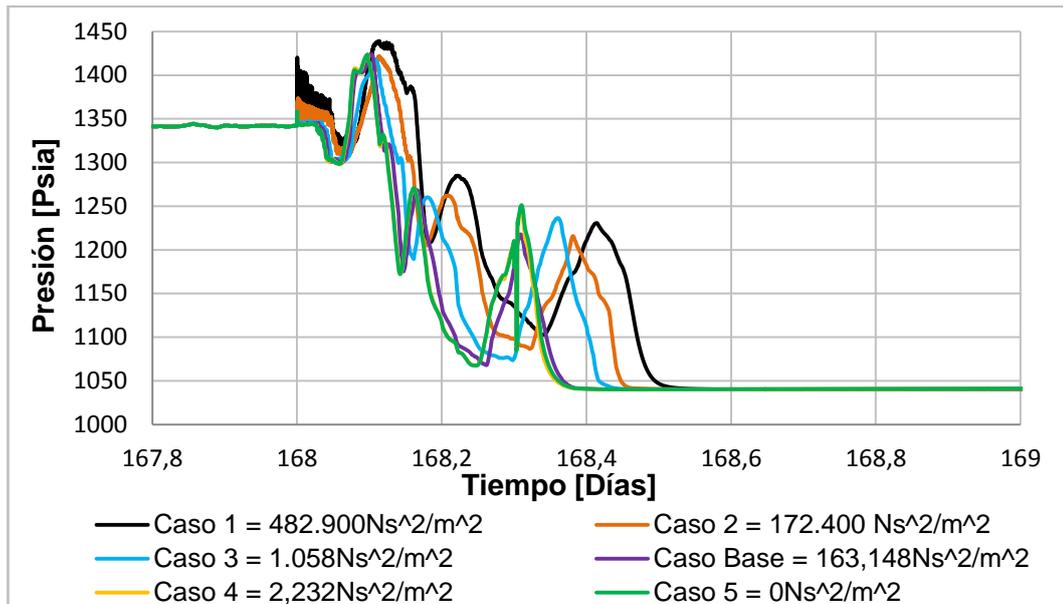
El impacto que tiene la fuerza de resistencia cuadrática sobre la caída de presión y presión en el sistema se muestran en las gráficas 30 y 31, respectivamente. Los resultados muestran una variación importante entre cada caso, lo que se debe a

que la fuerza de resistencia cuadrática esta relacionada con la hidrodinámica de la herramienta (ecuación 10), donde el coeficiente de arrastre (C_D) es determinante, por ser un factor que cuantifica la resistencia de un objeto en un medio fluido.

Se observa que mientras la fuerza de resistencia cuadrática es mayor, se tendrán mayores valores de presiones y caídas de presión en el sistema, debido a que se necesitará un mayor esfuerzo para lograr desplazar la HDL a lo largo de la tubería.

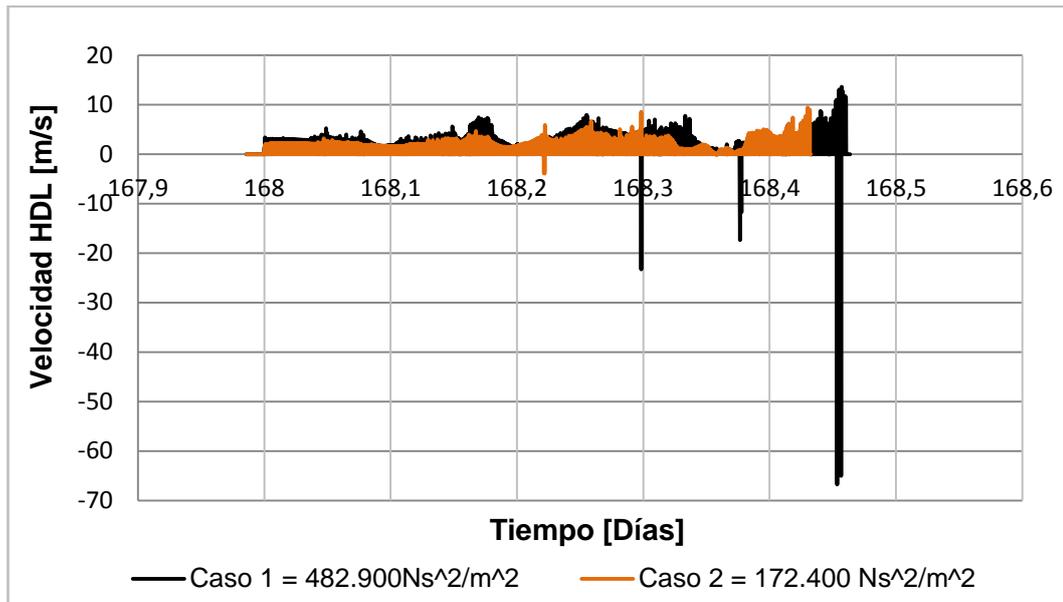


Gráfica 30: Impacto de la Fuerza de resistencia cuadrática sobre la Caída de Presión



Gráfica 31: Impacto de la Fuerza de resistencia cuadrática sobre la Presión

El impacto de la variación de la fuerza de resistencia cuadrática sobre la velocidad de la HDL para el caso 1 y 2 se muestran en la gráfica 32. Se observa un comportamiento totalmente irregular comparado a todos los estudios paramétricos anteriores. Para comprender mejor este fenómeno, nos apoyamos en la ecuación 2, donde se evidencia que si la fuerza de resistencia cuadrática es mayor a la fuerza de propulsión de la herramienta, no se obtendrá movimiento de la HDL dentro de la tubería. Para este caso, el simulador arroja errores numéricos.

