

**DETERMINACIÓN DE CALIDAD Y FLUJO MÁSSICO DE VAPOR EN LA CARA
DE FORMACIÓN MEDIANTE EL USO DE CONFORMANCE EN FLUJO
CRÍTICO**

ELKIN FELIPE MORENO BARRAGÁN

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2020**

**DETERMINACIÓN DE CALIDAD Y FLUJO MÁSSICO DE VAPOR EN LA CARA
DE FORMACIÓN MEDIANTE EL USO DE CONFORMANCE EN FLUJO
CRÍTICO**

ELKIN FELIPE MORENO BARRAGÁN

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director
Héctor Arnoldo Rodríguez Prada
Ingeniero Mecánico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2020**

Nota de aceptación.

Ing. Jorge Luis Ramos Ramos

Bogotá D.C., Febrero 2020.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos:

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados:

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMÁN

Secretaria General:

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMÁN

Decano de la Facultad de Ingenierías:

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería de Petróleos:

Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente, no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento, estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Presento mis más sinceros agradecimientos a:

Mis padres, que con su esfuerzo y apoyo me dieron la oportunidad de crecer académicamente y personalmente.

Las directivas, cuerpo de docentes y demás funcionarios de la universidad de América, los cuales me brindaron en todo momento el apoyo y herramientas necesarias para la elaboración de este trabajo de grado.

A **Ecopetrol S.A.** Por brindarme la oportunidad de trabajar y realizar este proyecto de grado en conjunto y apoyo de tan excelentes profesionales.

Ing. Héctor Rodríguez, director, agradecimiento especial por su paciencia, asesoría, conocimiento y tiempo, dado que sin él este trabajo de grado no hubiera sido exitoso e innovador.

Ing. Patricia Delgado y Helmut Salazar, Co-directores, por el soporte técnico y conocimiento en procesos térmicos en Colombia.

Ing. Jorge Tovar, orientador, por su guía y colaboración, que con su criterio y críticas constructivas hicieron de este proyecto posible y excelente.

A todas aquellas personas, familiares, amigos y docentes que estuvieron presente en este proceso de formación académica y desarrollo de trabajo de grado.

DEDICATORIA

A Dios porque Él hace todo posible, Él me dio la sabiduría, la capacidad de entendimiento y tranquilidad para culminar con éxito este ciclo.

A mis padres, Martha B. y Héctor M, porque con su esfuerzo, apoyo y amor hicieron esto posible, este logro no es mío, sino de ellos.

“Yo solo tuve que estudiar”.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	19
INTRODUCCIÓN	21
1. MARCO TEORICO	24
1.1 RECUPERACIÓN TÉRMICA DE VAPOR	24
1.1.1 Inyección cíclica de vapor	24
1.1.2 Inyección continua de vapor	25
1.2 DIAGRAMA DE FASES DE CALOR LATENTE Y SENSIBLE	26
1.3 DIAGRAMA DE FASES TEMPERATURA VS VOLUMEN ESPECÍFICO	26
1.4 MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CALIDAD	27
1.4.1 Determinación de la calidad del vapor y la velocidad de flujo	27
1.4.1.1 Ecuación de flujo crítico	28
1.4.1.2 Ecuación de flujo subcrítico	28
1.4.1.3 Volumen específico de vapor	29
1.4.1.4 Método numérico para la solución de la función de la calidad	29
1.4.1.5 Función de iteración	30
1.4.1.6 Instrumentación y datos experimentales	30
1.4.2 Vapor a través de un estrangulador con tobera	33
2. METODOLOGÍA	36
2.1 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES	39
2.1.1 Plantilla de cálculos	36
2.1.2 Datos de entrada	39
2.1.3 Herramienta digital	40
2.2 FLUJO VOLUMÉTRICO INYECTADO	42
2.3 CALIDAD DE VAPOR EN CABEZAL	42
2.4 ILT	42
2.5 COMPLETAMIENTO	42
2.6 TABLAS DE VAPOR	44
2.7 ECUACIONES DE PROCESO EN CABEZAL	44
2.7.1 Flujo másico	44
2.7.2 Volumen específico de vapor	44
2.7.3 Flujo volumétrico de vapor	45
2.7.4 Velocidad de flujo	45
2.7.5 Velocidad relativa del Spinner	45
2.8 ECUACIONES DEL PROCESO EN TUBERÍA DE INYECCIÓN	46
2.8.1 Velocidad relativa del Spinner	46
2.8.2 Velocidad de flujo	47
2.8.3 Flujo volumétrico	47
2.8.4 Volumen específico de vapor	47
2.8.5 Calidad de vapor	47

2.9 ECUACIONES DEL PROCESO EN EL DISTRIBUIDOR DE FLUJO	48
2.9.1 Factor de corrección de flujo subcrítico	48
2.9.2 Flujo parametrizado	48
2.9.3 Flujo másico del distribuidor de flujo	48
2.9.4 Diferencial de masa	48
2.10 VALIDACIÓN	48
2.10.1 Conservación de la materia	49
2.10.2 Conservación de la energía	49
2.10.3 Equilibrio líquido – vapor	50
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	51
3.1 FACTOR DE CORRECCIÓN DE FLUJO SUBCRÍTICO	51
3.2 FLUJO PARAMETRIZADO	52
3.3 PLANTILLA DE CÁLCULOS	52
3.3.1 Tablas de vapor	52
3.3.2 Hoja de cálculos	53
3.3.3 Parámetros de inicialización	54
3.4 HERRAMIENTA DIGITAL	55
3.5 PERFIL DE CALIDAD	58
3.6 PERFIL DE DENSIDAD	59
3.7 CALIDAD Y FLUJO MÁSIKO EN CARA DE FORMACIÓN	60
3.8 IDENTIFICACIÓN DE FLUIDOS EN MOVIMIENTO	64
3.9 COMPORTAMIENTO DE CALIDAD	66
4. CONCLUSIONES	67
5. RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	71

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de Inyección cíclica de vapor	25
Figura 2. Proceso de inyección continua de vapor	25
Figura 3. Diagrama de fases de calor latente y calor sensible Vs Volumen específico de agua.	26
Figura 4. Diagrama de fases temperatura vs volumen específico	26
Figura 5. Sistema de medición de calidad de vapor placa de orificio- válvula choke	27
Figura 6. Experimentación Naiper Vs Calidad de vapor	31
Figura 7. Relación de volumen específico experimental Vs Calidad de vapor	31
Figura 8. Calidad y flujo másico calculados vs experimentales	32
Figura 9. Relación de presión de garganta vs calidad de vapor	33
Figura 10. Válvula estranguladora con inserción cónica	33
Figura 11. Relación de regímenes de flujo en función de la longitud de garganta	34
Figura 12. Programación de plantilla de Excel para el cálculo de calidades y flujos másicos de vapor en flujo crítico-Pate Uno	37
Figura 13. Diagrama de flujo de plantilla de Excel para cálculo de calidades y flujos másicos de vapor-Parte dos	38
Figura 14. Hoja de cálculos	39
Figura 15. Diagrama de flujo de la carga de datos en la herramienta digital	41
Figura 16 Relación en función del aumento de Viscosidad	57
Figura 17 Tablas de vapor	57
Figura 18 Hoja de cálculo-Primera parte	57
Figura 19 Hoja de cálculo-Segunda parte	57
Figura 20 Hoja de cálculo-Tercera parte	57
Figura 21 Herramienta digital parte uno	57
Figura 22 Herramienta digital parte dos	57
Figura 23 Visualizador Power BI Fuente: Elaboración propia	57

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros experimentales para la determinación de propiedades de vapor. metodología 1995	30
Tabla 2. Palabras clave de completamiento	40
Tabla 3. Instrumentación del completamiento	43
Tabla 4. Distribuidores de flujo en cada sesión selectiva	44
Tabla 5. Parámetros de inicialización	55
Tabla 6. Presión y Temperatura en el cabezal de inyección	55
Tabla 7. Distribución de propiedades por corrida	61
Tabla 8. Calidad y flujo másico en cara de formación	62
Tabla 9. Balance de Energía	63

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Flujo másico de vapor Naipero modificada por King Y Crocker	28
Ecuación 2. Flujo másico a través de una placa de orificio	28
Ecuación 3. Volumen específico	29
Ecuación 4. Calidad de vapor en función de la presión	29
Ecuación 5. Constante de uniformidad de calidad	29
Ecuación 6. Función a iterar y primera derivada de la función a iterar	30
Ecuación 7. Método de Newton Raphson para iteración de calidad	30
Ecuación 8. Volumen específico experimental	32
Ecuación 9. Flujo másico en condiciones críticas Griston	35
Ecuación 10. Calidad de vapor	42
Ecuación 11. Flujo másico	44
Ecuación 12. Volumen específico de vapor	45
Ecuación 13. Flujo volumétrico de vapor	45
Ecuación 14. Velocidad de flujo	45
Ecuación 15. Velocidad relativa de spinner	45
Ecuación 16. Constante de spinner	46
Ecuación 17. Velocidad de spinner	47
Ecuación 18. Velocidad de flujo en función de velocidades de spinner y velocidad de registro	47
Ecuación 19. Flujo volumétrico de vapor	47
Ecuación 20. Volumen específico de vapor	47
Ecuación 21. Calidad de vapor en función	47
Ecuación 22. Flujo crítico	48
Ecuación 23. Flujo másico a través del distribuidor	48
Ecuación 24. Control de masa después de cada distribuidor	48
Ecuación 25. Conservación de la masa	49
Ecuación 26. Balance de energía para sistema cabezal-formación	49
Ecuación 27. Calor inyectado por arena	49

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Factor de corrección Vs Pd/Pu	Error!
Bookmark not defined.	
Gráfica 2. Flujo crítico	52
Gráfica 3. Perfil de calidad 2018	58
Gráfica 4. Perfil de calidad 2016	58
Gráfica 5. Perfil de densidad 2016	59
Gráfica 6. Perfil de densidad 2018	59
Gráfica 7. Calor latente-Calor Total y flujo másico Vs Calidad	62
Gráfica 8. RPS y Diámetros de instrumentación versus Profundidad	64
Gráfica 9. Calidad de vapor y densidad Versus Profundidad	65
Gráfica 10. Perfil de temperatura y Presión Versus Profundidad	65
Gráfica 11. Calidad e instrumentación versus Profundidad	66

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

a	Constante de regresión en flujo crítico
b	Constante de regresión en flujo crítico
A	Constante para la determinación de volumen específico
A_{tr}	Área transversal, ft ²
B	Constante para la determinación de volumen específico
C_n	Constantes experimentales
C_o	Coefficiente de placa de orificio
CCL	Registro de localización de collares de tubería
Cte_{SPNd}	Constante de spinner, ft seg/ min
d	Diámetro de instrumentación, in
d_c	Diámetro de garganta del distribuidor en flujo crítico, in
d_o	Diámetro de interno de una placa de orificio, in
$F(X)$	Función de calidad X
$F(X_n)$	Función de calidad X n veces
$F'(X)$	Derivada de la función calidad X
$F'(X_n)$	Derivada de la función calidad X n veces
F_a	Coefficiente de expansión térmica de una placa de orificio
H	Entalpia total o Calor Btu/día
h_f	Entalpia fase líquida Btu/lbm
h_v	Entalpia fase gaseosa Btu/lbm
ILT	Registro de inyección
K	Función en parámetros de la placa de orificio
l_c	Longitud de la garganta del distribuidor, in
M	Flujo másico lbm/s
M_n	Flujo másico en n sesiones de distribución lbm/s
P	Presión en estado sub-crítico, Psi
P_d	Presión antes de entrar al distribuidor de flujo, Psi
P_t	Presión en distribuidor de flujo, Psi
P_u	Presión después de atravesar el distribuidor de flujo, Psi
Q_{inj}	Flujo volumétrico equivalente de masa de agua, bls/día
Q_v	Flujo volumétrico en una sección determinada, ft ³ /s
RPS	Revoluciones por segundo
V_F	Velocidad de flujo, ft/min
V_{SPN}	Velocidad del spinner, ft/min
V_R	Velocidad del registro flujo, ft/min
v_{exp}	Volumen específico a través de una placa de orificio, ft ³ /lbm
v_f	Volumen específico del agua saturada, ft ³ /lbm
v_g	Volumen específico de gas, ft ³ /lbm
v_v	Volumen específico del vapor, ft ³ /lbm
w	Flujo másico, lbm/hr
X	Calidad de vapor, fracción o porcentual

X_n	Calidad iterada n veces, fracción o porcentual
X_{n+1}	Calidad iterada (n+1) veces, fracción o porcentual
Y_2	Coeficiente de expansión acorde para el tamaño de orificio
β	Relación entre diámetro de orificio y diámetro de tubería
ϕ	Diferencial de presión a través de del orificio, Psi
ρ	Densidad, lbm/ft ³
ρ_d	Densidad a la entrada del distribuidor de flujo, lbm/ft ³
ρ_{st}	Densidad de agua saturada a condiciones estándar, lbm/ft ³

GLOSARIO

CALIDAD: fracción de masa de vapor la cual relaciona la masa de vapor entre la masa total. La calidad tiene valores entre 0 (líquido saturado) y 1 (vapor saturado), pero no tiene significado en las siguientes regiones de líquido comprimido o vapor sobrecalentado.

CALOR ESPECÍFICO: propiedad intensiva que determina el calor requerido por unidad de masa para aumentar en una unidad su temperatura; está expresada en unidades de energía-masa por unidad de temperatura (Btu Lbm/°F).

CALOR LATENTE: cantidad de energía en forma de calor liberado o absorbido por una sustancia durante un cambio de fase. En la recuperación térmica, el calor latente hace referencia al calor liberado durante el paso de la fase líquida a la su fase vapor a una temperatura constante.

CALOR SENSIBLE: cantidad de energía en forma de calor liberado o absorbido por una sustancia durante un intercambio de calor, que se da de una fase de mayor temperatura a una de menor; está en función de la masa, calor específico la sustancia y el diferencial de temperatura.

CAPACIDAD CALORÍFICA: propiedad termodinámica que determina el calor requerido de una sustancia para aumentar en una unidad su temperatura; está expresada en unidades de energía por unidad de temperatura (Btu/°F) .

CONDUCCIÓN: transferencia de energía en forma de calor de una zona de mayor temperatura a una de menor temperatura por medio del contacto directo de dos superficies de cuerpo.

CONVECCIÓN: transferencia de energía en forma de calor de una zona de mayor temperatura a una de menor temperatura entre fluidos y el área superficial de un sólido.

CONFORMANCE MECÁNICO: entiéndase a conformance mecánico a todas las herramientas que influyen en la distribución de flujo en el sistema completamiento – formación.

CROSSOVER: sección corta de tubería que permite establecer conexión entre dos componentes con diferente tipo o tamaño de rosca¹.

¹ Glosario virtual de Schlumberger,2019.[consulta 7 de agosto 2019].Disponible en <www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/c/crossover.aspx>

EMPAQUE/PACKER: herramienta de fondo que permite aislar el espacio anular del conducto de producción o inyección; permitiendo tener un mejor control de producción, inyección o tratamiento².

ENERGÍA CINÉTICA: energía de una sustancia atribuida al movimiento del mismo. La contribución de la energía cinética en los procesos de recuperación térmica, están relacionados con la velocidad del fluido a lo largo de la tubería de inyección, buscando tener un mayor aporte en las zonas de interés, mediante la variación de la instrumentación del proceso para obtener el mayor balance energético en el reservorio.

ENERGÍA INTERNA: representación de la energía total del sistema a nivel microscópico, tenido la misma representación de energía potencial y cinética, pero a nivel atómico de cada sustancia. Esta está referenciada a la temperatura del sistema³.

ENERGÍA POTENCIAL: capacidad cuerpo para realizar trabajo en función de la masa del mismo, teniendo en cuenta su posición axial y la gravedad. El aporte de la energía potencial en un sistema de recuperación térmica es pequeño, por lo cual se hace despreciable, exceptuando cuando los cambios de altitudes son altos.

ENERGÍA TOTAL: representa la energía real en un sistema, la cual está dada como la sumatoria de la energía cinética y potencial.

ENTALPIA: la entalpia es la medida de energía total en un sistema equivalente a la sumatoria de la energía interna más el producto de una presión constante y el volumen del sistema.

LANDING JOINT: tubería de producción e inyección con bajos coeficientes de transferencia de calor.

LANDING NIPPLE: herramienta corta de forma tubular que permite dar sello y bloqueo, generalmente utilizado en terminaciones que permiten la instalación de controladores de flujo⁴.

LAS: extensión de lectura de un archivo que guarda información propia de la corrida de una herramienta.

² Ibíd. < www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/i/injection_mandrel.aspx>

³ UNED. Energía y Desarrollo tecnológico. Disponible en www2.uned.es/biblioteca/eneriarenivable3/energia.htm

⁴ Glosario virtual de Schlumberger, 2019. [consulta 7 de agosto 2019]. Disponible en <www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/l/landing_nipple.aspx>

MANDRIL DE INYECCIÓN: herramienta de fondo que permite la inyección de fluidos mediante un sistema de orificios y válvulas⁵.

PLUG BACK: herramienta de fondo de pozo cuyo fin principal es aislar en forma de tapón la zona inferior del sistema de tubería del pozo⁶.

PRESIÓN DE SATURACIÓN: presión a la cual ocurre el equilibrio dinámico de fases líquido-gas de una sustancia en un proceso isotérmico.

PUNTO CRÍTICO: punto de presión y temperatura donde la fase líquida y de vapor tienen el mismo comportamiento de propiedades, masa, volumen y densidad.

PUP JOINT: sección de tubería- tubing de con diferentes especificaciones a la mayor proporción del tubing joint.

REGISTRO DE LOCALIZACIÓN DE COLLARES DE TUBERÍA: casing Collar Locación (CCL), herramienta que permite correlacionar profundidades mediante la identificación de anomalías magnéticas causada principalmente por la masa abundante del collar del revestimiento⁷.

REVOLUCIONES POR SEGUNDO: medida de frecuencia, indicando el número de rotaciones completas por cada segundo por un cuerpo que gira alrededor.

TEMPERATURA DE SATURACIÓN: temperatura a la cual ocurre el equilibrio de fases de una sustancia en proceso isobárico.

TUBING HANGER. sección fija de tubería en el cabezal de producción e inyección para sustentar la sarta de producción o inyección.

TUBING JOINT: tubería de mayor proporción a lo largo de un completamiento, la cual proporciona producción o permite la inyección de fluidos.

VOLUMEN ESPECIFICO: volumen que ocupa una sustancia por unidad de masa. En el caso vapor se tiene un volumen específico de líquido (V_f) y otro para la fase vapor (V_g); correspondientes al volumen que ocupa cada fase por unidad de masa.

⁵ Ibid. Disponible en <[www.glossary.oilfield.slb.com /es/Terms/i/injection_mandrel.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/i/injection_mandrel.aspx)>

⁶ Ibid. Disponible en <[www.glossary.oilfield.slb.com /en/Terms/b/bridge_plug.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bridge_plug.aspx)>

⁷ Ibid. Disponible en <[www.glossary.oilfield.slb.com /es/Terms/c/casing_collar_locator_ccl.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/casing_collar_locator_ccl.aspx)>

RESUMEN

Los procesos térmicos suministran energía en forma de calor al yacimiento, entre ellos están, la inyección de vapor, la combustión en situ y la inyección de agua caliente. El calor recibido por el yacimiento en los procesos de inyección de vapor, ha sido siempre considerado como una incertidumbre, dado que este va depender de las propiedades del vapor y de las pérdidas de calor a través del completamiento. Al determinarse las propiedades, calidad y flujo másico justo antes de entrar en la formación, se reduce la incertidumbre de calor suministrado que hay entre la tubería de inyección y anular. Se propone y desarrolla una metodología, la cual, mediante la información de completamiento, registros de inyección y tablas de vapor, se determina densidad, flujo másico y calidad de vapor a lo largo de la sección del pozo. Esta metodología está basada en experimentaciones realizadas en facilidades de superficie, las cuales mediante la reducción de diámetros de placas de orificio y válvulas choque, generaban un flujo en estado crítico. Para agilizar la determinación de propiedades, se automatiza la metodología propuesta, inicialmente se planteó en una plantilla en Excel y posteriormente se combinó con el lenguaje de programación Visual Basic. Al evaluarse el método a condiciones de pozo, se determinaron perfiles de calidad de vapor, perfiles de densidad y energía suministrada en cada arena para dos completamientos a diferentes fechas. Se observaron pérdidas considerables de energía, siendo estas aproximadas a 127MMBTUD, atribuidas en su gran mayoría al completamiento. Se concluye que el calor inyectado tiene una dependencia mayor al flujo másico que a la calidad del vapor.