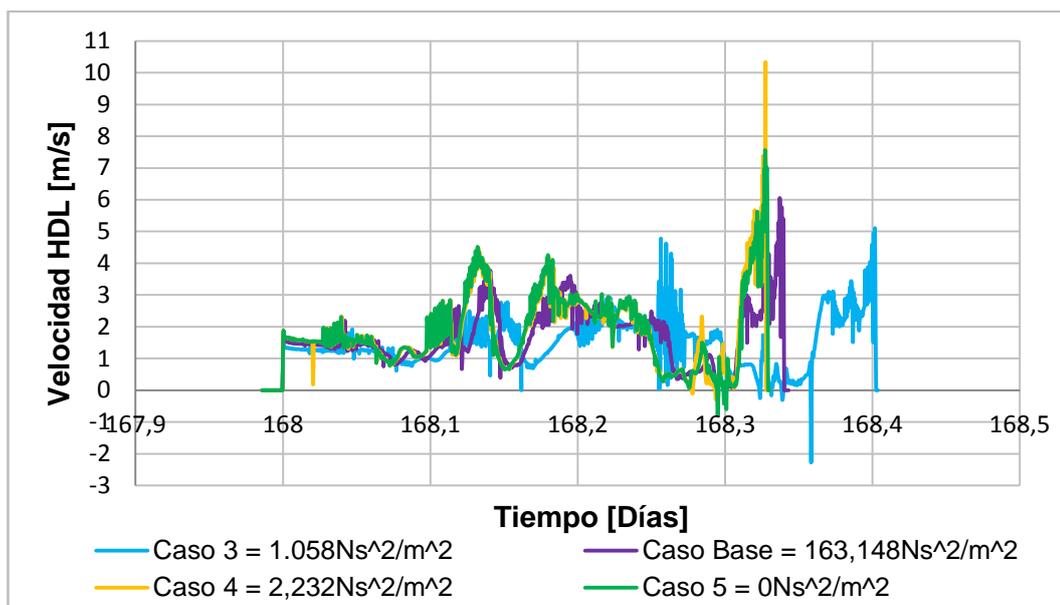


Gráfica 32: Impacto de la variación de la Fuerza de resistencia cuadrática sobre la Velocidad de la HDL (Caso 1 y 2)

La gráfica 33 muestra el impacto que tiene la fuerza cuadrática para el resto de los casos en estudio. Se observa que para estos casos la fuerza de propulsión es mayor que la fuerza de resistencia cuadrática, por lo que la HDL tiene movimiento. Adicionalmente, los resultados muestran que cuando el factor de resistencia cuadrática disminuye, el tiempo de limpieza también disminuye. Esto se debe a que las fuerzas que se oponen al movimiento de la herramienta son menores.

Por otra parte, los picos negativos de velocidad que se muestran en la gráfica para el caso 3, se deben a la fracción de líquido que se encuentra frente a la herramienta lo que forma una columna de líquido que conlleva a una desaceleración, el valor de la fuerza cuadrática y la inclinación del perfil topográfico en este punto.

Se aprecia que la HDL entra después y sale más rápido de la línea a medida que la fuerza de resistencia cuadrática es menor.



Gráfica 33: Imapcto de la variación de la Fuerza de resistencia cuadrática sobre la Velocidad de la HDL

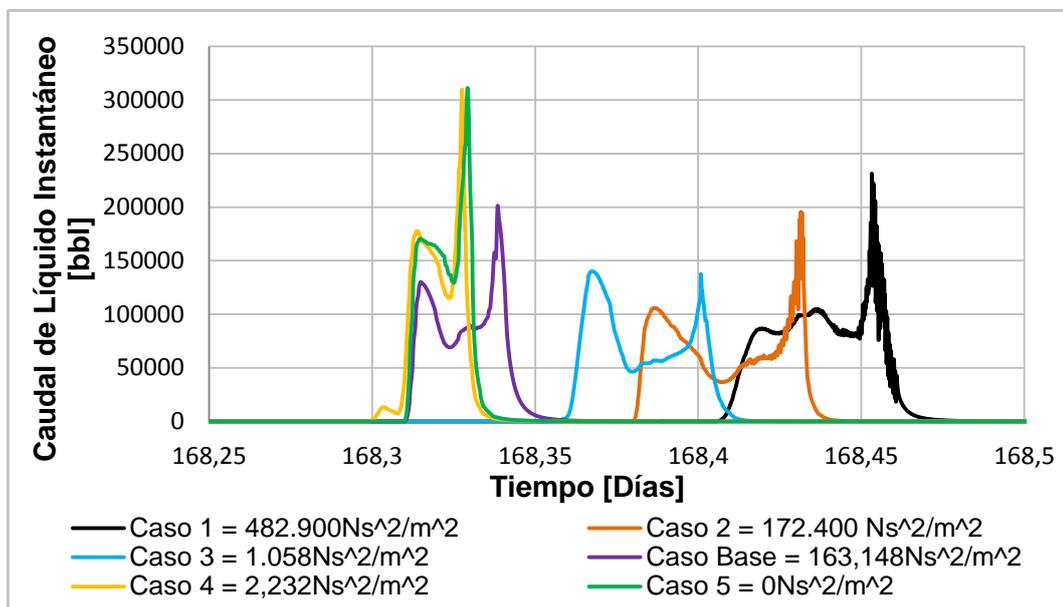
El impacto que tiene la fuerza de resistencia cuadrática sobre la temperatura se muestra en la tabla 22. Se observa que para el caso 1 y 2 el simulador sigue arrojando errores numéricos. Mientras que para el resto de los casos se evidencia que no existe variación considerable en la temperatura, por lo que se podría deducir que este factor no influye de forma severa en el proceso de corrida de herramienta.

Tabla 22: Valores de Temperatura para la Variación de la Fuerza de Resistencia Cuadrática

	Día	Ti	Tf	ΔT
Caso 1	168	43,1	15,1	28,0
	168,2	41,7	15,0	26,6
	168,3	42,8	15,0	27,7
	168,4	43,4	15,3	28,0
	168,5	42,6	15,5	27,0
Caso 2	168	42,9	15,1	27,8
	168,2	42,5	15,1	27,4
	168,3	42,7	15,1	27,6
	168,4	42,9	15,1	27,8
	168,5	43,4	15,1	28,3
Caso 3	168	44,4	20,8	23,6
	168,2	43,8	21,3	22,4
	168,3	44,1	21,7	22,4

	168,4	44,8	22,4	22,3
	168,5	44,2	21,8	22,3
	168	44,4	20,8	23,6
Caso Base	168,2	44	21,3	22,7
	168,3	44,0	21,7	22,2
	168,4	45,0	22,1	22,9
	168,5	43,8	21,9	21,9
	168	44,4	20,8	23,5
Caso 4	168,2	44,7	21,2	23,5
	168,3	44,3	21,8	22,5
	168,4	44,2	22,1	22,1
	168,5	44,0	22,3	21,7

La gráfica 34 muestra el impacto que tiene la fuerza cuadrática sobre el caudal de líquido instantáneo. Los resultados muestran diversas variantes, para el caso 1 y 2 la HDL no tiene movimiento dentro de la línea, por que el comportamiento será errático para cualquier variable en estudio; mientras que para el resto de los casos la diferencia de tiempo en el cual llega el caudal de líquido de uno con respecto al otro no supera los 15 minutos, esto conforme a que la fuerza de resistencia cuadrática va disminuyendo.



Gráfica 34: Impacto de la Fuerza de resistencia cuadrática sobre el Caudal de líquido Instantáneo

Los valores de eficiencia para el estudio paramétrico de la fuerza de resistencia cuadrática se muestran en la tabla 23. Los resultados muestran para el caso 1 y 2

valores de eficiencia altos, sabiendo que para estos la HDL no tiene movimiento dentro de la línea, estos valores corresponden a errores numéricos del simulador. Para el caso 4 y 5 se obtuvieron los mismos valores de eficiencia, lo que es producto de que sus valores de fuerza de resistencia cuadrática son muy cercanos.

Tabla 23: Valores de Eficiencia para la Variación de la Fuerza de Resistencia Cuadrática

Número de caso	Líquido acumulado en la tubería [L]	Líquido removido [L]	Eficiencia [%]
Caso 1	733.449,76	714.080,7	97,35
Caso 2	733.449,76	672.956,3	91,75
Caso 3	733.449,76	667.252,7	90,97
Caso base	733.449,76	666.099,0	90,81
Caso 4	733.449,76	641.664,1	87,48
Caso 5	733.449,76	641.664,1	87,48