Palabras Clave: Calidad, Calor latente, Flujo másico, Flujo crítico, Software.

ABSTRACT

The thermal processes supply energy in the form of heat to the reservoir, among them are steam injection, combustion in situ and hot water injection. The heat received by the reservoir in the steam injection processes has always been considered as an uncertainty, since this is dependent on the properties of the steam and the heat losses through the completion. By determining the properties, quality and mass flow just before entering the formation, the uncertainty of heat supplied between the injection and annular piping is reduced. A methodology is proposed and developed, the quality, through completion information, injection records and steam tables, density, mass flow and steam quality are determined throughout the well session. This methodology is based on experiments carried out on surface facilities, which by reducing the diameter of orifice plates and shock valves, generated a flow in a critical state. To expedite the definition of properties, the proposed methodology is mechanized, it was proposed to present in a template in Excel and later it was combined with the Visual Basic programming language. When evaluating the method at well conditions, steam quality profiles, density profiles and energy supplied in each sand are determined. Considerable losses of energy were observed, these being approximately 127MMBTUD, mostly attributed to completion. It is concluded that the heat injected has a greater dependence on mass flow than on steam quality.

Keywords: Quality, latent heat, mass flow, critical flow, Software.

INTRODUCCIÓN

Kern River, es un campo maduro descubierto a mediados de los años 1899 ubicados en California, en Bakersfield, se ha convertido en uno de los pioneros en recuperación térmica, inyectando vapor desde los años 60 alcanzando factores de recobro considerablemente altos, alrededor de un 80% con recuperación terciaria térmica⁸. En comparación con Colombia, que es nuevo en estos procesos de recuperación térmica.

Colombia actualmente cuenta con un factor de recobro del 19% en promedio, comprendidos por recuperación primaria, secundaria y unos pocos pilotos de recuperaciones terciaria (Vapor, WAG, CO₂), siendo el factor de recobro promedio a nivel mundial del 35%⁹. Con la crisis petrolera del año 2014, se detuvo la exploración de nuevos prospectos, por lo cual se vio la necesidad de apostarle a la explotación de los recursos disponibles buscando formas de maximizar el factor de recobro.

Los campos del Valle Medio del Magdalena (Nare Sur, Teca, Velásquez, Palagua, Jazmín, Girasol, Abarco, Under-river, Moriche) cuentan con un crudo pesado entre 10-18 °API, presentan intercalaciones de arcillas y heterogeneidad vertical de arenas haciendo necesario diferentes tasas de inyección de vapor, proporcionales a la transmisibilidad¹⁰, de cada uno de los horizontes, para la recuperación adecuada del aceite remanente.

Los balances de energía para estos procesos de inyección de calor, parte por un balance general de transferencia de masa y calor a través de la sección de tubería de inyección; sin embargo, estos balances no tienen en cuenta el paso de flujo de la tubería, anular, casing y cemento, suponiendo que las propiedades del vapor en la tubería serían similares a las entregadas en cara de cada formación.

Los modelos a tener en cuenta se basan en el comportamiento del vapor a través de placas de orificio y toberas en flujo crítico a condiciones de superficie; sin embargo, en condiciones de fondo se cuenta con un completamiento selectivo, el cual puede ser asociado a estos modelos de flujo cuando se realiza la inyección selectiva, o conformance, en cada arena.

⁸ NELDER, Chris. Heavy Oil Of The Kern River Oil Field.24 de junio 2011.

⁹ MONTEROSA, Heidy. Punto adicional de factor de recobro agregaría 500 millones de barriles.En:La Republica.3 de octubre 2018

¹⁰ HOYOS ERDOMO, Ruben Dario, Ardila Cubillos Lexly, Munoz NavarroS Samuel, Rincon Canas Fernando, Maria Monica, Palma Jorge Mario,Naranjo Suarez Carlos Eduardo, Evaluation of Different Strategies for Selective Steam Injection in Stratified Heavy-Oil Reservoirs,26 septiembre 2016,Pag.2

La inyección de vapor tiene como objetivo principal la reducción de la viscosidad y la tensión interfacial, aumentando la temperatura de la roca y fluidos en el yacimiento facilitando el desplazamiento del hidrocarburo en fase líquida a través del medio poroso. Para ello se deben evaluar ciertos criterios como lo es la profundidad de la zona de interés, saturación de aceite residual, permeabilidad y porosidad entre otros.

Las pérdidas de calor a través del sistema de tuberías tienen un gran impacto en la recuperación térmica, disminuyendo la energía a aportar en la formación, cuya consecuencia se ve reflejada en factores de recobro bajos y anti económicos. La incertidumbre en estos procesos es la determinación de que tanta energía requiere el yacimiento, y que tanta energía se le está proporcionando, dado que esta dependerá del flujo másico y calidad del vapor en cada arena donde se está inyectando vapor.

Comúnmente, los porcentajes de distribución volumétrica obtenidos a partir de ILT's, son interpretados como contribución energética, debido a que no hay un mecanismo de cuantificación de energía distribuida en cada unidad, determinar la calidad y el flujo másico de vapor, ayudara a la estimación de ella, obteniendo mejores ajustes en factores de recobro y permitiendo realizar mejores proyecciones respecto de lo que se inyecta versus lo que se produce.

Generar un modelo que determine los flujos másicos y las calidades en cada subunidad de interés, y que a su vez pueda ser aplicable a cualquier tipo de completamiento selectivo, dará la posibilidad de evaluar el desarrollo proyectos futuros en procesos de inyección de vapor.

El modelo propuesto permitirá determinar las calidades y flujo másico de vapor en la tubería de inyección y distribuidores de flujo de cada formación; se espera reducir la incertidumbre de calidad y flujo másico de vapor, permitiendo tener una mejor identificación de energía en forma de calor proporcionada al yacimiento. Se espera que el comportamiento de calidades tenga un carácter decreciente a medida que pasa por cada distribuidor de flujo y que el flujo másico sea dependiente del diseño del mismo cuando se tiene un régimen en flujo crítico e independiente a la presión de cada arena a inyectar vapor.

El objetivo general al cual se pretendió llegar en este proyecto es determinar la calidad y el flujo másico de vapor en la cara de formación mediante el uso de conformance en flujo crítico, basándose en la modificación y adaptación de modelos en superficie. Los objetivos específicos en el presente trabajo fueron:

- Describir las generalidades del proceso de inyección de vapor y sus propiedades fisicoquímicas.
- Describir los modelos para la determinación de la calidad y flujo másico en la inyección de vapor de agua.
- Proponer una metodología para la determinación de las calidades y los flujos másicos de vapor de agua inyectado mediante el uso de equipos para conformance mecánico.
- Generar una herramienta digital que permita la determinación de las calidades y flujos másicos para cualquier tipo de completamiento selectivo.
- Comparar los perfiles de densidad, calidad, flujo másico del vapor, así como, el calor inyectado en cada distribuidor de flujo, a partir de registros de presión, temperatura e ILT, estimados en diferentes fechas de toma.

El modelo a proponer permitirá determinar las calidades y flujo másico del vapor de agua, en la tubería de inyección y los distribuidores de flujo en la cara de formación. En un pozo inyector de vapor, se espera reducir la incertidumbre en la determinación de calidad y flujo másico de vapor, las cuales determinaran la energía real que se proporcionada al yacimiento.

Se espera que el comportamiento de calidades tenga un carácter decreciente a medida que pasa por cada distribuidor de flujo y que el flujo másico sea dependiente del diseño del mismo cuando se tiene un régimen en flujo crítico e independiente a la presión de cada arena a inyectar vapor.

1. MARCO TEORICO

Este capítulo presenta una introducción a los procesos de inyección de vapor, describiendo de manera general los principales mecanismos en los cuales el vapor es inyectado. El vapor de agua está constituido por dos fases, una fase líquida y una fase gaseosa, las proporciones de estas fases son dependientes de la presión y temperatura, al igual que sus propiedades. Se describen los diagramas de fases en función de temperatura-volumen específico y Calor latente-Calor sensibles, los permitirán identificar proporcionalidad de fases y la energía que tiene el fluido.

1.1 RECUPERACIÓN TÉRMICA DE VAPOR

Aunque el yacimiento es el responsable de proporcionar la energía para el desplazamiento de los fluidos a través de los poros, no siempre es suficiente para lograr el desplazamiento total de hidrocarburos, especialmente para aquellos con gravedades API <20°, debido a su tendencia tener altas viscosidades¹¹.

La inyección vapor es un proceso de recobro térmico, el cual permite suministrara al yacimiento calor, reduciendo, la viscosidad y saturación residual de aceite principalmente, facilitando un desplazamiento de fluidos más eficiente¹².

Una vez que el vapor entra en el yacimiento, se generan diferentes zonas, que van en función de, la temperatura, distancia entre los pozos y las características de los fluidos. Ellas son: zona de vapor, zona caliente de condensados, zona intermedia de agua caliente-fría y la zona inicial donde se encuentra el hidrocarburo.

Los mecanismos en cada zona son dependientes de la saturación de aceite y del completamiento del pozo inyector¹³; los principales mecanismos evidenciados en estos procesos térmicos son: reducción de viscosidad, destilación de vapor, impulsión de vapor, expansión térmica, segregación gravitacional, variación de presión capilar, liberación del gas en solución y rompimiento de emulsiones directas e inversas.

1.1.1 Inyección cíclica de vapor. Es un proceso de recobro térmico que consiste en una inyección en ciclos del vapor, donde el pozo inyector y el productor es el mismo. También es considerado como una estimulación térmica.

La inyección vapor y producción de hidrocarburos es realizada a través del mismo pozo; inyectando inicialmente el vapor, cerrando el pozo por varios días y

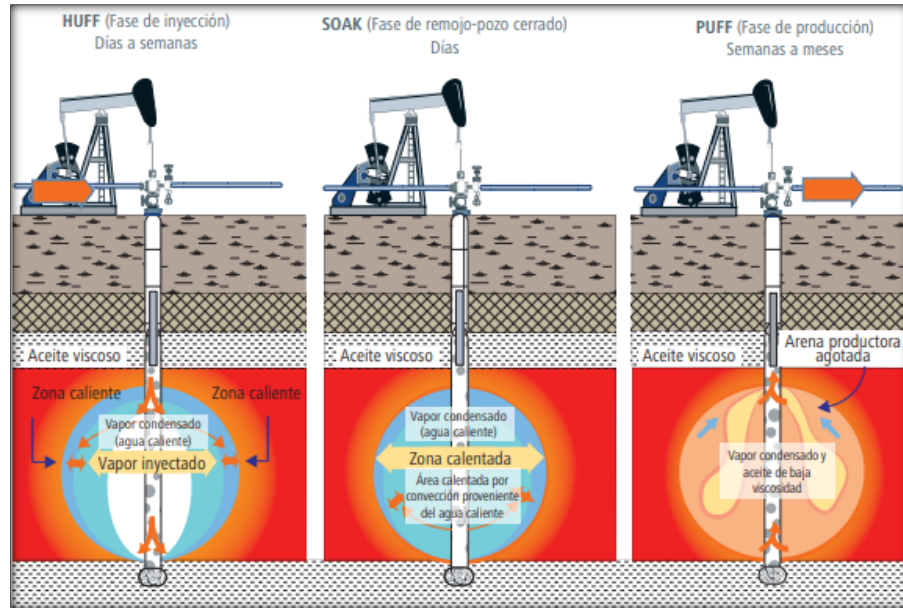
¹¹ PARTHA S. Sarathi, David K. Olsen. Partical aspects of Steam Injection Processes a Handbook for Independent Operators, Bartlesville, Octubre 1992. Pag.3

¹² Ibíd.p,5

¹³Ibíd.p. 8

posteriormente abriéndolo para iniciar su producción **Figura 1**. En este proceso la eficiencia depende de la energía propia del yacimiento¹⁴.

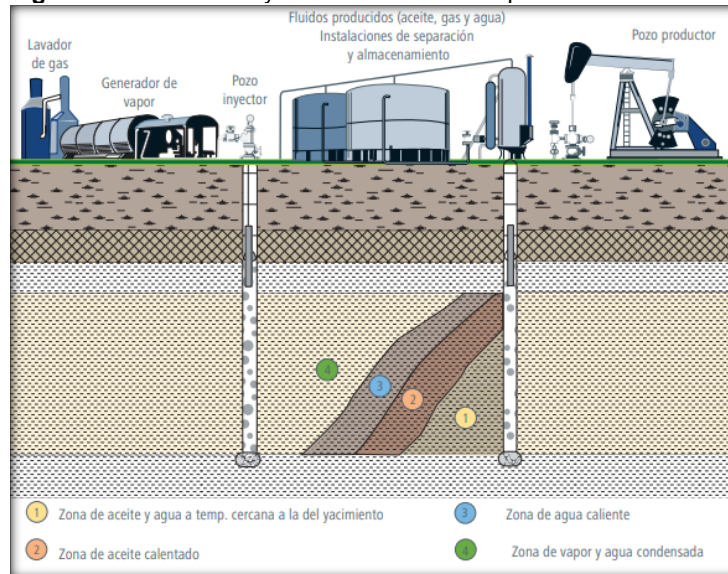
Figura 1. Proceso de Inyección cíclica de vapor



Fuente: El futuro de la producción de aceite en Mexico: Recuperación avanzada y mejorada IOR-EOR,p.94.

1.1.2 Inyección continua de vapor. Método de recobro térmico donde se tiene un arreglo de pozos inyector de vapor y productores de fluidos. Este proceso consta de 4 zonas dentro del yacimiento como se observa **Figura 2**.

Figura 2. Proceso de inyección continua de vapor



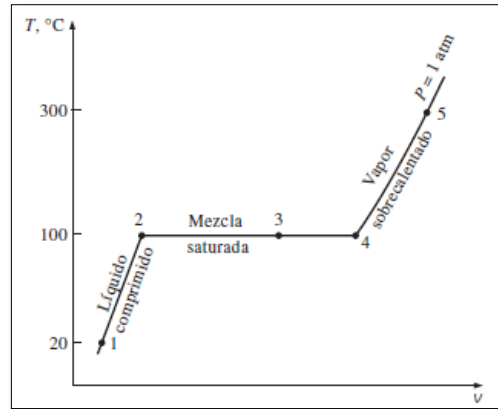
Fuente: El futuro de la producción de aceite en Mexico: Recuperación avanzada y mejorada IOR-EOR,p.93.

¹⁴ *Ibíd.*p.15

1.2 DIAGRAMA DE FASES DE CALOR LATENTE Y SENSIBLE

La **Figura 3** representa el cambio de fases del agua en función de temperatura y volumen específico a presión constante. La zona 2-4 representa el equilibrio líquido-vapor, donde, va estar variando el calor latente en función de la calidad del vapor y flujo másico.

Figura 3. Diagrama de fases de calor latente y calor sensible Vs Volumen específico de agua.

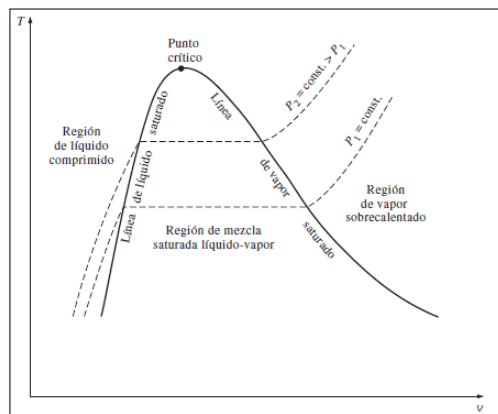


Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica 7th, p.119.

1.3 DIAGRAMA DE FASES TEMPERATURA VS VOLUMEN ESPECÍFICO

Diagrama que representa el comportamiento de un fluido en su estado líquido saturado, líquido-vapor y vapor saturado (ver **Figura 4**). Dentro del domo se encuentra la zona de interés representada por isothermas a presión constante donde varía la calidad según los volúmenes específicos.

Figura 4. Diagrama de fases temperatura vs volumen específico



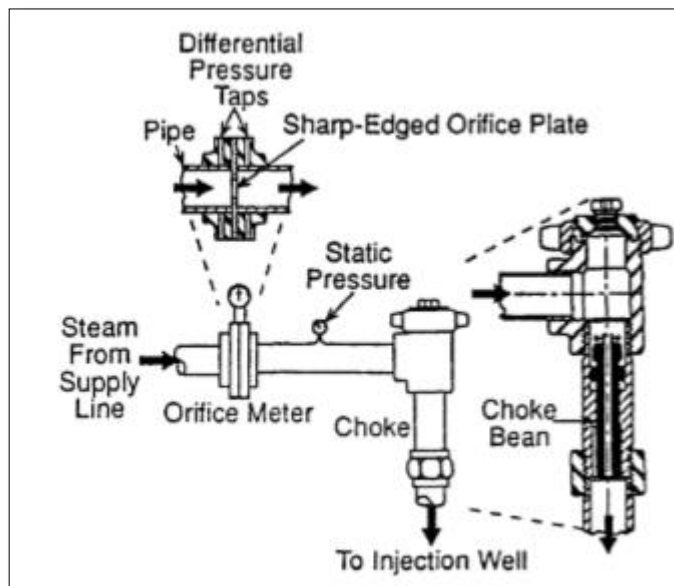
Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica 7th, p.121.

1.4 MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CALIDAD

El principio de los modelos a describir parte de la misma sinopsis de someter el fluido en estado de vapor a condiciones de flujo crítico, donde las velocidades del flujo alcanzan valores de la velocidad del sonido a las condiciones de presión y temperatura presentes.

1.4.1 Determinación de la calidad del vapor y la velocidad de flujo, utilizando datos de presión de un medidor de orificio y un medidor de flujo crítico. Metodología desarrollada en el año 1995, inicialmente con el fin de medir flujo en facilidades de superficie y controlar presiones de línea. Esta consiste en hacer fluir vapor a través de una placa de orificio, medidor de flujo sub crítico, en serie con un medidor de flujo crítico¹⁵(ver **Figura 5**) . Describe que el medidor de flujo crítico puede ser un tubo Venturi, una tobera o un estrangulador estático debido a que presentan una relación de presiones iguales entre la entrada y la garganta del instrumento.

Figura 5. Sistema de medición de calidad de vapor placa de orificio- válvula choke



Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco -Inc) 199,p.2

El desarrollo del presente método comenzó en 1961. El sistema de medición consiste en una placa de orificio estándar situadas aguas arriba de un dispositivo

¹⁵ L.G.James. Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco -Inc).p.2

de flujo crítico y utiliza mediciones de presión diferencial y estática para calcular tanto la calidad del vapor como el caudal¹⁶.

Las ecuaciones de flujo de vapor para el flujo del orificio y para el flujo crítico se establecieron con constantes derivadas empíricamente. Estas dos ecuaciones se combinaron y resolvieron para determinar la calidad del vapor y el caudal

1.4.1.1 Ecuación de flujo crítico. Para la válvula choke u otro dispositivo en flujo crítico se tiene como ventaja que el flujo va permanecer constante independientemente del cambio de presión aguas abajo del estrangulador. La **Ecuación 1** fue utilizada en este modelo para la determinación de flujo masico aguas abajo¹⁷.

Ecuación 1. Flujo másico de vapor Naipero modificada por King Y Crocker

$$w = a \frac{d_c^2 P}{\left(\frac{X}{100}\right)^b}$$

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc) 1995,p.1.

Donde w es el flujo de vapor, d_c el diámetro de la garganta del medidor de flujo, P la presión de entrada y X la calidad del vapor. La determinación de a y b fueron establecidas experimentalmente, mediante la calibración de la válvula, teniendo en cuenta el régimen de flujo y rango de presión del instrumento.

1.4.1.2 Ecuación de flujo subcrítico. El flujo subcrítico está representado mediante el flujo que pasa a través de la placa de orificio de la siguiente manera¹⁸.

Ecuación 2. Flujo másico a través de una placa de orificio

$$w = 1888,56 C_o F_a Y_2 \frac{d_o}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{\Phi}{v_{exp}}}$$

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc) 1995,p.1.

Donde d_o es el diámetro del orificio, β es la relación del diámetro de orificio /diámetro de la tubería, Φ es la caída de presión en el orificio, v_{exp} es el volumen específico de vapor de las dos fases que pasa a través del orificio, C_o es le coeficiente de descarga, F_a Coeficiente de expansión térmica, y Y₂ coeficiente de expansión de vapor. Los coeficientes son determinados con índices de Millers¹⁹.

¹⁶ Ibid.p.1

¹⁷ Ibid.p.2

¹⁸ Ibid.p.2

¹⁹ Miller, R. W.: "Flow Measurement Engineering Handbook," McGrawHill, New York City (1983).

1.4.1.3 Volumen específico de vapor. El volumen específico de vapor fue determinado por medio de la **Ecuación 3**:

Ecuación 3. Volumen específico

$$v_{exp} = A (v_g) \left(\frac{X}{100} \right)^B + v_f$$

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc) 1995,p.2.

Donde X es la calidad de vapor, v_{fg} es el volumen específico de vaporización, v_f es el volumen específico del líquido saturado, A y B son constantes determinados por el método propuesto por James²⁰, establecidos para un rango de presión de vapor y régimen de flujo.

1.4.1.4 Método numérico para la solución de la función de la calidad. El método numérico utilizado para el sistema de ecuaciones para obtener la calidad fue Newton Raphson, uniendo las funciones de flujo de vapor crítico, subcrítico y volumen específico, se obtiene la **Ecuación 4**:

Ecuación 4. Calidad de vapor en función de la presión

$$\left(\frac{X}{100} \right)^B - \frac{K \Phi \left(\frac{X}{100} \right)^{2b}}{A P^2 v_g a^2} + \frac{v_f}{v_g A} = 0$$

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc) 1995,p.2.

Donde K es,

Ecuación 5. Constante de uniformidad de calidad

$$K = \frac{(1888,56 C_o F_a Y_2)^2}{1 - \beta^4} \left(\frac{d_o}{d_c} \right)^4$$

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc) 1995, p. 2.

La única información requerida para la determinación de calidad mediante esta metodología vendría siendo la caída de presión a través de la placa de orificio y la presión estática entre el orificio y el estrangulador. Las constantes A, B, a y b únicamente pueden determinarse mediante la experimentación, teniendo en cuenta rangos de presión y regímenes de flujo relativamente bajos y constantes.

²⁰ R.James.. : "Metering of Steam-Water Two-Phase Flow by Sharp Edged Orifices," Proc., Inst. Mech. Eng., (1965) 180, pt. I, n. 23, 549-566.

1.4.1.5 Función de iteración. Para determinar los valores de calidad para cada presión y caídas de presión medidas, se utiliza iteración numérica de la de la función calidad y su derivada (ver **Ecuación 6**).

Ecuación 6. Función a iterar y primera derivada de la función a iterar

$F(X) = (X)^B - \frac{K \Phi (X)^{2b}}{A P^2 v_{fg} a^2} + \frac{v_f}{v_{fg} A}$	$F'(X) = B(X)^{B-1} - 2b \frac{K \Phi (X)^{2b-1}}{A P^2 v_{fg} a^2}$
--	--

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc) 1995, p.2.

Conociendo la función calidad y su derivada mediante el método de Newton Raphson se determina dicha propiedad (ver **Ecuación 7**).

Ecuación 7. Método de Newton Raphson para iteración de calidad

$\frac{X_{n+1}}{100} = \frac{X_n}{100} - \frac{F(X_n)}{F'(X_n)}$
--

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc) 1995, p.2.

De esta forma el caudal no es necesario para determinar la calidad, siendo este calculable mediante las ecuaciones de flujo de vapor de la placa de orificio o la válvula choke. La calidad tiene a converger en la quinta iteración con error promedio de 0,1%²¹.

1.4.1.6 Instrumentación y datos experimentales. En la **Tabla 1** se presentan las características de tubería de superficie, medidores de flujo critico- subcrítico y las condiciones operacionales para el sistema.

Tabla 1. Parámetros experimentales para la determinación de propiedades de vapor. metodología 1995

Tubería	Medidor de flujo subcrítico	Medidor de flujo critico					Rango de presión PSIG	Rango de calidad	Flujo de vapor lbm/hr	
		Choke		Venturi						
OD (in)	ID (in)	Placa de orificio	Tamaño aguja (in)	Longitud (in)	Tamaño de garganta (in)	Longitud de garganta (in)	Ángulo de cono			
2	1,94	1-1,25	0,3125	6	0,3125	3-15	3 -15 °	400-800	19%-95%	2.000-15.000
			0,375	6	0,375	3-15	3 -15 °			
			0,4375	6	0,5	3-15	3 -15 °			
			0,5	6						

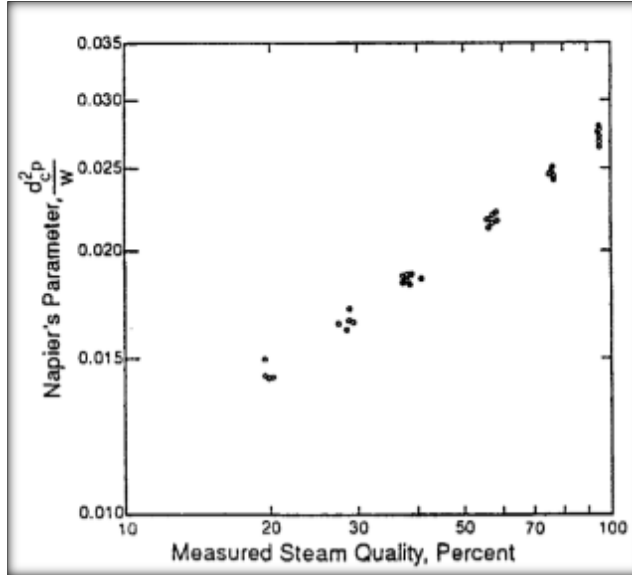
Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data p.4, modificada por el Autor

²¹ L.G.James. Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco –Inc).p.2

Resultados de experimentación de flujo crítico. Los resultados de la experimentación fueron representados mediante la gráfica en escala logarítmica de la

Figura 6, la cual relaciona el factor $d_c^2 P/w$ vs X determinadas por la correlación de Naiper.

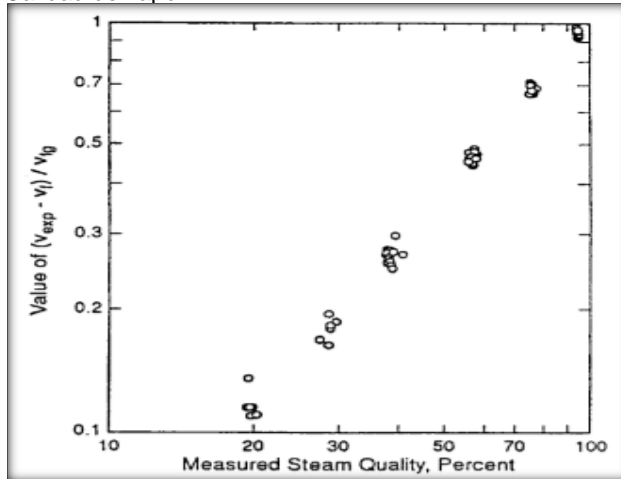
Figura 6. Experimentación Naiper Vs Calidad de vapor



Fuente: Determination of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, p. 3.

La **Figura 7** representa los resultados del flujo subcrítico a través de un orificio permitiendo la estimación de los valores de las constantes A y B.

Figura 7. Relación de volumen específico experimental Vs Calidad de vapor



Fuente: Determination of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, p.3.

El v_{exp} se determinó en función $C_o F_a Y_2$ y el diámetro de orificio, ver **Ecuación 8**:

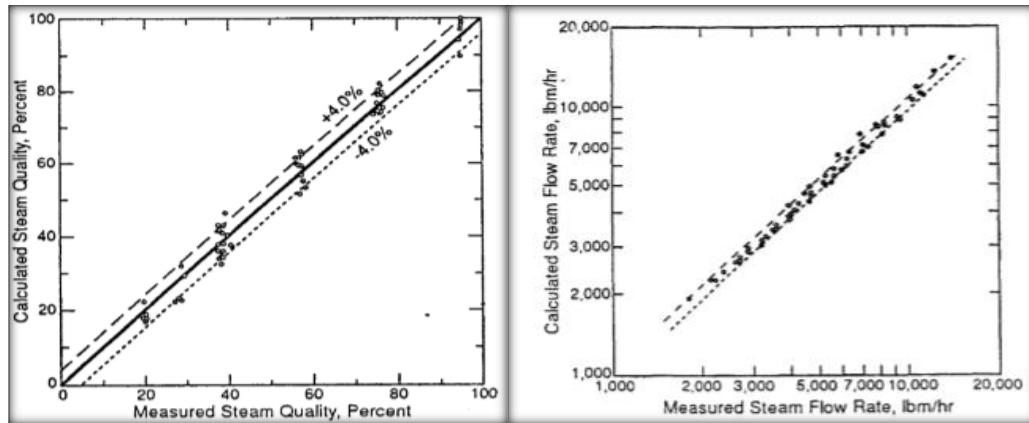
Ecuación 8. Volumen específico experimental

$$v_{exp} = \frac{(1888,56 C_o F_a Y_2)^2}{w^2} \frac{d^4 \phi}{1 - \beta^4}$$

Fuente: Determination Of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, James L.G.Schroad (Texaco -Inc) 1995, p3.

Respecto a la calidad y flujo de vapor, se comparan los datos experimentales vs medidos o establecidos para la experimentación}, obteniendo una desviación $\pm 4,75\%$. **Figura 8.**

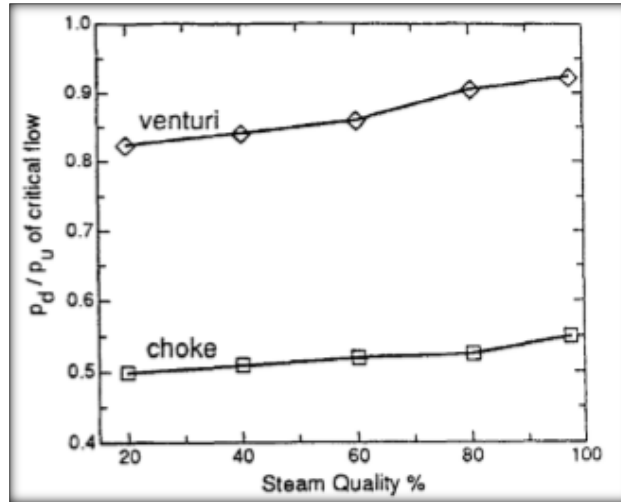
Figura 8. Calidad y flujo másico calculados vs experimentales



Fuente: Determination of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter, p. 3.

Por otro lado, se determinó una relación entre las presiones de entrada y la presión en el radio crítico de los medidores de flujo utilizados, en este caso la válvula choke y el tubo Venturi versus calidad, como se muestra en la **Figura 9.**

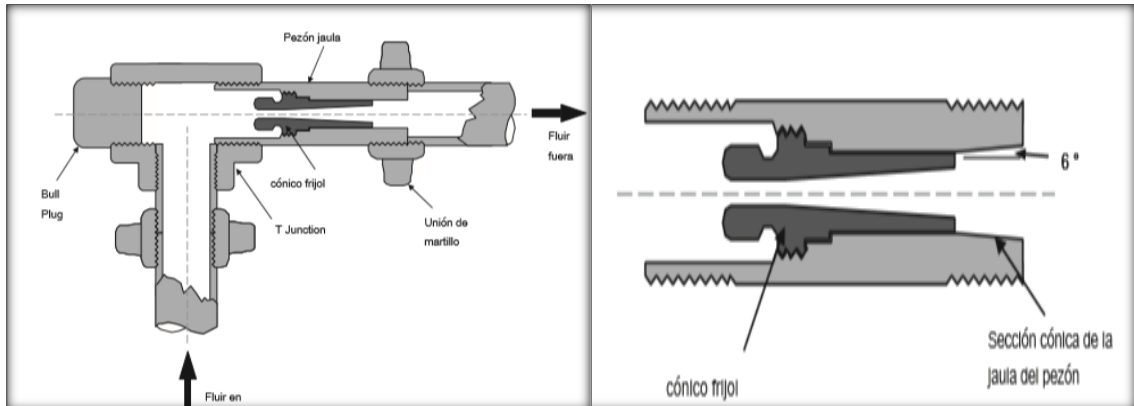
Figura 9. Relación de presión de garganta vs calidad de vapor



Fuente: Determination of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter ,p.4.

1.4.2 Vapor a través de un estrangulador con tobera. La **Figura 10** representa el diseño de una válvula estranguladora con una inserción cónica en forma de tobera, cuyo fin principal es la recuperación máxima de presión.

Figura 10. Válvula estranguladora con inserción cónica

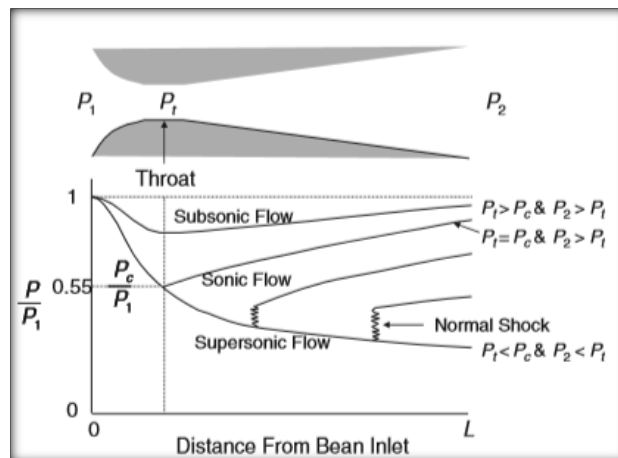


Fuente: Tapered-Bean Steam Chokes Revisited , Suzanne Griston-Castrup (Integrated Sciences Group), Faisal Latif (Vintage Production California); Ali Al Kalbani (Occidental Petroleum Corp.),2011,p.1.

Se representa el flujo a través de la válvula mediante las curvas de presión para flujo subsónico, sónico, y flujo supersónico como se muestran en la **Figura 11**. Para que exista condiciones de flujo crítico o sónico en el flujo de vapor, se requiere que la presión en la garganta P_t sea 0,55 veces la presión de entrada o aguas

arriba P_1^{22} . Se establece cuando la presión en la garganta es 0,55 veces la presión de entrada, se logra una presión para que exista flujo crítico y se denomina P_c . En las condiciones de flujo subsónico, la presión en la garganta no alcanza el valor de P_c y la presión a la salida, P_2 es mayor que P_c . Bajo estas condiciones no existe flujo crítico y hay que aplicar un factor de corrección a las ecuaciones. Existen varias condiciones de presión a la salida P_2 , dependiendo del diseño de la tobera o Venturi, donde se logra una P_c en la garganta, para flujo crítico. Si se usa una tobera tipo válvula de choque, la presión a la salida P_2 , será igual o menor que P_c , y en el caso de un Venturi, gran parte de la energía potencial del flujo se recupera, obteniendo una P_2 mayor que la P_c , tal como se muestran en las **Figura 9** y **Figura 11**. La única condición requerida para que exista flujo crítico, sin importar el equipo utilizado es $P_c = 0,55 P_1$, para lograr que la velocidad del flujo en la garganta sea la velocidad del sonido. Dependiendo de las condiciones de presión requeridas se optará por usar toberas tipo válvulas de Choke o Venturi.

Figura 11. Relación de regímenes de flujo en función de la longitud de garganta



Fuente: Tapered-Bean Steam Chokes Revisited , Suzanne Griston-Castrup (Integrated Sciences Group), Faisal Latif (Vintage Production California); Ali Al Kalbani (Occidental Petroleum Corp.),2011,p.1.

La experimentación se realizó con longitudes de tobera menores a 6 pulgadas y 28/64 pulgadas de diámetro de garganta; los resultados evaluados fueron para tuberías de 3 pulgadas y 4 pulgadas.

La **Ecuación 9** propuesta por Griston (1995) permite determinar el flujo másico de vapor a través de la garganta de la válvula a la cual se encuentra en un flujo

²² GRISTON, S. 1995. Evaluación de vapor CAUDAL Las ecuaciones para Wellhead Bobinas de choque. Oral SPE 29628 presentación dada en la Reunión de la Región Occidental de la SPE, Bakersfield, California, EE.UU., 8-10 de marzo. Griston, S. y Abate, T. 1996. Prueba de campo de Tapered-Bore Bobinas para Vapor de control de flujo. Artículo de la SPE 35677 presentado en la Reunión de la Región Occidental de la SPE, Anchorage, 22-24 de mayo.

crítico, teniendo en cuenta el diámetro de la garganta, longitud de la tobera inserta y densidad -presión a la entrada de la garganta.

Ecuación 9. Flujo másico en condiciones críticas Griston

$$w = 57,3 d_c^2 \left(1 - 0,00705 \frac{l_c}{d_c} \right) \sqrt{\rho_a P_a}$$

Fuente: Tapered-Bean Steam Chokes Revisited , Suzanne Griston-Castrup (Integrated Sciences Group), Faisal Latif (Vintage Production California); Ali Al Kalbani (Occidental Petroleum Corp.),2011,p.3.