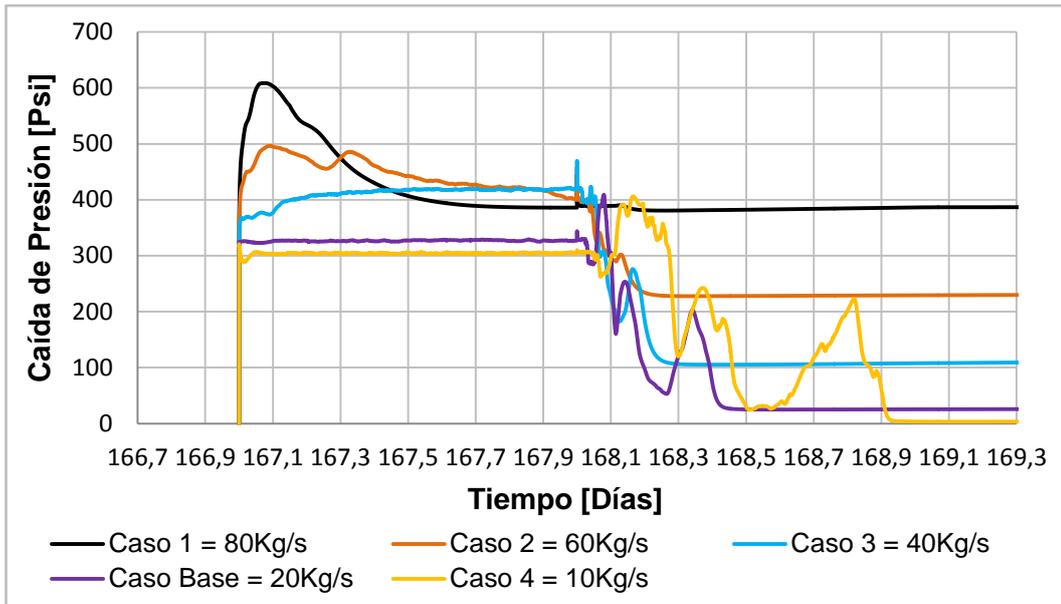
La fuerza de resistencia cuadrática es un parámetro que puede afectar el comportamiento de la simulación de corrida de herrameinta, por lo tanto, debe ser considerado adecuadamente con el fin de reducir problemas de computo numérico dentro del simulador.

4.3.3.6 Variación del Flujo másico

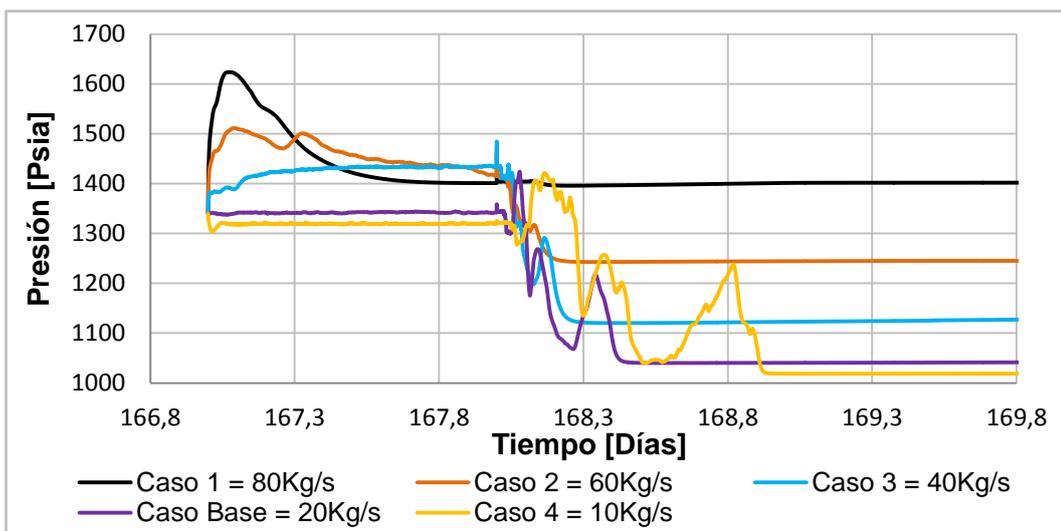
Los casos y características asociados a este estudio paramétrico se explican en el capítulo III, apartado 4.5.2.3 y en la tabla 8.

El impacto de la variación del flujo másico sobre la caída de presión y presión en el sistema se observan en las gráficas 35 y 36, respectivamente. Los resultados muestran que a medida de que aumenta el flujo másico existe un incremento de la caída de presión y presión del sistema. Los mayores valores de presión se obtienen antes de realizar la corrida de herramienta, es decir, para el día 167, y la próxima variación importante se produce al momento que ingresa la HDL a la tubería, en el día 168. Esto se debe a la perturbación que genera la incorporación de la HDL a la línea. No hay que olvidar que los altos valores de presión y caída de presión en el sistema se corresponden a las obstrucciones que existen dentro de la línea producto del líquido acumulado.

Adicionalmente, se observa que a mayor valor de flujo másico se tendrá un desplazamiento más rápido de la HDL dentro de la tubería. Por lo que para el caso 4 donde el flujo másico es de 10Kg/s el sistema debe realizar aumentos importantes en la presión para poder desplazar tanto la HDL como el líquido acumulado. Con base en el estudio el flujo másico de 10Kg/s parece no ser un valor óptimo de flujo para el proceso de corrida de herramienta.