2. METODOLOGÍA

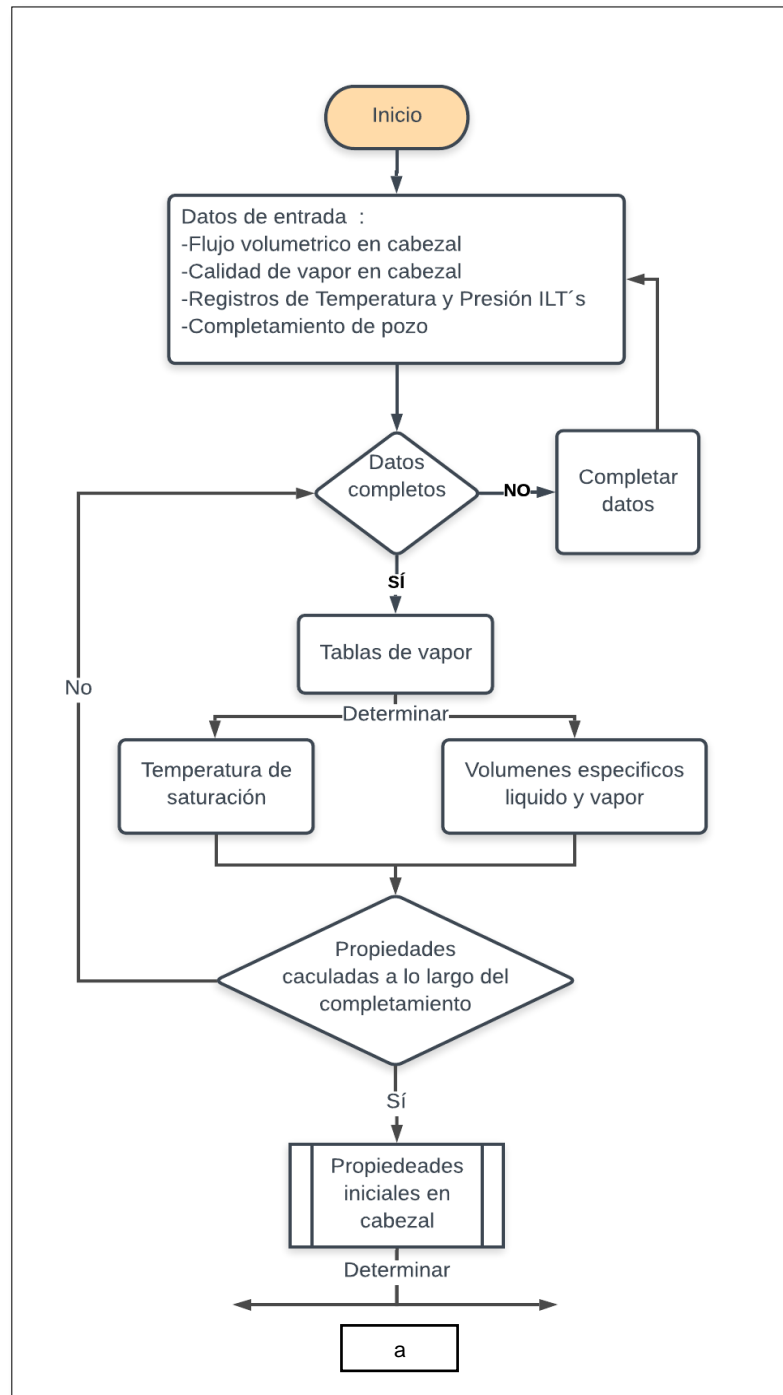
En este capítulo se describen los pasos para la construcción de herramienta digital teniendo en cuenta la información mínima requerida para la determinación de las propiedades de vapor a lo largo del completamiento y cara de formación. Se divide el proceso de cálculos en tres secciones, la primera para datos de inicialización en el cabezal, la segunda para el fluido a través de la tubería de inyección y la tercera para el flujo que pasa a través del distribuidor de flujo y llega a cara de formación. Adicionalmente se plantea el balance de energía y materia, en el cual el flujo másico permanece constante antes de cada distribuidor y el calor inyectado es equivalente a la distribución por mandriles más las pérdidas de calor.

2.1 DETERMINACIÓN PROIEDADES

Para la determinación de calidad y flujo másico se describen una secuencia de pasos, conformados por ecuaciones de diferentes autores. Para hacer cálculos más rápidos y automáticos, se genera una plantilla de cálculos en Excel y una herramienta digital de resultados.

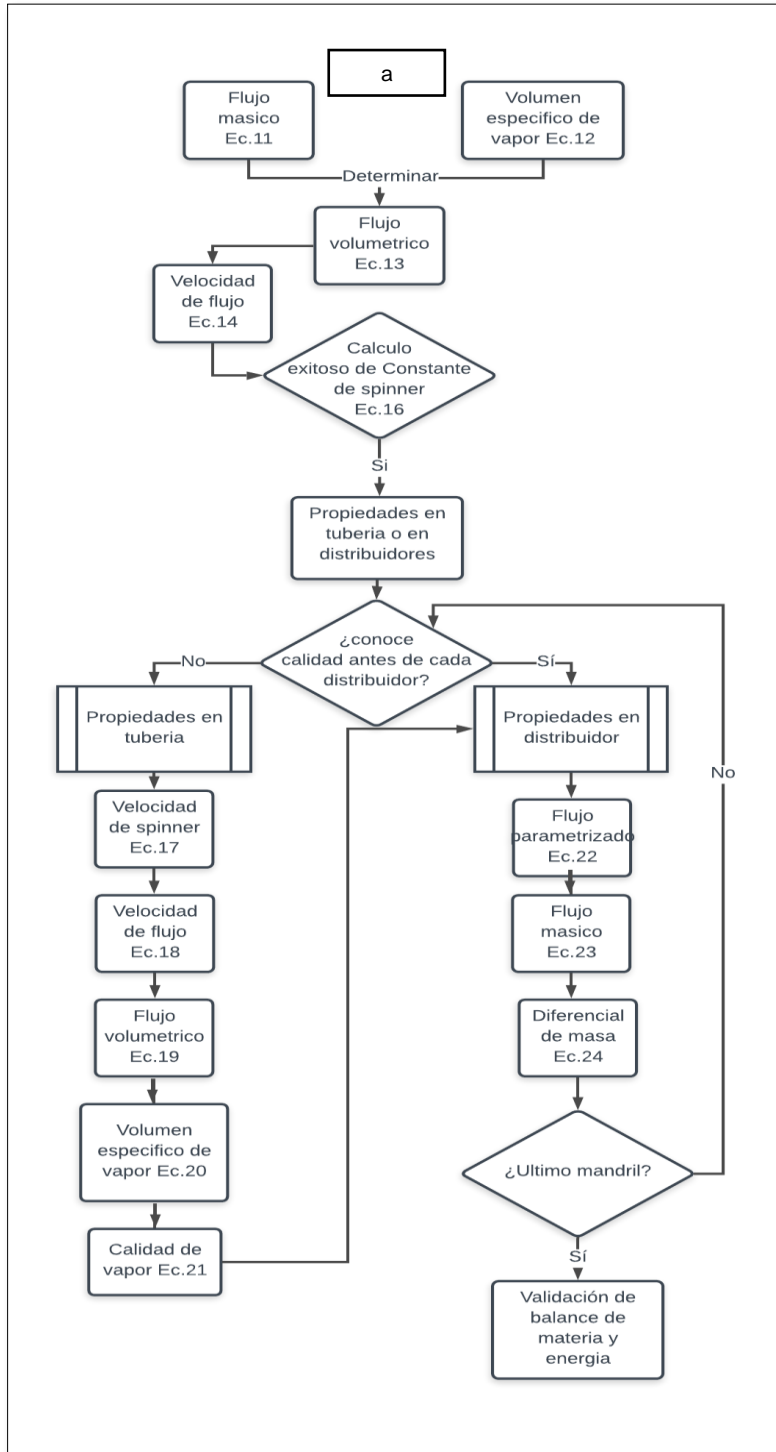
2.1.1 Plantilla de cálculos. Las **Figura 12** y **Figura 13** representan la metodología para la determinación de calidad y flujo másico de vapor mediante el uso de ecuaciones y apoyo de una plantilla en Excel. La platilla de Excel tiene como principal objetivo, automatizar el cálculo de variables repetitivas a lo largo de la sección del completamiento.

Figura 12. Programación de plantilla de Excel para el cálculo de calidades y flujos máxicos de vapor en flujo crítico-Pate Uno



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Diagrama de flujo de plantilla de Excel para cálculo de calidades y flujos másicos de vapor-Parte dos



Fuente: elaboración propia.

2.1.3 Herramienta digital. Con el fin de tener una mejor interpretación de los resultados, mediante el lenguaje de programación de Visual Basic y Power BI, se modela la plantilla de Excel propuesta anteriormente.

El diseño de la herramienta permitirá hacer carga de los datos de entrada, principalmente del completamiento del pozo, el cual estará dado por las palabras claves de la **Tabla 2.**

Tabla 2. Palabras clave de completamiento

COMPLETAMIENTO
CROSSOVER
INJECTION MANDREL 1
INJECTION MANDREL 2
INJECTION MANDREL n
LANDING JOINT
LANDING NIPPLE
PACKER
PLUG BACK
PUP JOINT
TUBING HANGER
TUBING JOINT(S)

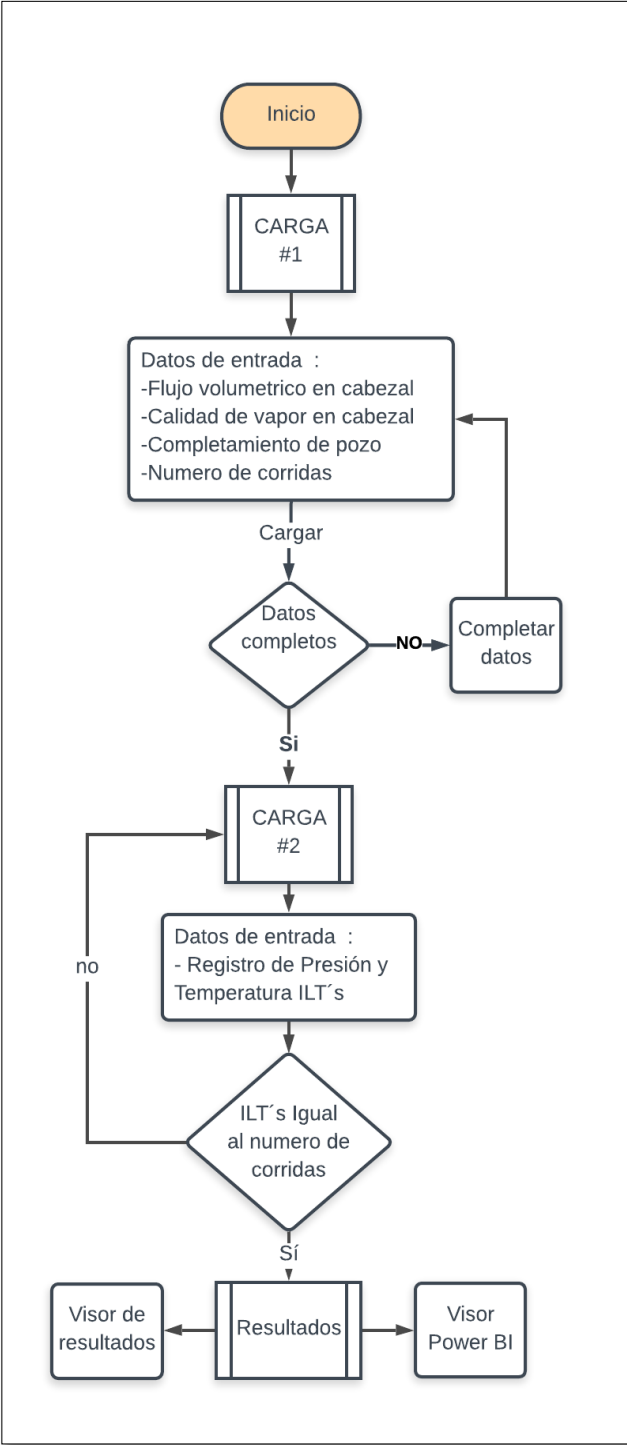
Fuente:elaborada por el autor,con base en palabras clave Ecopetrol S.A

La carga estará dividida en dos etapas:

- **Primera Carga:** Corresponde a datos constantes, completamiento, flujo volumétrico equivalente en agua y calidad de vapor en el cabezal de superficie.
- **Segunda Carga:** Conformada por las diferentes corridas de registros ILT's,

La **Figura 15** representa el diagrama de procesos, de carga de datos y obtención de resultados, generados a través de la herramienta digital.

Figura 15. Diagrama de flujo de la carga de datos en la herramienta digital



Fuente: elaboración propia.

2.2 FLUJO VOLUMÉTRICO INYECTADO

Cantidad de vapor inyectado en superficie en barriles equivalentes por día, considerado como parámetro de inicialización, dado que permite determinar el flujo másico inicial. El flujo volumétrico utilizado para la evaluación de esta metodología es igual a 1217 barriles por día el cual es un estimado promedio en uno de los campos del valle medio del Magdalena²³; según los datos internos de la compañía .

2.3 CALIDAD DE VAPOR EN CABEZAL

Fracción másica de vapor en una mezcla líquido vapor **Ecuación 10**. Considerado parámetro de inicialización, dado que permite determinar junto con el flujo másico, el flujo volumétrico de vapor inicial y a partir de él determina su variación a lo largo del completamiento.

Ecuación 10. Calidad de vapor

$$X = \frac{\text{Masa vapor}}{\text{Masa vapor} + \text{Masa Agua}} = \frac{\text{Masa vapor}}{\text{Masa total}}$$

Fuente: Yunus Cengel, termodinámica 7th , p.129.

Para efectos prácticos la calidad de vapor en cabezal es asumida con un valor de 0,7 el cual es un estimado promedio en los cabezales de inyección; la calidad en los generadores tiene un control operacional entre 0,6 a 0,8 fracción en calidad.

2.4 ILT

El ILT es una herramienta conformada por sensores, los cuales permiten determinar perfiles de temperatura, presión, gamma ray y caliper en función de la profundidad, a partir de esta datación se es posible estimar porcentaje de distribución de fluidos, de agua y gas²⁴. Los perfiles de temperatura y presión, serán usados como input para determinar las propiedades del vapor mediante la interpolación de tablas dinámicas. El **ANEXO A** representa el encabezado del registro en su extensión LAS de lectura.

2.5 COMPLETAMIENTO

El completamiento suministra el diseño de tuberías, empaques y demás herramientas mecánicas dentro del pozo, el **ANEXO B** representa gráficamente los completamientos evaluados, los cuales al ser datos input permitirán determinar calidad y flujo másico.

²³ Ecopetrol S.A.

²⁴ Glosario virtual de Schlumberger, 2019. [consulta 7 de agosto 2019]. Disponible en <www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/i/injection_test.aspx>.

La **Tabla 3** muestra los componentes de dos sistemas de completamiento de un pozo a diferentes fechas, a los cuales se les evaluó la metodología de determinación de calidad de vapor y flujo másico.

Tabla 3. Instrumentación del completamiento

Completamiento #1					Completamiento #2				
Componente	Tope MD (Ft)	Base MD (Ft)	OD (in)	ID (in)	Componente	Tope MD (Ft)	Base MD (Ft)	OD (in)	ID (in)
TUBING HANGER	11	11,89	7,06	2,99	TUBING JOINT(S)	11	11,9	7,06	2,9
PUP JOINT	11,89	18,79	3,5	2,992	PUP JOINT	11,9	18,8	3,5	2,992
TUBING JOINT(S)	18,79	49,21	3,5	2,992	TUBING JOINT(S)	18,8	49,2	3,5	2,992
PUP JOINT	49,21	51,21	3,5	2,992	PUP JOINT	49,2	51,2	3,5	2,992
TUBING JOINT(S)	51,21	1.482,48	3,5	2,992	TUBING JOINT(S)	51,2	1482,5	3,5	2,992
LANDING NIPPLE	1.482,48	1.483,63	4,5	2,81	LANDING NIPPLE	1482,5	1483,6	4,5	2,81
PUP JOINT	1.483,63	1.489,75	3,5	2,992	PUP JOINT	1483,6	1489,8	3,5	2,992
LANDING JOINT	1.489,75	1.523,37	5	2,99	LANDING NIPPLE	1489,8	1523,4	5	2,9
PACKER	1.523,37	1.528,70	6	2,99	PACKER	1523,4	1528,7	6	2,9
TUBING JOINT(S)	1.528,70	1.589,64	3,5	2,992	TUBING JOINT(S)	1528,7	1589,6	3,55	2,992
INJECTION MANDREL	1.589,64	1.596,06	5	2,44	INJECTION MANDREL 1	1589,6	1596,1	5	2,44
TUBING JOINT(S)	1.596,06	1.717,30	3,5	2,992	TUBING JOINT(S)	1596,1	1717,3	3,5	2,992
LANDING NIPPLE	1.717,30	1.718,37	3,68	2,31	LANDING NIPPLE	1717,3	1718,4	3,68	2,31
CROSSOVER	1.718,37	1.718,76	3,77	2,44	CROSSOVER	1718,4	1718,8	3,77	2,44
PACKER	1.718,76	1.721,08	6	3,5	PACKER	1718,8	1721,1	6	3,5
INJECTION MANDREL	1.721,08	1.727,03	5	2,44	INJECTION MANDREL 2	1721,1	1727	5	2,44
TUBING JOINT(S)	1.727,03	1.788,60	3,5	2,992	TUBING JOINT(S)	1727	1788,6	3,5	2,992
LANDING NIPPLE	1.788,60	1.789,66	3,68	2,26	LANDING NIPPLE	1788,6	1789,7	3,68	2,26
CROSSOVER	1.789,66	1.790,05	3,77	2,44	CROSSOVER	1789,7	1790	3,77	2,44
PACKER	1.790,05	1.792,38	6	3,5	PACKER	1790	1792,4	6	3,5
INJECTION MANDREL	1.792,38	1.798,32	5	2,44	INJECTION MANDREL 3	1792,4	1798,3	5	2,44
CROSSOVER	1.798,32	1.798,71	3,77	2,44	CROSSOVER	1798,3	1798,7	3,77	2,44
PUP JOINT	1.798,71	1.818,92	3,5	2,992	PUP JOINT	1798,7	1818,9	3,5	2,992
TUBING JOINT(S)	1.818,92	1.997,33	3,5	2,992	TUBING JOINT(S)	1818,9	1997,3	3,5	2,992
PLUG BACK	1.997,33	1.998,00	4,5		PLUG BACK	1997,3	1998	4,5	

Fuente: elaboración propia, con base en informe técnico de asociadas, Ecopetrol S.A.

El pozo evaluado cuenta con tres arenas de interés las cuales están sometidas a inyección continua de vapor. La **Tabla 4** representa la distribución de los distribuidores de flujo en cada mandril respecto a cada zona de interés.

Tabla 4. Distribuidores de flujo en cada sesión selectiva

Completamiento	Mandriles	Distribuidor de flujo clase #1		Distribuidor de flujo Clase#2	
		ID de garganta (in)	Número de distribuidores	ID de garganta (in)	Número de distribuidores
Completamiento #1	Mandril1	0,25	2	0,1875	1
	Mandril2	0,25	1	0,1875	2
	Mandril3	0,25	1	0,1875	0
Completamiento #2	Mandril1	0,25	2	0,1875	1
	Mandril2	0,25	1	0,1875	2
	Mandril3	0,25	1	0,1875	0

Fuente: elaboración propia, con base en Informe técnico de asociadas 2018, Ecopetrol S.A.

2.6 TABLAS DE VAPOR

Contienen las propiedades del vapor a diferentes condiciones de presión y temperatura. Partiendo de la identificación de presión y temperatura a una profundidad determinada y mediante los registros ILT's, se interpolan las propiedades de vapor de agua, temperatura de saturación, volumen específico líquido, volumen específico gas, volumen específico líquido- gas y calor latente de vaporización; permitiendo determinar calidad y flujo másico a través de las ecuaciones propuestas.

2.7 ECUACIONES DE PROCESO EN CABEZAL

A partir de las ecuaciones en el cabezal se determinan las condiciones iniciales a las cuales el fluido entra el sistema de inyección del pozo.

2.7.1 Flujo másico. La **Ecuación 11** determina el flujo masico inicial, teniendo en cuenta el principio de conservación de masa, esta va ser constante hasta que se empiece a distribuir a través de cada mandril. Mediante el caudal equivalente en agua inyectado y la densidad del agua a condiciones estándar se calcula el flujo másico.

Ecuación 11. Flujo másico

$$M = Q_{Iny} \rho_{st}$$

Fuente: CENGEL, Yunus Termodinámica 7th, p.153.

2.7.2 Volumen específico de vapor. Conociendo la profundidad y presión o temperatura, se es posible determinar si el fluido está en estado vapor-líquido, líquido saturado o vapor sobre calentado. En dado caso de que este se encuentre en estado líquido-vapor, mediante las tablas de vapor se puede determinar el volumen específico de líquido y gas, permitiendo calcular volumen específico de vapor en función de la calidad mediante la **Ecuación 12**.

Ecuación 12. Volumen específico de vapor

$$v_v = v_g X + (1 - X)v_f$$

Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica 7th, p.127.

2.7.3 Flujo volumétrico de vapor. Conociendo el volumen específico de vapor y el flujo másico de vapor mediante la **Ecuación 13** se puede determinar el flujo volumétrico de vapor.

Ecuación 13. Flujo volumétrico de vapor

$$Q_v = Mv_v$$

Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica 7th, p.153.

2.7.4 Velocidad de flujo. Conociendo los diámetros internos de cada tubería, se calcula el área transversal de flujo y mediante la **Ecuación 14** se determina la velocidad de flujo.

Ecuación 14. Velocidad de flujo

$$V_F = \frac{Q_v}{A_{tr}}$$

Fuente: A.Nasirivadvkouhi, Velocity tolos in production logging, p.4.

2.7.5 Velocidad relativa del Spinner. Al estar el flujo de vapor paralelo y en la misma dirección en el que se corre el registro, se debe determinar la velocidad que registra el spinner, la cual se determina mediante la **Ecuación 15**.

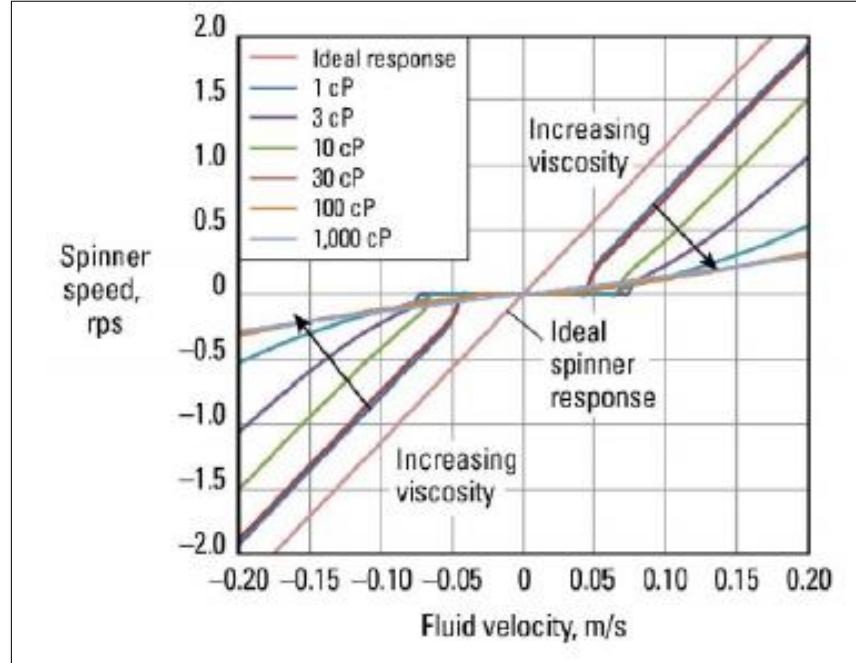
Ecuación 15. Velocidad relativa de spinner

$$V_{SPN} = V_F - V_R$$

Fuente: A.Nasirivadvkouhi, Velocity tolos in production logging, p.6.

La **Figura 16** representa la relación de RPS vs velocidad del spinner en función de la viscosidad.

Figura 16. Relación en función del aumento de Viscosidad



Fuente: Velocity Tools in Production Logging. A. Nasirisavadkouhi, International Campus of Sharif University of Technology, p.7.

Partiendo de una viscosidad de vapor muy inferior a la del agua, 1 cP, debido a las condiciones de inyección de vapor en campo, T=510 oF, viscosidades de vapor de 0,04 a 0,1 cP, se considera un caso ideal el comportamiento del spinner en el desarrollo de la metodología. Conociendo la velocidad rotacional del spinner y las RPS iniciales se determina la constante de spinner mediante la **Ecuación 16**.

Ecuación 16. Constante de spinner

$$Cte_{SPN} = \frac{V_{SPN}}{RPS}$$

Fuente: Velocity.Spinner.Modficada, modificada por el autor

2.8 ECUACIONES DEL PROCESO EN TUBERÍA DE INYECCIÓN

A partir de la constante de del spinner se determinan las demás propiedades a lo largo del tubing siguiendo el siguiente orden:

2.8.1 Velocidad relativa del Spinner. La **Ecuación 17** permite calcular la velocidad del spinner a cualquier profundidad.

Ecuación 17. Velocidad de spinner

$$V_{SPN} = Cte_{SPN} RPS$$

Fuente: Velocity.Spinner.Modficada,modificada por el autor

2.8.2 Velocidad de flujo. Conociendo la velocidad del spinner y la velocidad del registro de la **Ecuación 15** se determina la velocidad de flujo **Ecuación 18**.

Ecuación 18. Velocidad de flujo en funcion de velociades de spinner y velocidad de registro

$$V_F = V_{SPN} + V_R$$

Fuente: A.Nasirisvadkouhi, Velocity tolos in production logging, Pag 6..

2.8.3 Flujo volumétrico. Teniendo en cuenta la **Ecuación 18** se obtiene la **Ecuación 19** que permite determinar el flujo volumétrico de vapor.

Ecuación 19. Flujo volumétrico de vapor

$$Q_v = V_F A_{tr}$$

Fuente: A.Nasirisvadkouhi, Velocity tolos in production logging,p.4.

2.8.4 Volumen específico de vapor. Conociendo el flujo volumétrico de vapor y flujo másico de vapor, se determina el volumen específico de vapor mediante la **Ecuación 20**.

Ecuación 20. Volumen específico de vapor

$$v_v = Q_v / M$$

Fuente: CENGEL,Yunus.Termodinámica 7th, p.153.

2.8.5 Calidad de vapor. Con el uso de tablas termodinámicas o correlaciones para el vapor de agua, se determinan los volúmenes específicos de gas y de líquido permitiendo determinar mediante la **Ecuación 21** la calidad de vapor.

Ecuación 21. Calidad de vapor en función de volúmenes específicos

$$X = \frac{(v_g - v_f)}{(v_g - v_f)}$$

Fuente:CENGEL,Yunus.Termodinámica 7th, p.149.

Se debe tener en cuenta que v_g igual a v_{vapor} significa vapor saturado 100% de calidad y v_l igual a v_{vapor} significa líquido 0% calidad, a presión y temperatura del registro.

2.9 ECUACIONES DEL PROCESO EN EL DISTRIBUIDOR DE FLUJO

Basados en los datos experimentales de las metodologías expuestas anteriormente, se construye una ecuación de flujo parametrizado Q_{mfc} en estado crítico dependiente del diámetro de garganta del distribuidor de flujo.

2.9.1 Factor de corrección de flujo subcrítico. James L.G. determina que hay una relación (Z) entre la presión de entrada y la presión de descarga, la cual permite determinar el régimen del fluido y corregir el flujo que pasa a través de la boquilla²⁵.

2.9.2 Flujo parametrizado. La **Ecuación 22** representa una función de flujo volumétrico de vapor en función de la calidad, presión y diámetro de garganta.

Ecuación 22. Flujo crítico

$$y = \frac{ZQ_{mfc}}{P_d d_c^2} = aX^b$$

Fuente: Tapered-Bean Steam Chokes Revisited , Suzanne Griston-Castrup (Integrated Sciences Group), Faisal Latif (Vintage Production California); Ali Al Kalbani (Occidental Petroleum Corp.),2011,p.4

2.9.3 Flujo másico del distribuidor de flujo. Conociendo el flujo de vapor que pasa a través de cada distribuidor se utiliza la **Ecuación 23** para determinar el flujo másico que pasa a través del mismo.

Ecuación 23. Flujo másico a través del distribuidor

$$M_{st} = Q_{mfc} \rho_{st}$$

Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica, p.110.

2.9.4 Diferencial de masa. El diferencial de masa corresponde a la masa que continúa una vez se pasa la primera zona selectiva y se determina mediante el principio de conservación de masa **Ecuación 24**.

Ecuación 24. Control de masa después de cada distribuidor

$$M_2 = M - M_{st}$$

Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica 7th , p.109.

2.10 Validación

No habiendo un modelo estándar que represente las propiedades del vapor como calidad, densidad y energía a lo largo de la sesión de completamiento y en cara

²⁵ GRISTON, S. 1995. Evaluación de vapor CAUDAL Las ecuaciones para Wellhead Bobinas de choque. Oral SPE 29628 presentación dada en la Reunión de la Región Occidental de la SPE, Bakersfield, California, EE.UU., 8-10 de marzo.4.

de formación, la validación de la metodología propuesta está dada por principios fundamentales como lo es la conservación de masa y energía.

2.10.1 Conservación de la materia. En sistemas cerrados, como lo es del cabezal de inyección al primer distribuidor de flujo, se establece que la masa va permanecer constante. Sin embargo, para un volumen de control, es sometida a cruzar fronteras; en este caso es la distribución de flujo en cada distribuidor está dada por la **Ecuación 25** que representa el control de lo que sale del sistema²⁶.

Ecuación 25. Conservación de la masa

$$Masa_{Cabezal} = Masa_{mandril-1} + Masa_{mandril-2} + Masa_{mandril-3} + Masa_{mandril-n}$$

Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica 7th , p.109. Modificada por el autor

La equivalencia del flujo másico inyectado en cabezal, el cual es conocido, debe ser igual a la sumatoria de flujos másicos en cada mandril de distribución.

2.10.2 Conservación de la energía. El principio de conservación de energía establece, que en un proceso de transferencia de calor, la energía en forma de calor a la entrada debe ser igual al calor o energía que sale, más las pérdidas de calor²⁷; la **Ecuación 26** representa el balance de calor en el sistema cabezal-formación.

Ecuación 26. Balance de energía para sistema cabezal-formación

$$H_{Cabezal} = \sum H_{Total/Arena} + Pérdidas de calor$$

Fuente: CENGEL, Yunus. Transferencia de calor y masa, 3th , p.372. Modificada por el autor

La sumatoria del calor en los mandriles no puede ser superior al calor suministrado en el cabezal, a menos de tener una fuente externa en el sistema. Las pérdidas de calor son atribuidas a procesos de conducción y convección entre tubería y anular; las pérdidas por radiación se consideran despreciables.

El calor suministrado en cara de formación está basado en lo relacionado al flujo másico y calidad que pasa a través de cada mandril la cual se determina mediante la **Ecuación 27**:

Ecuación 27. Calor inyectado por arena

$$H_{Total/Arena} = M_i (h_v X + (1 - X)h_f)$$

Fuente: CENGEL, Yunus, Transferencia de calor y masa, 3th , p.370. Modificada por el autor

²⁶ CENGEL, Yunus. termodinámica séptima edición, Mexico 2012, p. 220.

²⁷ Ibíd.p.220

2.10.3 Equilibrio líquido - vapor. Se establece que para estar en equilibrio líquido vapor se debe cumplir con:

- A una presión en determinado punto, la temperatura del fluido debe ser igual a la temperatura de saturación.
- La calidad de vapor debe estar en un rango de 0 a 1.

De lo contrario:

- Si la temperatura del fluido es menor a la temperatura de saturación, el fluido se encontrará como líquido saturado.
- Si la temperatura del fluido es mayor a la temperatura de saturación en este se encontrará en estado de vapor sobrecalentado.
- Se ha considerado un margen de 3,55 °F, de error en la medición de la temperatura, para la definición de la condición del vapor.

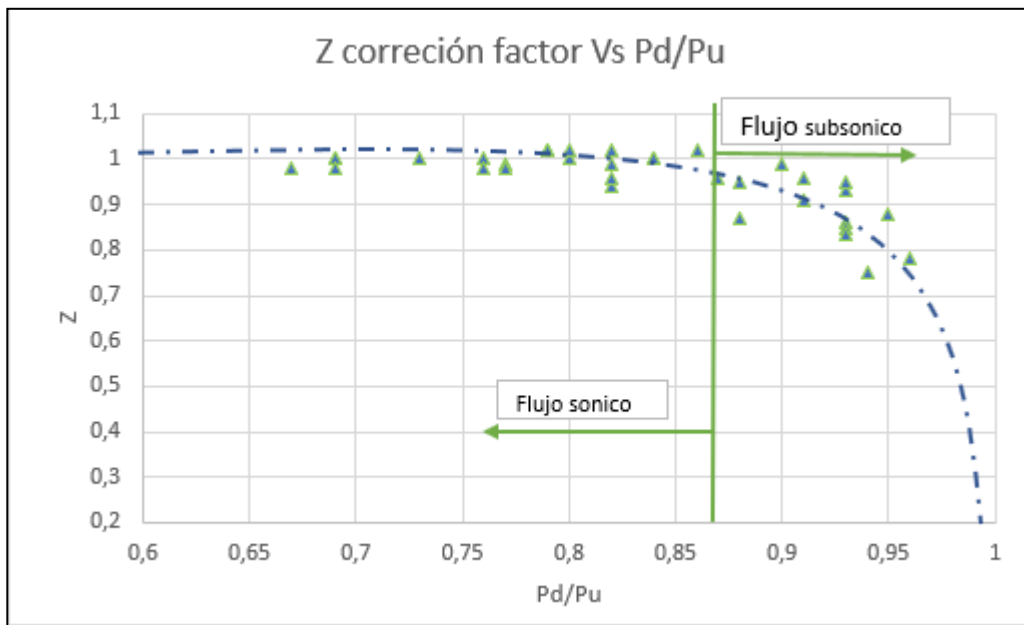
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Se determinará inicialmente la relación entre presión de entrada y presión de descarga la cual permite determinar un factor de corrección para la **Ecuación 22**, permitiendo estandarizar el flujo parametrizado en estado crítico a través de una reducción de garganta. Se generó una plantilla en Excel y una herramienta digital, las cuales tienen como objetivo automatizar y agilizar los procesos de determinación de calidad y flujo másico en flujo crítico; mediante ellos se evaluaron los completamientos e ILT's de los años 2016 y 2018, siendo estos correspondientes a los últimos registros corridos y suministrados por Ecopetrol S.A. obteniendo así los perfiles de densidad, perfiles de calidad y flujo másico.

3.1 FACTOR DE CORRECCIÓN DE FLUJO SUBCRÍTICO

partiendo de los datos experimentales descritos en los modelos del capítulo dos, se construye la Error! Reference source not found.1, la cual relaciona la presión de entrada y de garganta vs z , siendo z la relación de proporcionalidad entre datos experimentales y calculados.

Gráfica 1. Factor de corrección Vs Pd/Pu



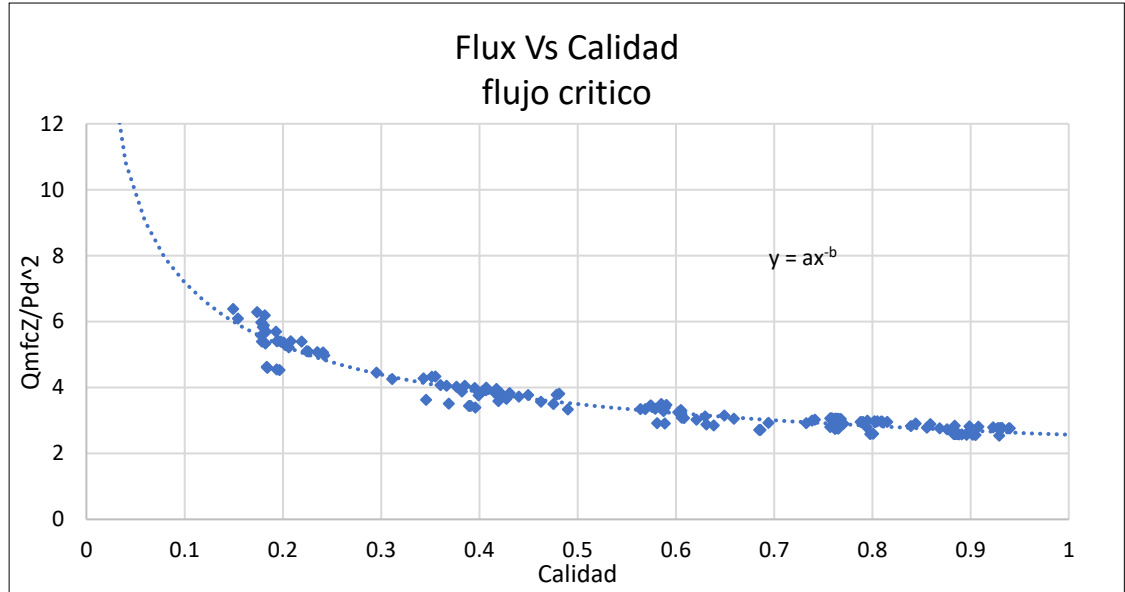
Fuente: elaboración propia.

Se determina que al haber una relación mayor a 0,87, aproximadamente, entre la presión de entrada y de descarga, la variación de presión no es suficiente para alcanzar un estado sónico o crítico. Se observa una linealización próxima a 1 cuando se alcanza el estado crítico, por lo cual el factor de corrección para la evaluación de esta metodología se toma como 1.

3.2 FLUJO PARAMETRIZADO

A partir de 146 datos experimentales encontrados en los artículos, tapered-bean steam chokes revisited y kern river field test of a steam quality measurement technique, se construye la **Gráfica 2** con el fin de determinar las variables a y b de la **Ecuación 22**.

Gráfica 2. Flujo crítico



Fuente: elaboración propia.

El coeficiente b tiene un carácter negativo, lo cual hace que la calidad se comporte de una manera inversa al flujo parametrizado.

3.3 PLANTILLA DE CÁLCULOS

La plantilla en Excel está conformada por tres hojas, Tablas de vapor, Datos de entrada y hoja de cálculos; la función de estas es automatizar la metodología propuesta.

3.3.1 Tablas de vapor. La hoja numero uno en la **Figura 17** corresponde a la datación de tablas de vapor donde se encuentra las entalpías y volúmenes específicos de liquido, gas y vapor a una presión y temperatura de saturación.