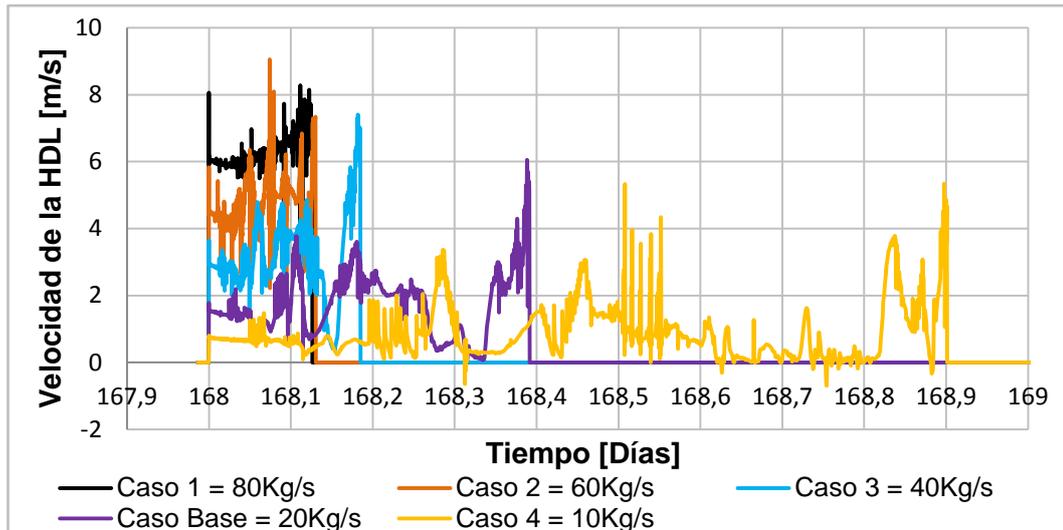


Gráfica 35: Impacto de la Variación del Flujo Másico sobre la Caída de Presión de entrada



Gráfica 36: Impacto de la Variación del Flujo Másico sobre la Presión

La gráfica 37 muestra el impacto que tiene la variación del flujo másico sobre la velocidad de la HDL. Se observa en los resultados que a medida de que el flujo másico se incrementa, la velocidad de la herramienta será mayor y por ende se reduce el tiempo de corrida. Los menores tiempos de corrida se producen para el caso 1, 2 y 3, donde los valores de flujo másico son de 80Kg/s, 60Kg/s y 40Kg/s, respectivamente..



Gráfica 37: Impacto de la Variación del Flujo Másico sobre la Velocidad de la HDL

Los valores de temperatura para la variación del flujo másico se muestran en la tabla 24. Se observa que para todos los casos existe un ligero aumento en la temperatura de salida de la HDL, esto se debe al efecto de compresión que se genera mientras la HDL desplaza todo el líquido que está acumulado frente a ella. Para el caso 1 la temperatura disminuye considerablemente en el día 168,486, esto es producto de que la HDL sale en el día 168,12 y el flujo dentro de la tubería se estabiliza luego de la remoción de líquido.

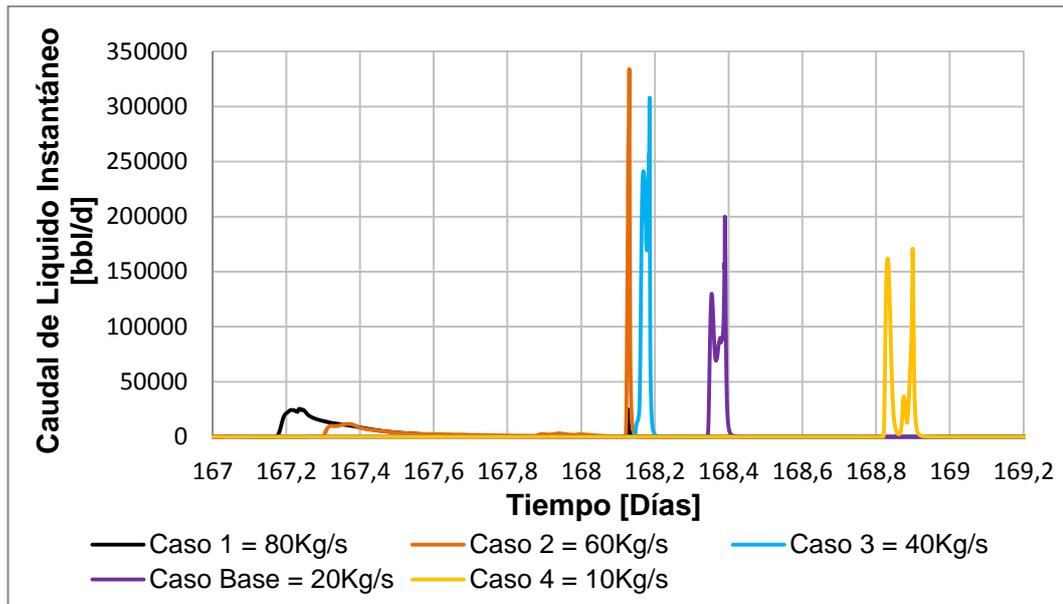
Tabla 24: Valores de Temperatura para la Variación del Flujo Másico

	Día	Ti	Tf	ΔT
Caso 1	168	47,4	21,3	26,0
	168,2	47,1	20,3	26,8
	168,3	47,2	17,3	29,8
	168,4	47,2	17,3	29,8
	168,5	47,2	17,3	29,8
Caso 2	168	46,6	22,8	23,8
	168,2	46,5	23,3	23,2

	168,3	46,6	23,7	22,9
	168,4	46,6	22,1	24,5
	168,5	46,6	20,	25,7
Caso 3	168	45,7	20,8	24,8
	168,2	45,5	21,3	24,2
	168,3	45,4	21,7	23,6
	168,4	45,6	23,1	22,5
	168,5	45,6	20,5	25,0
Caso Base	168	43,1	20,8	22,2
	168,2	42,6	21,3	21,3
	168,3	42,5	21,7	20,8
	168,4	43,5	22,1	21,4
	168,5	42,5	21,9	20,5
Caso 4	168	39,3	21,8	17,4
	168,2	39,9	23,3	16,6
	168,3	38,8	22,7	16,1
	168,4	39,4	24,1	15,2
	168,5	38,9	21,9	16,9

El impacto que tiene la variación del flujo másico sobre el caudal de líquido instantáneo se muestra en la gráfica 38. Los resultados revelan que los valores más altos de caudal de líquido se corresponden con los picos más altos de velocidad de la herramienta.