Figura 17. Tablas de vapor

Tabla de Vapor					Tabla de Vapor									
P sat	T sat	Ent. Gas	Ent. Liq.	Ent. V-L	P sat	T sat	Vep. Gas	Vesp. Liq.	Vesp. V-L	Densidad	Densidad .Gas	Tsat	Vep. Gas	Vesp. Liq.
psig	F	Btu/lb	Btu/lb	Btu/lb	psig	F	ft3/lbm	ft3/lbm	ft3/lbm	lbm/ft3	lbm/ft3	oC	m3/kg	m3/kg
-14,61	32,02	1075,5	0,0003	1075,50	-14,61	32,02	3.299,40000	0,016022	3299,38	62,41496	0,000303085	0	-2,285665E+03	9,9752E-04
-14,60	35,02	1076,8	3,026	1073,77	-14,60	35,02	19.178,66454	0,016024	19178,65	62,40611	5,21413E-05	1,668333	1,197285E+03	9,9781E-04
-14,55	45,45	1081,4	13,498	1067,90	-14,55	45,45	3.001,05245	0,016032	3001,04	62,37543	0,000333216	7,462778	1,873496E+02	9,9896E-04
-14,50	53,16	1084,7	21,217	1063,48	-14,50	53,16	1.799,63499	0,016038	1799,62	62,35278	0,000555668	11,74444	1,123475E+02	9,9992E-04
-14,45	59,32	1087,4	27,382	1060,02	-14,45	59,32	1.333,18348	0,016042	1333,17	62,33468	0,000750084	15,16833	8,322792E+01	1,0008E-03
-14,40	64,48	1089,7	32,541	1057,16	-14,40	64,48	1.076,82971	0,016046	1076,81	62,31953	0,000928652	18,03556	6,722428E+01	1,0015E-03
-14,35	68,94	1091,6	36,992	1054,61	-14,35	68,94	899,90000	0,016050	911,327039	62,30646	0,001097282	20,51056	5,689329E+01	1,0022E-03
-14,30	72,87	1093,3	40,917	1052,38	-14,30	72,87	728,69000	0,016085	794,103797	62,16927	0,001259256	22,69389	4,957528E+01	1,0028E-03
-14,25	76,39	1094,9	44,430	1050,47	-14,25	76,39	638,70000	0,016095	706,054788	62,13302	0,001416288	24,64833	4,407856E+01	1,0034E-03
-14,20	79,59	1096,3	47,623	1048,68	-14,20	79,59	586,00000	0,016103	636,872643	62,09898	0,001570133	26,42556	3,975967E+01	1,0040E-03
-14,10	85,22	1098,7	53,245	1045,46	-14,10	85,22	518,00000	0,016120	534,773922	62,03659	0,001869893	29,55444	3,338585E+01	1,0050E-03
3144,3	703,11	956,90	854,39	102,51	3144,3	703,11	0,09189	0,039730	0,05216	25,16988	10,88314081	372,8289	5,736208E-03	1,7300E-03
3145,3	703,16	956,28	854,90	101,38	3145,3	703,16	0,09183	0,039814	0,05202	25,11667	10,88960639	372,8556	5,732802E-03	1,7301E-03
3146,3	703,21	955,66	855,42	100,25	3146,3	703,21	0,09178	0,039898	0,05188	25,06368	10,89607747	372,8822	5,729398E-03	1,7303E-03
3147,3	703,26	955,05	855,93	99,12	3147,3	703,26	0,09172	0,039983	0,05174	25,01092	10,90255407	372,9089	5,725994E-03	1,7305E-03
3148,3	703,30	954,43	856,45	97,98	3148,3	703,30	0,09167	0,040067	0,05160	24,95838	10,90903618	372,9356	5,722592E-03	1,7306E-03
3149,3	703,35	953,81	856,96	96,85	3149,3	703,35	0,09161	0,040151	0,05146	24,90606	10,91552383	372,9622	5,719190E-03	1,7308E-03

Fuente: elaboración propia.

Las tablas de vapor tienen una variación en presión de saturación menor de 0,03 psi y en temperatura de saturación menor a 0,03 °F. La hoja de tablas de vapor está vinculada a la hoja de cálculos, donde por medio de la interpolación a una presión, se determinará la temperatura de saturación correspondiente y sus propiedades.

3.3.2 Hoja de cálculos. En esta hoja están formuladas las ecuaciones propuestas anteriormente en la metodología desde la sección 2,7 a la 2,9, este formato identifica el tipo de herramienta y profundidad, en los cuales se va a basar para aplicar la secuencia de cálculos vistos.

La **Figura 18** refleja los datos de entrada suministrados por el ILT. Posteriormente se identifica la presión del fluido y basados en ella se determina la temperatura de saturación y propiedades del vapor.

Figura 18. Hoja de cálculo-Primera parte

Completamiento	Sand	Gamma_ray	dept ft	Profundidad	Vel_Her	FLO.rps	Pre. Psia	Temp oF	Temp sat	DT C amb	DT F	Phase	Vgas	Vliq	Vsteam	Fracc 1	Fracc 2
				ft	CS.F/MN								pc/lbm	pc/lbm	pc/lbm		
TUBING JOINT(S)	Cabezal	11,405	6,24	6,26	37,62	-49,00	730,30	509,45	507,78	249,69	1,67 V		0,62	0,02	0,44	0,70	0,70
TUBING JOINT(S)		11,267	6,34	6,36	36,66	-49,00	730,34	509,48	507,78	249,71	1,70 V		0,62	0,02	0,44	0,70	0,70
TUBING JOINT(S)		10,797	6,44	6,46	35,94	-49,00	730,39	509,50	507,78	249,72	1,72 V		0,62	0,02	0,44	0,70	0,70
TUBING JOINT(S)		10,266	6,54	6,56	34,74	-47,45	730,43	509,51	507,78	249,73	1,74 V		0,62	0,02	0,43	0,68	0,68
TUBING JOINT(S)		9,201	6,64	6,66	33,81	-45,00	730,50	509,53	507,78	249,74	1,76 V		0,62	0,02	0,40	0,64	0,64
TUBING JOINT(S)		8,091	6,74	6,76	33,63	-45,00	730,57	509,56	507,78	249,75	1,78 V		0,62	0,02	0,40	0,64	0,64
TUBING JOINT(S)		6,961	6,84	6,86	33,49	-45,00	730,65	509,58	507,78	249,77	1,81 V		0,62	0,02	0,40	0,64	0,64
TUBING JOINT(S)		6,417	6,94	6,96	33,69	-45,00	730,68	509,59	507,78	249,77	1,82 V		0,62	0,02	0,40	0,64	0,64
TUBING JOINT(S)		5,763	7,04	7,06	33,93	-45,00	730,73	509,61	507,78	249,78	1,84 V		0,62	0,02	0,40	0,64	0,64
TUBING JOINT(S)		5,211	7,14	7,16	34,22	-47,76	730,79	509,63	507,78	249,80	1,86 V		0,62	0,02	0,43	0,68	0,68
TUBING JOINT(S)		4,897	7,24	7,26	34,27	-48,00	730,82	509,65	507,78	249,81	1,88 V		0,62	0,02	0,43	0,69	0,69
TUBING JOINT(S)		4,758	7,34	7,36	34,22	-48,00	730,85	509,66	507,78	249,81	1,89 V		0,62	0,02	0,43	0,69	0,69
TUBING JOINT(S)		4,711	7,44	7,46	34,34	-48,00	730,87	509,68	507,78	249,82	1,91 V		0,62	0,02	0,43	0,69	0,69
TUBING JOINT(S)		4,798	7,54	7,56	34,10	-48,00	730,88	509,71	507,78	249,84	1,93 V		0,62	0,02	0,43	0,69	0,69
TUBING JOINT(S)		4,878	7,64	7,66	33,77	-50,48	730,90	509,72	507,78	249,85	1,95 V		0,62	0,02	0,45	0,72	0,72
TUBING JOINT(S)		4,947	7,74	7,76	33,59	-54,00	730,91	509,73	507,78	249,85	1,96 V		0,62	0,02	0,48	0,78	0,78

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Parámetros de inicialización

Flujo volumétrico Bls/día	Calidad	Flujo másico Lbm/s	Calor MMBTUD
1217	0,7	4,93	423

Fuente: elaboración propia.

El flujo volumétrico y la calidad de vapor, son cargados en la parte número uno de la plantilla de trabajo Error! Reference source not found., mientras el flujo másico y calor son determinados internamente en la herramienta mediante la **Ecuación 11** y la **Ecuación 27** respectivamente.

La **Tabla 6** corresponde a las condiciones de inyección en el cabezal, las cuales son determinadas mediante la lectura del primer dato interpretado por los ILT´s a una profundidad de 0 ft.

Tabla 6. Presión y Temperatura en el cabezal de inyección

Años	P_inyección Psig	T_Inyección °F
2016	866	530
2018	733	510

Fuente: elaboración propia.

3.4 HERRAMIENTA DIGITAL

La herramienta desarrollada cuenta con dos plataformas de cargas de datos, la **Figura 21** representa la inicialización de la herramienta, la cual permite hacer la carga de datos constantes, como lo es la calidad, número de corridas, barriles inyectados, completamiento y características de mandriles de distribución.

Figura 21. Herramienta digital parte uno.

ecopETROL

DETERMINACIÓN DE CALIDAD Y FLUJO MÁSCICO DE VAPOR EN FLUJO CRÍTICO

CAMPO: Guadua CALIDAD DE VAPOR: 70%

NUMERO DE CORRIDAS: Dos BARRILES INYECTADOS: 1,319 BLS/D

Distribuidores de flujo

	DC1	DC2	DC3	DC4	#DC1	#DC2	#DC3	#DC4
Madril 1	0,25	0,1875	0,188		1	1	1	
Madril 2	0,25	0,1875			1	2		
Madril 3	0,25	0,1875			1	0		

Completamiento

Topo(f)	Base(f)	ID(in)	Herramienta
11	11,89	2,39	TUBING JOINT(S)
11,89	18,79	2,392	PUP JOINT
18,79	43,21	2,392	TUBING JOINT(S)
43,21	51,21	2,392	LANDING RIPLE
			LANDING JOINT
			PACKER
			INJECTION MANDREL 1
			CROSSOVER
			INJECTION MANDREL 2

CARGAR

Fuente: elaboración propia.

La segunda parte de la herramienta **Figura 22** consta de la carga de registros ILT's, los cuales van a ser dependientes del número de corridas seleccionadas en la parte número uno.

Figura 22. Herramienta digital parte dos

DETERMINACIÓN DE CALIDAD Y FLUJO MASICO DE VAPOR EN FLUJO CRÍTICO

CORRIDA: D1

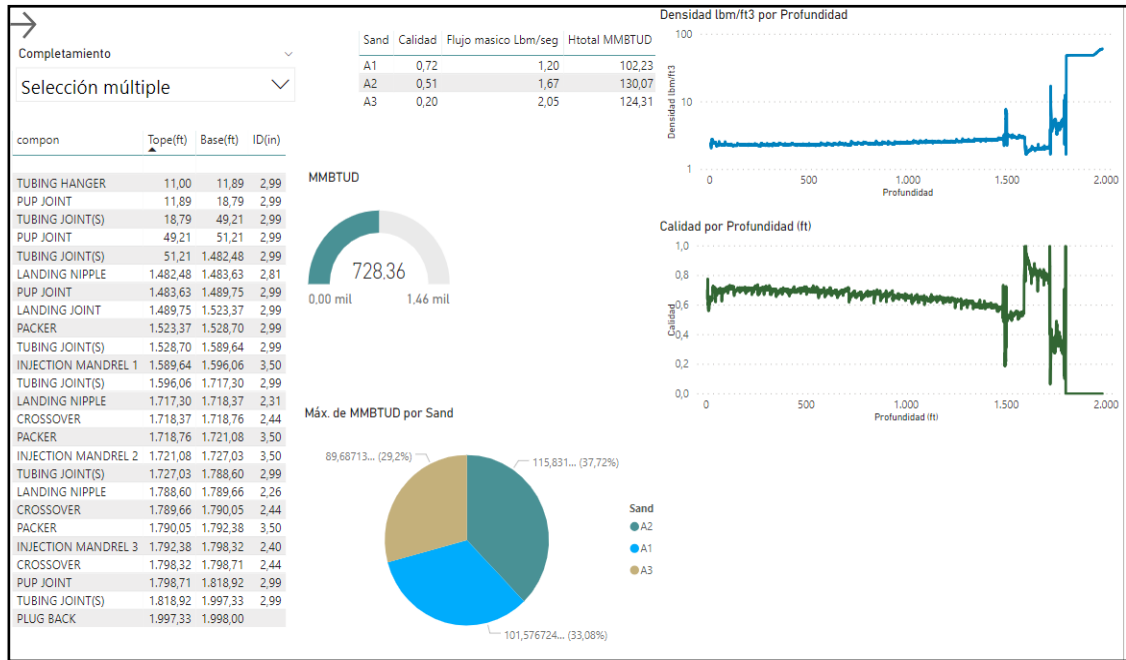
CARGAR INICIO

Depth (ft)	Velocity Tool (ft/min)	Gamma Ray	CCL	RPS Spinner	PPSP Psi	TEMP °F
6,238	37,617	11,405	7235887	-49	730,295	509,449
6,338	36,662	11,267	6590336	-49	730,343	509,475
6,438	35,941	10,797	9454464	-49	730,39	509,496
6,538	34,738	10,266	8954935	-47,448	730,429	509,51
6,638	33,807	9,201	7751296	-45	730,498	509,534
6,738	33,629	8,091	8304745	-45	730,571	509,557
6,838	33,487	6,961	8347402	-45	730,645	509,581
6,938	33,689	6,417	8352640	-45	730,683	509,594
7,038	33,933	5,763	8560129	-45	730,732	509,611
7,138	34,219	5,211	8626048	-47,759	730,787	509,632
7,238	34,27	4,897	7979375	-48	730,823	509,65
7,338	34,219	4,758	7820672	-48	730,845	509,664

Fuente: elaboración propia.

Una vez cargado los datos requeridos por la inicialización, los resultados de perfiles de calidad, densidad y flujo másico de vapor son mostrados a través de graficas dinámicas de Excel o el visualizador Power BI.

Figura 23. Visualizador Power BI



Fuente: elaboración propia.

El visualizador de la **Figura 23** está conformado por:

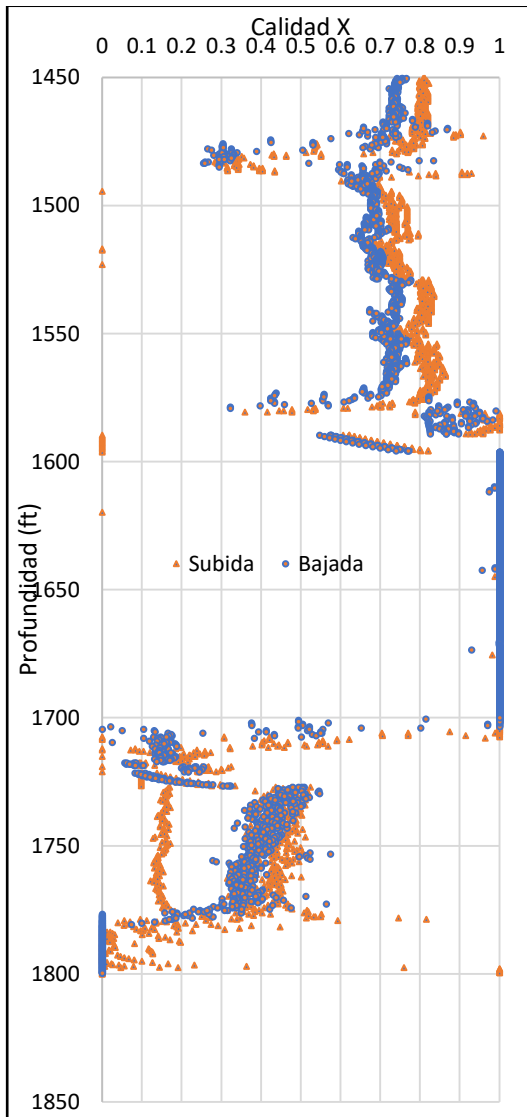
- Tabla de completamiento
- Tabla resumen: Arena, calidad, Flujo másico y calor total por arena
- Medidor: cuantifica el calor por arena en relación al calor total inyectado en superficie
- Grafico circular: Representa porcentajes de distribución de calor y flujo másico por arena
- Perfiles de calidad y densidad de vapor.

Estos resultados pueden ser filtrados por rangos de profundidad o en una herramienta específica.

3.5 PERFIL DE CALIDAD

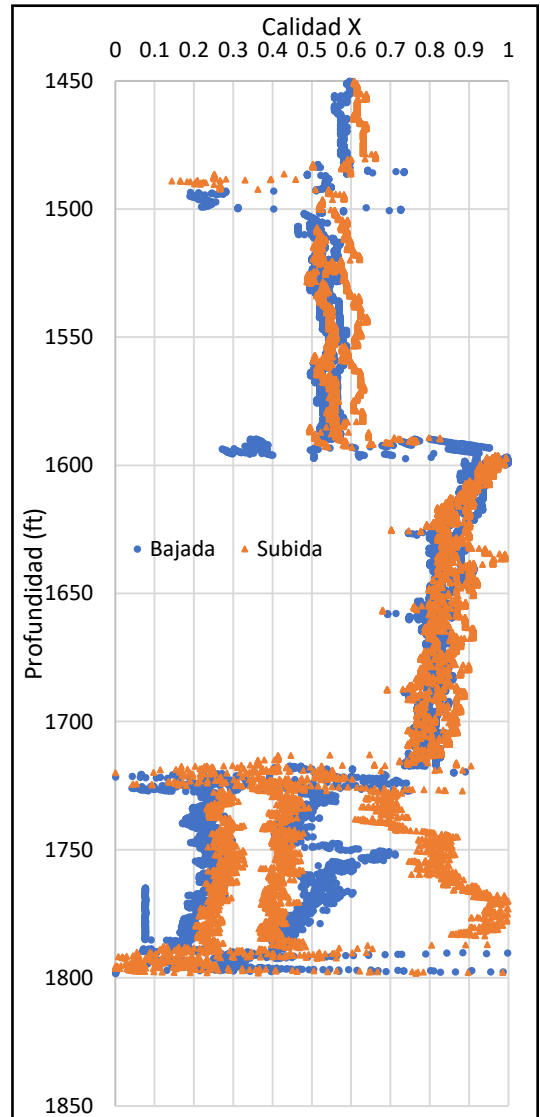
La **Gráfica 3 y Gráfica 4** representa la variación de calidad a lo largo del completamiento durante la corrida de ILT's. Estos perfiles fueron generados por la herramienta digital y exportados a Excel para tener una mejor visualización. Estos datos representados están conformados por cuatro corridas de la herramienta bajando y subiendo para cada fecha. La velocidad del registro varió de 20 ft/min a 135 ft/min.

Gráfica 3. Perfil de calidad 2016



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. Perfil de calidad 2018



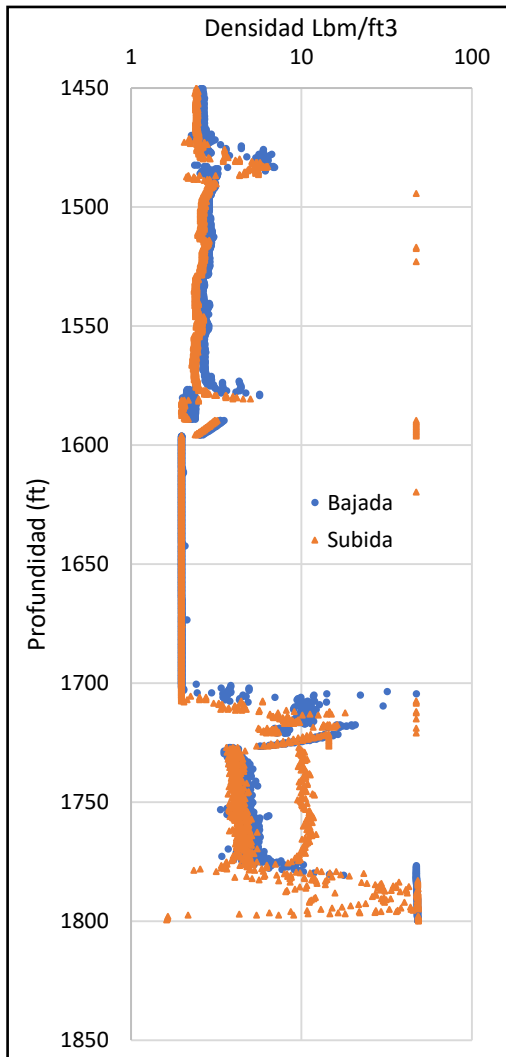
Fuente: elaboración propia.

Se identifica un mayor perfil de calidad en el año 2016 debido a que las condiciones de inyección son más altas, en cuanto a presión y temperatura. Se presenta incertidumbre y variación de perfil principalmente a las profundidades 1523 ft, 1718 ft y 1790 ft correspondientes a los empaques del completamiento. El perfil de subida con respecto a la corrida de la herramienta tiende a ser mayor en ambos casos.

3.6 PERFIL DE DENSIDAD

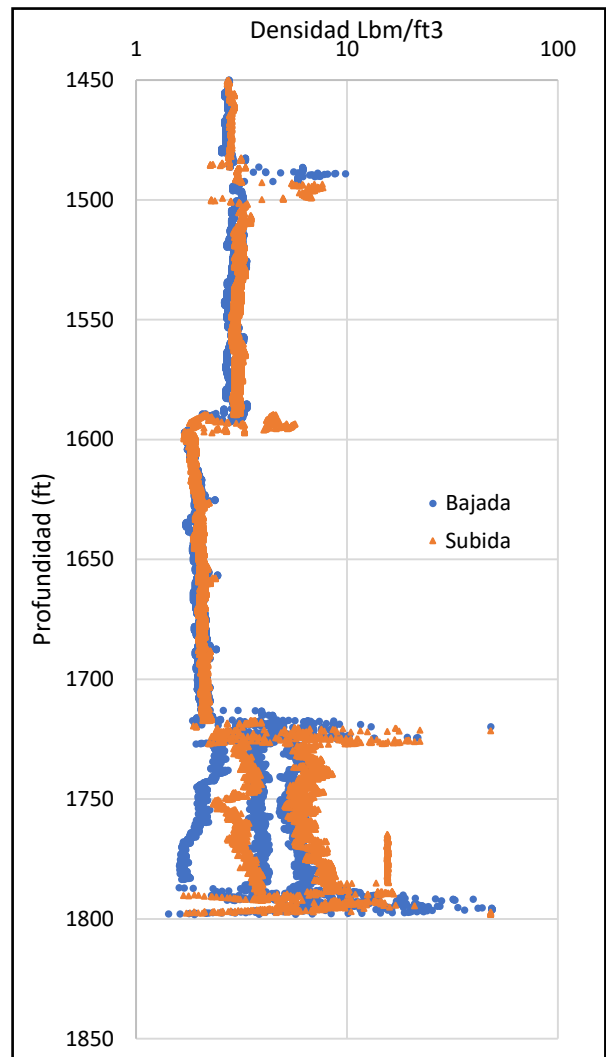
La **Gráfica 5** y **Gráfica 6** representan los perfiles de densidad resultantes calculados mediante la herramienta digital desarrollada, los cuales de una manera muy general permiten determinar la presencia de agua o vapor a lo largo del completamiento.

Gráfica 5. Perfil de densidad 2016



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 6. Perfil de densidad 2018



Fuente: elaboración propia.

De la misma manera que en el perfil de calidad se identifica una fluctuación de datos en los empaques. El perfil de densidad es dependiente del perfil de calidad, basados en que al tener a menor calidad el fluido se aproxima a un estado líquido saturado este tiende a aumentar su densidad y al tener mayor calidad el fluido tiende a ser un vapor sobrecalentado, este disminuye su densidad. Se resalta las densidades en el último mandril, las cuales son muy próximas a la densidad del agua.

La discriminación de datos hace parte del proceso de interpretación de registros y es correspondiente al criterio de cada ingeniero, por lo cual se podría dar más peso a algunas corridas y despreciar otra.

3.7 CALIDAD Y FLUJO MÁSIKO EN CARA DE FORMACIÓN

La **Tabla 7** resume la distribución de flujo volumétrico, flujo másico, energía y calidad, calculadas mediante la **Ecuación 19**, **Ecuación 23**, **Ecuación 27** y **Ecuación 10** respectivamente. Se debe tener en cuenta que se evaluaron cuatro corridas de registros, equivalentes a cuatro corridas de subida y cuatro corridas de bajada.

Tabla 7. Distribución de propiedades por corrida

Aren	Corrida	W_Bls/D		Flujo másico _Lbm/seg		Htotal MMBTUD		Calidad X	
		2016	2018	2016	2018	2016	2018	2016	2018
A1	B1	309,4899	329,511	1,253004	1,334062	121,284	101,5767	0,865647	0,665813
A1	B2	307,6289	286,8455	1,245247	1,161326	121,3284	102,1801	0,896115	0,739608
A1	B3	312,8063	277,494	1,266431	1,123465	120,911	103,0771	0,865854	0,770469
A1	B4	318,5537	287,7823	1,289677	1,165119	120,2652	102,4696	0,825543	0,738914
A1	S1	298,5004	295,9347	1,208512	1,198124	122,1071	102,0304	0,937816	0,737585
A1	S2	300,082	295,9827	1,214915	1,198319	122,2977	102,0576	0,915455	0,747189
A1	S3	299,1614	312,7625	1,211188	1,266254	122,3475	101,8778	0,958455	0,658693
A1	S4	303,4529	289,767	1,228563	1,173154	121,8179	102,5491	0,926398	0,729958
A2	B1	552,3336	628,5316	2,236184	2,454,468	132,909	115,6797	0,244086	0,536872
A2	B2	588,4874	321,6226	2,382557	1,302125	137,0471	124,7253	0,215951	0,495362
A2	B3	595,1828	303,392	2,409664	1,228316	137,7611	127,4208	0,205894	0,52364
A2	B4	584,879	302,7526	2,367948	1,225728	136,3221	123,1576	0,216497	0,591336
A2	S1	534,6373	353,6365	2,164539	1,431737	130,5288	122,8814	0,239522	0,69133
A2	S2	554,5364	360,6408	2,245102	1,460095	132,6417	122,5094	0,243651	0,471511
A2	S3	498,1846	314,1961	2,016956	1,272058	126,4993	125,6567	0,286217	0,353639
A2	S4	523,2121	715,3599	2,118274	2,082345	129,1745	130,5765	0,29025	0,324096
A3	B1	446,2151	173,8891	1,437972	1,668394	65,0481	71,8412	0,028500	0,23806
A3	B2	308,8522	203,7837	1,299133	1,771685	58,78613	86,4158	0,020991	0,202569
A3	B3	280,3259	196,9724	1,251065	1,933354	56,61101	92,6107	0,021037	0,209636
A3	B4	301,9993	184,8071	1,269512	1,897089	57,44576	92,4856	0,021023	0,202787
A3	S1	796,1049	320,5471	1,552085	1,488274	70,09951	90,8836	0,020845	0,113068
A3	S2	783,565	159,7729	1,465118	1,488222	66,15079	90,7664	0,007770	0,236516
A3	S3	345,6302	117,8677	1,696992	1,286824	89,13373	72,2443	0,127145	0,205316
A3	S4	803,2726	216,9471	1,580723	1,455768	66,79664	64,1849	0,020667	0,191519

Fuente: elaboración propia.

La **Tabla 8** representa el promedio de flujo másico y calidad de vapor en cara de formación, los cuales fueron determinados mediante el promedio de distribución de cada corrida. En Ambos casos la sumatoria de flujo másico de las arenas es 4,93 lbm/seg, equivalente al flujo inyectado en superficie.

Tabla 8. Calidad y flujo másico en cara de formación

Arena	Calidad		Flujo másico Lbm/seg	
	2016	2018	2016	2018
A1	0,89891	0,723529	1,2397	1,345478
A2	0,24277	0,510973	2,2426	1,931983
A3	0,03306	0,199934	1,4446	1,642539

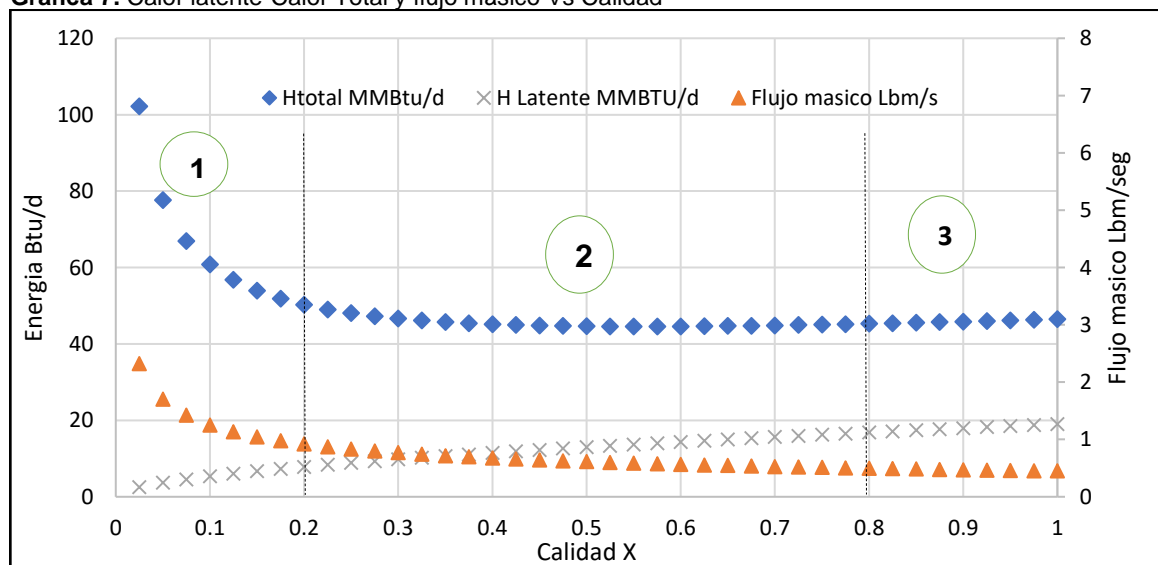
Fuente: elaboración propia

A pesar de tener una distribución másica similar hay una diferencia en aporte energético de 20 MMBTUD atribuidos al diferencial de calidad en los mandriles de aproximadamente 0,17.

En la sesión dos del completamiento, correspondiente a la arena número dos “A2”, se determina igualmente un mayor aporte energético en el 2016 vs 2018, a pesar que en la distribución del 2018 hay calidades superiores en aproximadamente 0,20 unidades, el aporte másico en el 2016 es mayor en 0,3 lbm/seg, generando un diferencial energético de aproximadamente 10 MMBTUD.

La arena número tres “A3” en 2018 tiene un mayor aporte energético, a pesar de tener distribuciones másicas muy próximas, con un diferencial menor a 0,2 lbm/s aproximadamente, la calidad en el 2016 es próxima a 0, es decir vapor con tendencia a condensar y ser inyectado en fase líquida. En comparación con el 2018 la calidad es superior por 0,15 unidades teniendo un mayor aporte energético en 20 MMBTUD. Basados en los análisis de cada sesión de inyección y para dar un mejor entendimiento se construye la **Gráfica 7** a una presión constante de 700 psi.

Gráfica 7. Calor latente-Calor Total y flujo másico Vs Calidad



Fuente: elaboración propia

La **Tabla 9** representa tres posibles escenarios de combinación de propiedades, 1.Alto Flujo másico-Baja calidad, 2.Zona intermedia y 3.Alta calidad- Bajo Flujo másico. Se observa una zona constante de aporte total de calor entre 0,2 y 0,8 fracción de calidad.

La tabla resume el balance de calor entregado en total a las formaciones y las pérdidas de calor para los años 2016 y 2018 sabiendo que se inyectaron 423 MMBTUD.

Tabla 9. Balance de Energía

Años	Calor Entregado_ MMBTUD	Pérdida de calor_ MMBTUD	Pérdida %
2016	320,6643	102,3357	24,2
2018	308,9823	114,0177	27,0

Fuente: elaboración propia

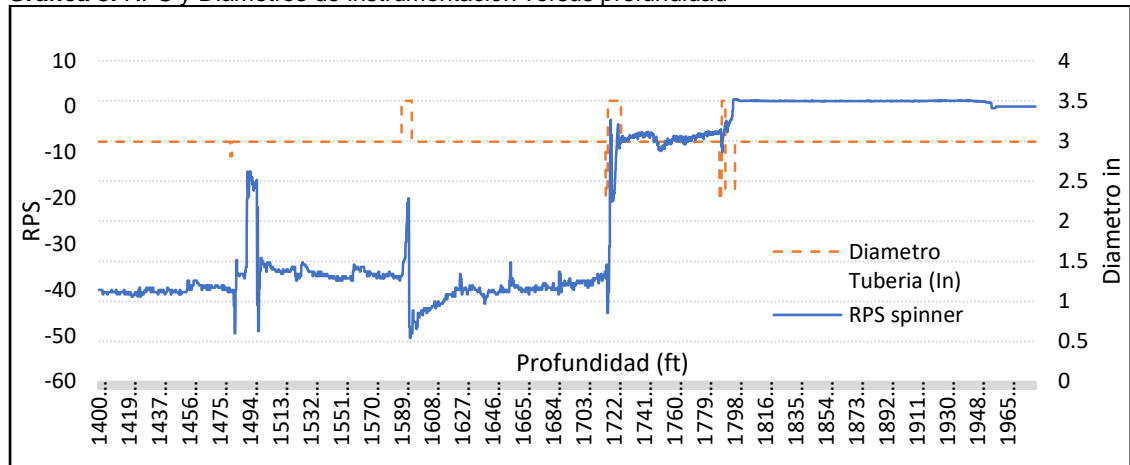
Las pérdidas de calor son muy próximas entre sí y son atribuidas principalmente a fenómenos de conducción tubería, casing, cementó y convección fluido-tubería. Se genera la hipótesis de tener zonas de condensados de vapor que afecten los diferenciales de temperatura generando una mayor pérdida.

3.8 IDENTIFICACIÓN DE FLUIDOS EN MOVIMIENTO

La identificación de fluidos como análisis, se realiza para el completamiento y condiciones vigentes, correspondientes a las del año 2018.

La **Gráfica 8** representa la variación de RPS del spinner versus profundidad, la variación de RPS identifica principalmente el movimiento de fluidos en el interior de la tubería de completamiento.

Gráfica 8. RPS y Diámetros de instrumentación versus profundidad



Fuente: elaboración propia

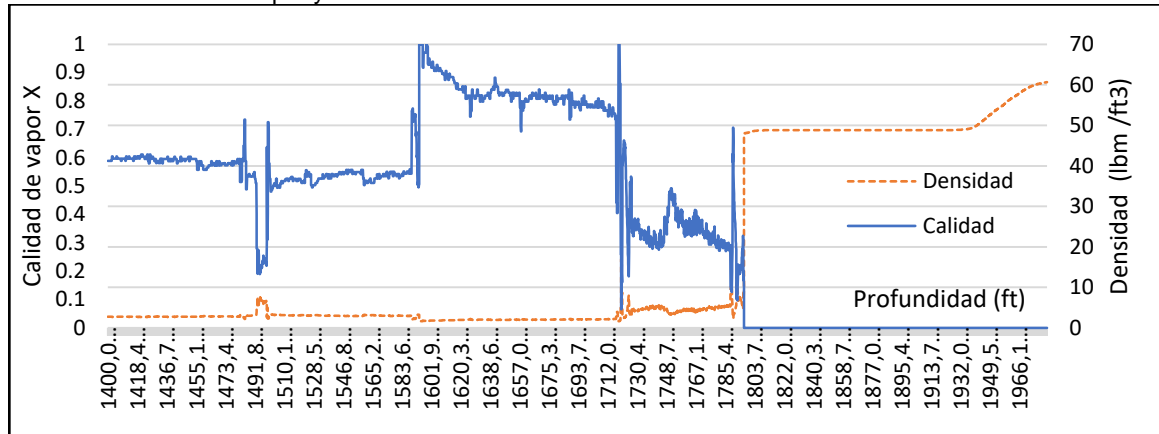
La variación de RPS se da en un sentido negativo debido a que el proceso al cual se está sometiendo la herramienta, es un proceso de inyección, para procesos de producción la variación de esta sería de manera positiva. Se identifica que la variación de RPS principalmente está ligada a cambios de diámetros en tubería, debido a que esta depende de la velocidad del flujo y esta es proporcional al cambio de área de flujo.

Se puede observar en la **Gráfica 8**, que aproximadamente a 1790 pies de profundidad, una vez a se ha pasado el ultimo mandril de distribución, siguen habiendo RPS mínimas y al final del completamiento igualmente se observa un movimiento mínimo del spinner. Por lo cual se infiere que el movimiento del spinner se debe al desplazamiento de la herramienta en un fluido estático, ya que el spinner detecta es una velocidad relativa.

La **Gráfica 9** Representa la variación de calidad y densidad versus profundidad, conociendo que la densidad del agua en estado líquido tiene un rango 59,8 lbm/ft³ a 62,4 lbm/ft³²⁸.

²⁸ CENGEL, Yunus. termodinámica séptima edición, Mexico 2012, p..113

Gráfica 9. Calidad de vapor y densidad Versus Profundidad

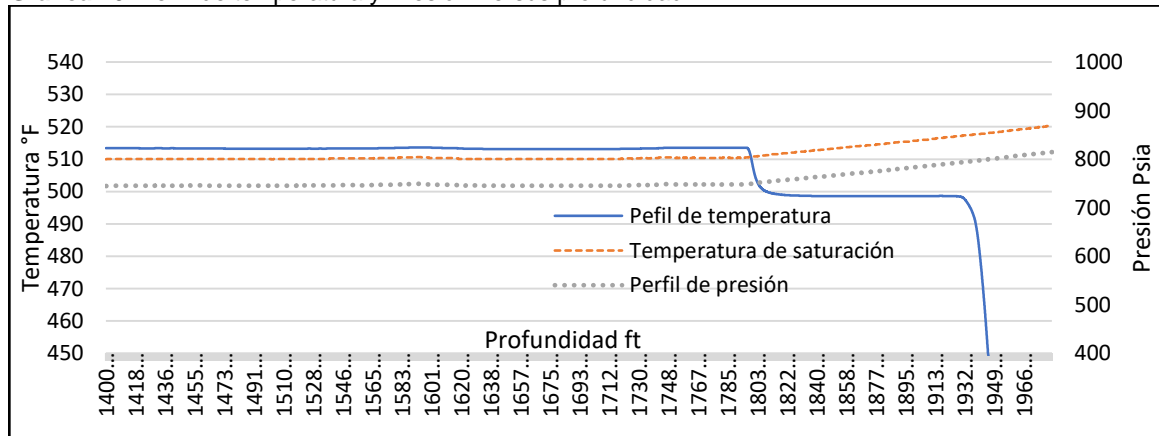


Fuente: elaboración propia.

Inicialmente se determina que la calidad es inversamente proporcional a la densidad del fluido. Se observa una distribución de vapor de agua a lo largo de la tubería con densidades de 2 Lbm/ft³ a 62,4 lbm/ft³, sin embargo, en la última sección después del último mandril a aproximadamente 1926 ft, la densidad presenta un incremento en igual forma que las RPS anteriormente por lo cual se afirma la presencia de un bolsillo de fluido en recirculación termodinámica condensando y re evaporándose, fluido sin movimiento, hasta entrar al mandril de inyección.

El perfil de presión y de temperatura de la **Gráfica 10** permitió identificar de igual forma el estado del fluido.

Gráfica 10. Perfil de temperatura y Presión Versus profundidad



Fuente: elaboración propia.

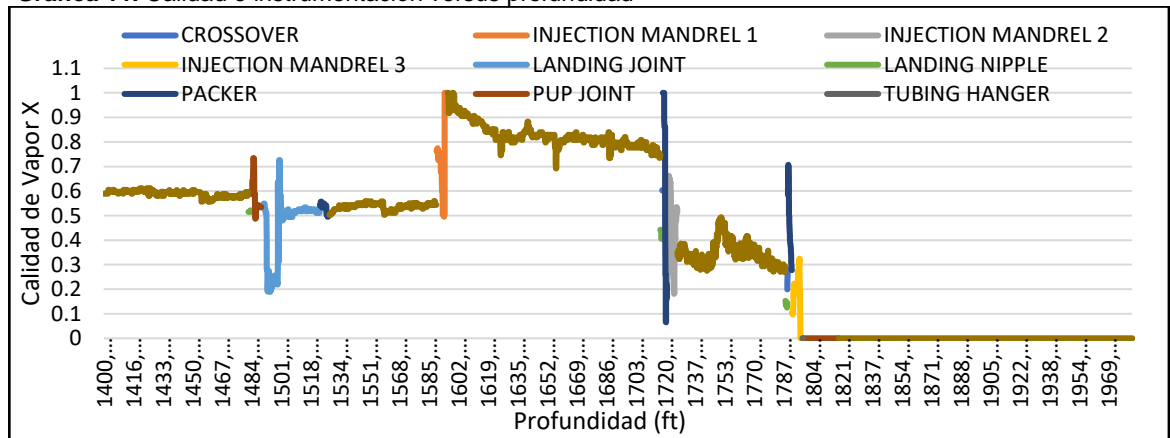
Basados en el criterio de que a una presión constante, la temperatura de saturación es igual a la temperatura del vapor o menor en 3,55°F, este se encuentra en equilibrio líquido vapor. En el intervalo de 1798 a 1925 pies, una vez se a pasado el

distribuidor de fluido disminuye la temperatura y aumenta la presión dado que en esa sección existe un fluido diferente al vapor, que detecta la herramienta en base a las RPS del spinner, sin embargo a partir de los 1925 pies el perfil de temperatura declina hasta llegar a 157 °F; basados en los RPS y el perfil de temperatura se puede intuir presencia de solo condensado en el fondo de la tubería.