Se observa que el caudal de líquido instantáneo para el caso 1 es muy bajo para los días posteriores al ingreso de la herramienta a la tubería. Esto se debe a que desde el día 167 se está desplazando líquido, motivado a la cantidad de flujo másico tan grande (80 Kg/s) que está ingresando a la línea.



Gráfica 38: Impacto de la Variación del Flujo Másico sobre el Caudal de Líquido Instantáneo

Los valores de eficiencia para la variación de flujo másico se observan en la tabla 25. Los resultados obtenidos muestran que a medida de que aumenta el flujo másico, el valor de eficiencia será mayor. Por lo que el caso 1 se observa una eficiencia de 97,87 % y para el caso 4 de 87,20%.

Tabla 25: Valores de Eficiencia para la Variación del Flujo Másico

Número de caso	Líquido acumulado en la tubería [L]	Líquido removido [L]	Eficiencia [%]
Caso 1	733.449,76	717.843,7	97,87
Caso 2	733.449,76	657.443,8	89,63
Caso 3	733.449,76	651.187,4	88,78
Caso base	733.449,76	666.099,0	90,81
Caso 4	733.449,76	639.593,4	87,20

Es indudable, que variaciones en el flujo másico impactan en el comportamiento de la corrida de herramienta. En tal sentido, esta variable es clave con el fin de entender lo que ocurriría cuando se incrementa o reduce el flujo másico. \

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se desarrolló un estudio para seleccionar y evaluar herramientas de limpieza para gasoductos donde se concluyó lo siguiente:
- Se seleccionó una HDL metálica basado en una metodología de selección matricial, ya que cumple con las características de diseño y operación de la tubería en estudio.
- Se desarrolló una metodología para calcular los parámetros asociados a la HDL, como lo son: los factores de fuga, la fuerza de fricción estática de la herramienta, las fuerzas de resistencia lineal y cuadrática, los cuales son parámetros que garantizarán una simulación de corrida de herramienta más ajustada a la realidad
- Se realizaron estudios transitorios usando el simulador OLGA de operaciones de corridas de herramientas en una tubería de gas considerando todos los parámetros relacionados con la HDL y las condiciones operacionales del sistemas, obteniendo el impacto de cada uno sobre variables como presión, caída de presión, velocidad de la herramienta, temperatura del fluido, flujo instantáneo y máximo volumen de líquido recibido por las instalaciones de recepción.
- La variación de los factores de fuga afecta la remoción de líquidos, debido a que mientras el valor numérico de la fuga (espacio que existe entre la HDL y la tubería) aumenta, serán requeridos valores de presión más altos en el sistema para lograr el desplazamiento de la HDL. Adicionalmente, el aumento de este factor disminuye la eficiencia de barrido.
- La variación de fuerza estática y por ende de masa de la HDL no impacta en el proceso de corrida de herramienta, ya que para los cinco casos en estudio los valores de eficiencia entre un caso y otro no varían en un valor mayor al 3%.

- La variación de factor de fricción de pared no incide de manera importante en el proceso de corrida de herramienta.
- La variación de la fuerza de resistencia lineal es un parámetro que no muestra grandes cambios en el proceso de remoción de líquido.
- La variación de fuerza de resistencia cuadrática es un factor crítico para la eficiencia de barrido en el sistema, ya que al tener un mayor coeficiente de arrastre, el sistema va necesitar mayores valores de presión para lograr el desplazamiento del líquido acumulado en la tubería.
- La variación del flujo másico influye en los valores de velocidad de la HDL, lo que disminuye a un 87% aproximadamente la eficiencia barrido en el sistema cuando se utiliza un flujo másico de 10Kg/s.

5.2 Recomendaciones:

- En el caso estudiado de deben mantener flujos másico bajos, en el orden de los 20 kg/s, para tener una alta eficiencia en la remoción de líquidos acumulado y mantener velocidades de la HDL dentro de los rangos recomendados.
- Utilizar las HDL que tengan pesos inferiores a los 225 [Kg] aproximadamente para el caso en estudio, ya que este parámetro se ve afectado por el efecto de la fuerza de gravedad y el peso del tapón de líquido frente a la herramienta en flujos ascendentes.
- Realizar pruebas experimentales para obtener el factor de forma F_1 descrito en el capítulo II, apartado 2.10, asociado a las HDL metálicas, con el fin de determinar las correlaciones más apropiadas para este cálculo.
- Obtener valores que se ajusten más a la realidad del polinomio que describe la fuerza de fricción descrita en el capítulo II, apartado 2.10, a través de estudios experimentales con el fin de entender mejor el comportamiento de la corrida de herramienta en las tuberías
- Efectuar ensayos experimentales para determinar el coeficiente de arrastre asociado a la HDL con distintos accesorios, para de esta manera poder evaluar los valores de eficiencia relacionados a cada uno de ellos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aidan O'Donoghue (2012). Modelling pig train dynamics in natural gas pipelines. Pigging Products & Services. Disponible en: Pipeline-research.com/PigTrainDynamics.pdf.
- [2] Borregales, M.A. (2014). *Análisis DFC de los fenómenos atribuidos a la corrida de herramienta en tuberías de hidrocarburos*. Trabajo de grado de maestría, Universidad Simón Bolívar, Facultad de Ingeniería, Universidad Simón Bolívar, Miranda, Venezuela.
- [3] Botros y Golshan (2010). Field Validation of a Dynamic Model for an MFL ILI Tool in Gas Pipelines. *The American Society of Mechanical Engineers*, 3, 325-336.
- [4] Esmailzadeh, Mowla y Asemani (2009). Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 60,100-106.
- [5] Fragoso, E. E. (2007). *Estudio numérico de la corrida de diablos para el mantenimiento de la producción en oleoductos*. Trabajo especial de grado para optar al título de ingeniero petrolero, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.
- [6] Incropera, Frank & Dewitt, D (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4ª Ed.). USA: Editorial Wiley.
- [7] Kane, J.W. y Sternheim, M.M. (1992). *Física* (2ª Ed.). Barcelona: Editorial Reverté,
- [8] Kjen H. Bendlk.en, Dag Maine., Randl Moe, y Sven Nuland. (1991). The Dynamic Two-Fluid Model OLGA, *Society of Petroleum Engineers*, 6,171-180.
- [9] Liu H. (2003). *Pipeline Engineering*, Lewis Publishers, USA: CRC Press Company.

- [10]Nieckele, Braga y Azevedo (2001). Transient Pig Motion Through Gas and Liquid Pipelines. *The American Society of Mechanical Engineers*, 123, 260-269.
- [11]Peña, J.G. (2015). *Efecto de la interacción fluido estructura de herramientas en línea tipo bala en tuberías*. Trabajo de grado de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Simón Bolívar, Miranda, Venezuela.
- [12]Ramírez, R., & Dutra, M. (2011). Simulación de flujo y evaluación de la fuerza de arrastre actuando en el cuerpo de un pig con un bypass. *Mecánica Computacional* , 29, 8741-8751.
- [13]Sainson, S. (2007). *Inspection en ligne des pipelines (2^a Ed.)*. France: Editions TEC & DOC.
- [14]Tan Tien Nguyeo y Sang Bong Kim (2001). Modeling and Simulation for PIG with Bypass Flow Control in Natural Gas Pipeline. *KSME International Journal*, 15, 1302-1310.
- [15]Tore Pettersen (2013). *Manual de Usuario Simulador OLGA (Version 7.3.3)*.
- [16]X.X. Xu y J. Gong (2005). Pigging simulation for horizontal gas-condensate pipelines with low-liquid loading, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 48, 272-280.

APÉNDICES

Apéndice A – Cálculos asociados a los parámetros de la HDL.

Se tiene que la fuerza estática es igual a:

Radio del disco, r	0,24	m
Numero de discos, n	2	
Coefficiente de fricción, μ	0,4	
Ancho de cada disco, w	0,01	m
Peso de la HDL, m_{HDL}	57	Kg
Diámetro de la HDL, D_{HDL}	0,48	m
Viscosidad del fluido, η	$1,25 \cdot 10^{-5}$	Pa.s
Longitud de la HDL, L	0,771	m
Ancho del gap, δ	0,004826	m
Densidad del Fluido, ρ	0,775	Kg/m ³
Coefficiente de resistencia efectivo, f_e	0,032	
Área de la tubería, A_t	0,181	m ²
Área de la HDL, A_{HDL}	0,177	m ²

$$F_e = \mu \cdot N = 223,44 \text{ N}$$

Según la correlación de Botros-Golshan (2010), se tiene que si:

$$R_e^* = \frac{4 \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_{HDL}}{\eta} \leq 2.000 \rightarrow F_w = \pi \cdot D \cdot L \cdot \eta \cdot \frac{V_{HDL}}{\delta}$$

$$R_e^* = \frac{4 \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_{HDL}}{\eta} > 2.000 \rightarrow F_w = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left[\frac{f \cdot L}{4 \cdot \delta} \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot V_{HDL}^2\right] \cdot (\pi \cdot D \cdot \delta)$$

Como:

$$R_e^* = \frac{4 \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_{HDL}}{\eta} = \frac{4 \cdot 0,004826 \text{ m} \cdot 0,775 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,25 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}} = 2.393,696$$

Entonces:

$$F_w = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left[\frac{0,032 \cdot 0,771 \text{ m}}{4 \cdot 0,004826 \text{ m}} \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 0,775 \cdot \left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \right] \cdot (\pi \cdot 0,48 \text{ m} \cdot 0,004826 \text{ m})$$

$$F_w = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Para el cálculo del factor de fricción en la pared de la tubería, se puede obtener a partir de la expresión del manual de usuario del software de simulación Olga.

$$F_w = F_e - f_w \cdot V_{HDL}$$

$$f_w = \frac{F_e - F_w}{V_{HDL}} = \frac{223,44 \text{ N} - 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 111,74 \frac{\text{Ns}}{\text{m}} = 111,74 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Ahora bien para el cálculo de las fuerzas de resistencia viscosa (lineal y cuadrática), se tiene que si:

$$R_e^{**} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} < 1 \rightarrow F_1 = -\gamma$$

$$R_e^{**} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} > 1 \rightarrow F_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot C_D$$

Donde γ es un factor de forma, que depende de la geometría. Para esferas se tiene que el factor de forma es $\gamma = 6\pi r \eta$.

Como:

$$R_e^{**} = \frac{\rho \cdot v \cdot D_i}{\eta} = \frac{\dot{m} \cdot D_i}{A_g \cdot \eta} = \frac{20 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,48 \text{ m}}{\pi \cdot (0,24 \text{ m})^2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 42,44131 \cdot 10^5$$

Se tiene que:

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot 0,775 \frac{kg}{m^3} \cdot \pi \cdot 0,24m^2 \cdot C_D \quad ; \quad F_1 = 0$$

Donde, según Liu (2003, p314), el coeficiente de arrastre para una HDL se tiene que:

$$C_d = \frac{4K_d^4}{(1 - K_d^2)^2}$$

Donde:

$$K_d = 1 - \frac{2\delta}{D_{HDL}} = 1 - \frac{2 \cdot 0,004826m}{0,48m} = 0,98$$

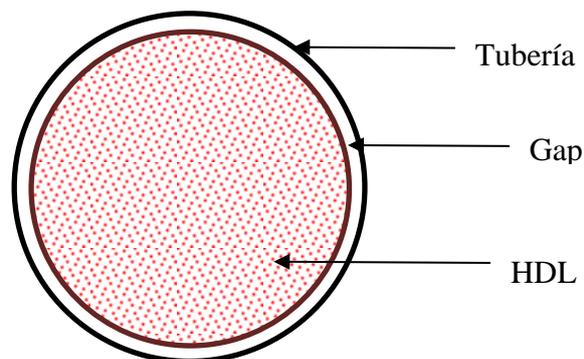
Por lo que:

$$C_d = \frac{4 \cdot 0,98^4}{(1 - 0,98^2)^2} = 2.327 \cdot 10^3$$

Por lo tanto se tiene que:

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot 0,775 \frac{kg}{m^3} \cdot \pi \cdot 0,24m^2 \cdot 2.327 \cdot 10^3 = 163,148 \frac{kg}{m}$$

Continuando con la memoria de cálculo, según el manual de usuario del software de simulación Olga, se tiene los siguientes coeficientes:



$$A_g = A_t - A_{HDL} = 0.181\text{m}^2 - 0.177\text{m}^2 = 3,62 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$$

$$C_p = \sqrt{2} \frac{A_g}{A_t} = \sqrt{2} \frac{3.62 \cdot 10^{-3}\text{m}^2}{0.181\text{m}^2} = 0,028 \rightarrow \text{Factor de Fuga (LeakageFactor)}$$

$$C_f = \frac{2}{C_p^2} = 2.498 \cdot 10^3 \rightarrow \text{Coeficiente de fuga (LeakCoeff)}$$

$$C_a = \frac{A_g}{A_t} = \frac{3.62 \cdot 10^{-3}\text{m}^2}{0.181\text{m}^2} = 0,02 \rightarrow \text{Coeficiente de apertura (Leakopening)}$$

Apéndice B- Cálculos del gap.

Para el cálculo de los gap se tomó una disminución porcentual del diámetro de los discos de la HDL a criterio de los investigadores.

Diámetro de la HDL = 0.48 [m]

Ejemplo: 0.0000914 es un 0.01 % de disminución del diámetro de la HDL, no hay que olvidar que una disminución en la HDL representa un aumento del gap, es decir, un aumento del intersticio que hay entre la HDL y la tubería.

Gap	%
0.0000914	0.01%
0.0004826	0.1%
0.0019304	0.4%
0.004826	1%
0.01447	3%

Apéndice C – Ángulos de inclinación de la tubería.

Ángulos de inclinación	
Distancia [m]	Ángulo
1928,57	-2,26
3857,14	-1,14
5690,47	2,48
7690,47	-0,57
9815,47	0,57
11648,80	-1,14
13482,14	-0,57
15607,14	4,34
18107,14	3,37
19773,80	-3,94
21440,47	6,27
22440,47	5,71
23440,47	1,71
25940,47	-6,84
27440,47	-2,26
29369,04	-0,28
30869,04	1,43
32069,04	3,37
33735,71	2,48
35735,71	1,14
37235,71	-2,26
39164,28	-1,14
40997,61	1,14
42497,61	0
44747,61	0
46997,61	0,28
47997,61	-2,26
49926,19	0,57
51759,52	-0,57
53884,52	-0,57
56009,52	-0,28
57509,52	0,57
59342,85	-3,94
61009,52	-3,94
62676,19	2,48
64676,19	-2,26
66604,76	3,37
68271,42	-2,26