3.9 COMPORTAMIENTO DE CALIDAD

La **Gráfica 11** representa la variación de calidad versus profundidad teniendo en cuenta la instrumentación del completamiento.

Gráfica 11. Calidad e instrumentación versus profundidad



Fuente: elaboración propia.

La calidad de entrada en los mandriles de inyección varía en la arena A1 de 50% a 75%, en la A2 20% al 50% y en la A3 de 1% a 24%. Con la **Ecuación 22**, conociendo la calidad del vapor, la presión y el diámetro de la garganta de la tobera, considerando que existe un flujo sónico o crítico, se determina el flujo másico. En caso de que el flujo sea subsónico, se deberá conocer la relación de presión entre la salida y de entrada para aplicar el factor de corrección Z. Debido a que las toberas, se encuentran a una profundidad definida, se estima una distribución proporcional de flujo másico a lo largo del mandril de inyección, dando como resultado el flujo másico de vapor que fluye a través de las toberas.

4. CONCLUSIONES

- La calidad de entrada en los mandriles varía entre 1% a 70%, la variación de calidad para la arena A1 está entre 50-70 %, para la arena A2 28-50% y para la arena A3 1-19%.
- Se estimaron pérdidas entre 102 a 114 MMBTUD equivalentes a un 24% - 27% del calor inyectado en superficie por el generador de vapor entre las líneas del y el completamiento.
- La arena A2 recibe una tasa de 400 a 650 barriles por día de vapor entre 120 a 130 MMBTUD, que equivaldrían a aproximadamente al 30 -35 % del total inyectado.
- Se observan reducciones de calidad de vapor a las profundidades de 1523 ft, 1718 ft y 1790 ft donde se encuentran los empaques, infiriendo la posibilidad de existencia de agua en un proceso de continua ebullición, lo cual incrementaría el coeficiente de transferencia de calor.
- El completamiento del pozo restringe la capacidad de control de flujo másico y calidad de vapor por arena, por lo cual la selectividad y control esta solamente función del número de distribuidores y diámetros de los mismos.
- La calidad y flujo másico de vapor no son variables medibles, son variables que se determinan a partir de mediciones de presión, temperatura y velocidades de flujo, principalmente se deben tener datos de presión, temperatura y velocidad del spinner.
- La metodología propuesta esta validada por datos experimentales y criterios universales como lo son el principio de conservación de masa y energía.
- Al tener una data set bastante densa por el número de corridas, se concluye que determinar las propiedades del vapor mediante la plantilla de Excel o herramientas digitales, automatiza y facilita la manipulación de datos, visualización de datos e interpretación de los mismos.
- El equilibrio térmico e hidráulico de la herramienta es fundamental, ya que permitirán tener una lectura más certera en temperatura y presión, obteniendo de esta manera valores de calidad y flujo másico con mayor precisión.

5. RECOMENDACIONES

- Reducir el número de viajes de ascenso y descenso, permitiendo la estabilización hidráulica y térmica de la herramienta y del spinner. Se propone estandarizar velocidades y número de corridas de registros para pozos de inyección de vapor.
- Establecer estaciones de calibración antes de la entrada de cada mandril de inyección para la estimación precisa de flujo volumétrico.
- Evaluar el completamiento del pozo con fin de determinar y reducir zonas de agua saturada arriba de los empaques, disminuyendo así las pérdidas de calor.
- Comparar resultados a través de software de simulación que incluyan el conformance mecánico.
- Desarrollar un modelo dinámico mediante el uso de simulación numérica, permitiendo determinar pronósticos referentes a la inyección selectiva de vapor tomando los valores de calidad obtenidos mediante la metodología propuesta en éste proyecto.
- Incluir al factor de corrección un modelo iterativo en función threshold del spinner y evaluar su influencia, si se observan viscosidades superiores a 0,5 cp durante la evaluación.

BIBLIOGRAFÍA

A. Nasirisavadkouhi .Velocity Tools in Production Logging., International Campus of Sharif University of Technology.

BAQUERO, Luis y VARGAS, Juan. Evaluación técnico financiera de la inyección de agua en un campo de la cuenca del Catatumbo colombiano mediante simulación analítica. Universidad de América. Facultad de ingenierías. 2018.

BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK: Elsevier. 2009.
Miller, R. W.: "Flow Measurement Engineering Handbook," McGrawHill, New York City (1983).

CASTRUP, Suzanne. Integrated Scinces Group, Latif Faisal,Vintage roduction California LLC, Kalbani Ali Al,OccidentalPetroleum Corporation. Tapered-Bean Steam Chokes Revisited.California ,2012.

CENGEL, Yunus.Termodinámica, Séptima edición, Ed Mc Graw Hill, 2012

CENGEL, Yunus.Transferencia de calor y masa, tercera edición,Mc Graw Hill .México.

C.L. Redus,D.M. Schoen,S.F. Chien, y D. Hall. Kern River Field Test of a Steam Quality Measurement Technique*. SPE 17445, Texaco Inc 1988.

GRISTON, S. 1995. Evaluación de vapor CAUDAL Las ecuaciones para Wellhead Bobinas de choque. Oral SPE 29628 presentación dada en la Reunión de la Región Occidental de la SPE, Bakersfield, California, EE.UU., 8-10 de marzo. Griston, S. y Abate, T. 1996.

HOYOS PERDOMO ,Rubén Darío, Ardila Cubillos Lexly, Muñoz Navarro, Samuel Rincón Canas Fernando, María Mónica, Palma Jorge Mario, Naranjo Suarez Carlos Eduardo, Evaluation of Different Strategies for Selective Steam Injection in Stratified Heavy-Oil Reservoirs,26 septiembre 2016.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN9789588585673, 153 p.

NELDER, Chris. Heavy Oil Of The Kern River Oil Field.24 de junio 2011.

PARTHA S. Sarathi, David K. Olsen. Partical aspects of Steam Injection Processes a Handbook for Independent Operators, Bartlesville,Octubre 1992.

RANGEL GERMÁN, Edgar.. El futuro de la producción de aceite en México: Recuperación avanzada y mejorada IOR-EOR. Comisión Nacional de Hidrocarburos, México 2012.

SZE-FOO CHIEN, James L. G. Determination of Steam Quality and Flow Rate Using Pressure Data From an Orifice Meter and a Critical Flowmeter. Technology Dept.. Texaco Inc.1995.

ANEXOS

ANEXO A

ENCABEZADO DEL REGISTRO CORRIDO 06/21/2016

```

~VERSION INFORMATION
VERS.          2.0 :CWLS LOG ASCII STANDARD - 2.0
WRAP.         NO  :One line per depth step
~WELL INFORMATION
STRT.ft              -7.50000: START DEPTH
STOP.ft             1965.00000: STOP DEPTH
STEP.ft              0.50000: STEP
NULL.              -999.25000: NULL VALUE
COMP.                : COMPANY
WELL.                : WELL
FLD.                 : FIELD
LOC.                 : LOCATION
PROV.                : PROVINCE
UWI.                 : UNIQUE WELL ID
SRVC.                : SERVICE COMPANY
DATE.                06-21-2016: DATE
~CURVE INFORMATION
#MNEM.UNIT          Curve Description
#-----
DEPT.ft             : curve 1  Depth
CCL.                 : curve 2  CCL
CS.F/MN             : curve 3  Cable Speed
FLOW.rps            : curve 4  Flow Meter
GR.GAPI             : curve 5  Gamma Ray
PPRE.psia           : curve 6  Pressure
TEMP.°F             : curve 7  Temperature
~PARAMETER INFORMATION
~OTHER INFORMATION
~ASCII LOG DATA
-7.50000  8589549.82404  25.47160  3.85000  27.25499  866.65390  529.55182
-7.00000  9607292.99067  37.12593  3.23548  20.93432  866.86773  529.58068
-6.50000  7460885.00263  46.34743  -52.86597  16.25544  866.89350  529.60192
-6.00000  9464433.36068  56.00336  -54.29590  17.48302  866.70451  529.62356
-5.50000  2965771.72095  65.86984  -54.68513  19.56418  866.44970  529.64411
-5.00000  10454400.00000  70.80943  -54.50000  17.93161  866.33014  529.65864
-4.50000  8633267.61493  75.25106  -54.50000  15.31865  866.29757  529.66922
-4.00000  9063296.00000  79.69269  -58.61884  11.80854  866.27112  529.68242
-3.50000  7683712.00000  84.27918  -63.00000  8.98349  866.22889  529.69539
-3.00000  12900717.50118  88.88152  -63.00000  7.30148  866.13847  529.71141
-2.50000  7410560.00002  93.48386  -63.00000  7.37052  866.07129  529.72349
-2.00000  8486299.57205  95.55433  -58.00000  8.90836  866.01803  529.73997
-1.50000  8360006.39133  96.32171  -58.00000  10.25087  866.01358  529.75376
-1.00000  8453350.04434  97.08909  -58.00000  10.61713  866.04205  529.77326
-0.50000  8557539.24417  97.28568  -55.00000  9.79932  866.07364  529.78675
0.00000   11972992.00000  96.63817  -55.00000  7.93207  866.12310  529.80725
0.50000   6986377.21704  95.99065  -55.00000  8.00489  866.14419  529.82287
1.00000   6714647.65815  95.36095  -56.57244  11.53442  866.12442  529.84350
1.50000   8244096.04985  94.81753  -57.00000  17.19913  866.07705  529.86057
2.00000   8371057.46432  94.27632  -57.00000  26.12578  866.02147  529.88367
2.50000   8336242.46894  93.84728  -54.91073  30.31008  866.03754  529.90001
3.00000   8339158.74914  94.05182  -54.50000  29.75654  866.12101  529.92044
3.50000   8411422.77711  94.27909  -54.50000  26.46234  866.19320  529.93498
4.00000   8365256.66187  94.54785  -56.80397  21.15428  866.27609  529.95513
4.50000   8374469.78162  95.24589  -61.00000  19.05789  866.31499  529.96981
5.00000   8354821.61827  95.97360  -61.00000  18.79356  866.34779  529.98528
5.50000   8342560.00000  96.70131  -61.48136  18.70224  866.37070  529.99116

```


ENCABEZADO DEL REGISTRO CORRIDO 04/15/2018

```

~VERSION INFORMATION
VERS.                2.0:  CWLS LOG ASCII STANDARD - VERSION 2.0
WRAP.                NO:  ONE LINE PER DEPTH STEP

~WELL INFORMATION BLOCK
#MNEM.UNIT          DATA              DESCRIPTION OF MNEMONIC
#-----
STRT.feet          1.90                : START DEPTH
STOP.feet          1969.80             : STOP DEPTH
STEP.feet          0.1                 : STEP VALUE
NULL.              -999.25             : NULL VALUE
COMP.              : COMPANY NAME
WELL.              : WELL NAME
FLD.               : FIELD NAME
LOC.               : LOCATION
API.               : API REFERENCE NUMBER
CTRY.              : COUNTRY
CNTY.              : COUNTY
STAT.              : STATE
SRVC.              : SERVICE COMPANY
DATE.              04/15/2018         : LOGDATE {MM-DD-YYYY}
UWI.               : UNIQUE WELL IDENTIFIER

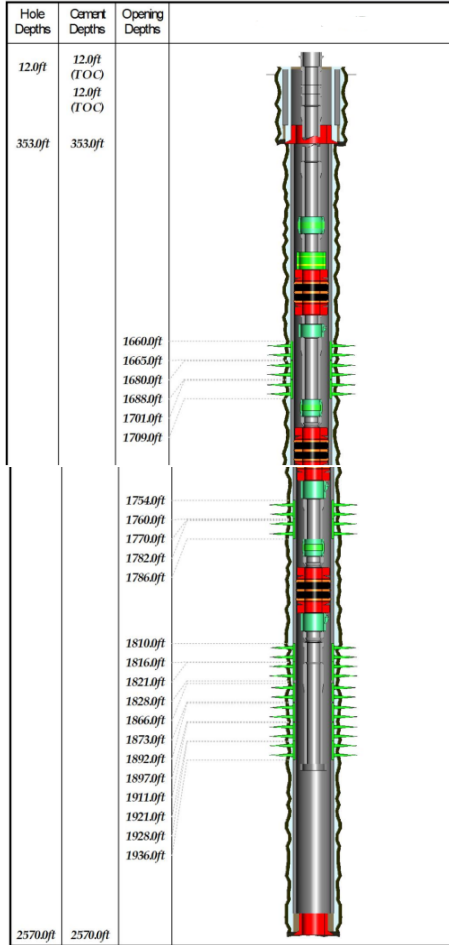
~CURVE INFORMATION
#MNEM.UNIT          API CODE          CURVE DESCRIPTION
#-----
DEPT.feet           : 1 DEPTH
LSPD.ft/m           : 2 SPEED
GR.gCounts          : 3 GAMMA-RAY
CCL.counts          : 4 CCL
SPIN.rps            : 5 SPINNER
PPSP.psia           : 6 PRESSURE
TEMP.degF           : 7 TEMPERATURE

~PARAMETER INFORMATION
~OTHER INFORMATION SECTION
~A   DEPT      LSPD      GR      CCL      SPIN      PPSP      TEMP
    1.90      51.49      25.62  8536960.00  6.96      837.20    525.69
    2.00      51.97      26.01  8518285.00  6.96      837.24    525.69
    2.10      52.50      26.33  8331548.00  6.96      837.26    525.69
    2.20      52.12      27.17  8200832.00  6.38      837.28    525.70
    2.30      51.91      28.30  8349185.00  5.68      837.29    525.70
    2.40      52.02      29.72  8497536.00  5.18      837.31    525.70
    2.50      52.28      31.25  8422943.00  5.02      837.34    525.71
    2.60      52.47      32.53  8420352.00  4.93      837.37    525.71
    2.70      52.23      33.17  8426624.00  4.79      837.43    525.71
    2.80      51.74      34.02  8410980.00  4.95      837.46    525.71
    2.90      51.05      34.66  8271590.00  5.28      837.48    525.72
    3.00      51.12      34.95  8485569.00  5.55      837.52    525.72
    3.10      51.17      34.77  8585088.00  5.67      837.56    525.72
    3.20      50.99      34.48  7781501.00  5.68      837.60    525.73
    3.30      51.30      33.96  6977920.00  4.93      837.62    525.73
    3.40      51.80      32.73  7604104.00  5.01      837.63    525.73
    3.50      52.31      31.26  8652647.00  5.14      837.64    525.74
    3.60      52.58      29.65  6747520.00  4.89      837.63    525.74
    3.70      52.28      28.74  7062688.00  4.58      837.61    525.74
    3.80      51.94      27.63  8262276.00  5.00      837.59    525.75
    3.90      51.68      25.99  9416832.00  5.08      837.57    525.75
    4.00      51.38      24.63  8211552.00  5.82      837.56    525.75

```

ANEXO B

ESTADO MECÁNICO 2016



REFERENCE DATUM	
Coord X (E/W): 943447.54m	Original KB: 489.9ft
Coord Y (N/S): 1,161,726.13m	Ground Level: 475.1ft

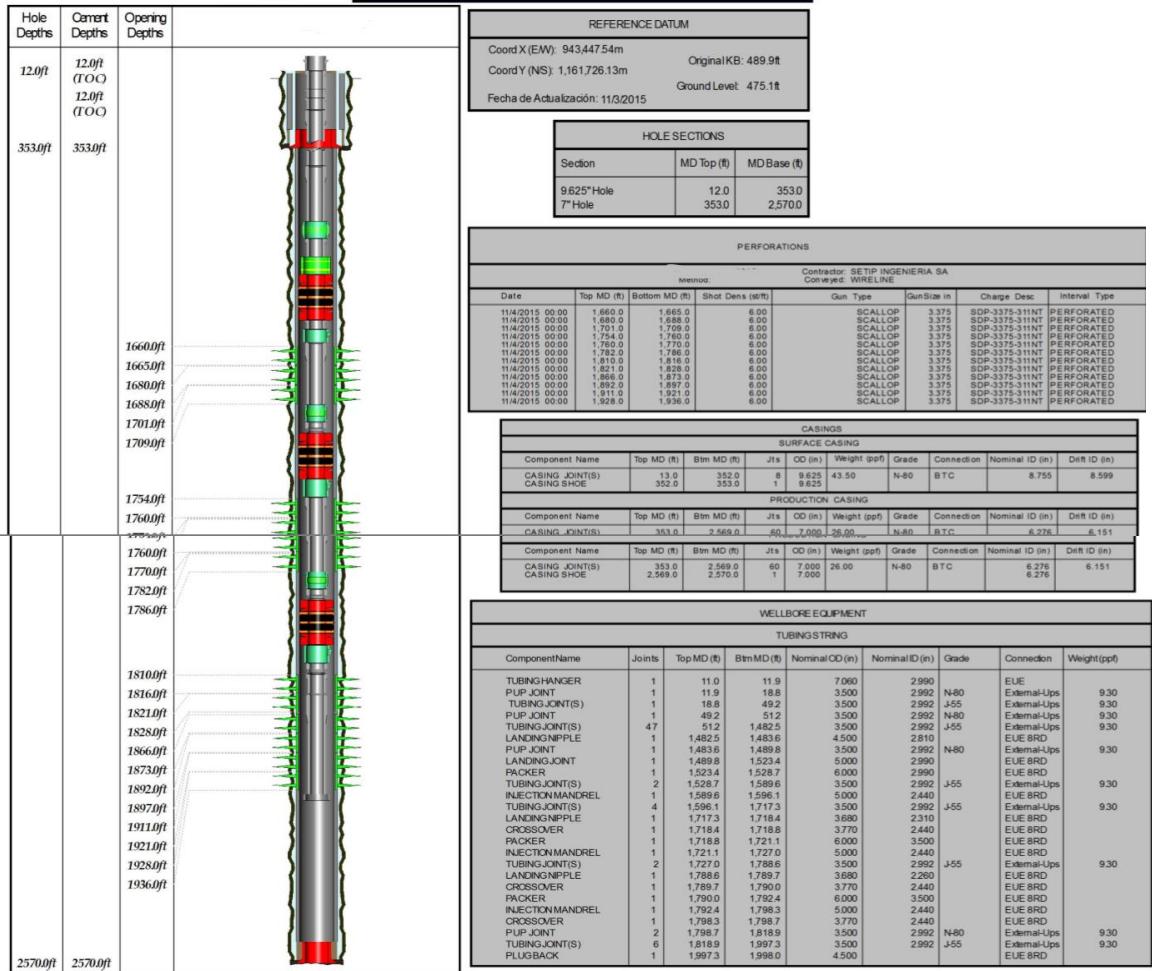
HOLE SECTIONS		
Section	MD Top (ft)	MD Base (ft)
9.625" Hole	12.0	353.0
7" Hole	353.0	2570.0

PERFORATIONS									
Method: Contractor: SETIP INGENIERIA SA Conveyed: WIRELINE									
Date	Top MD (ft)	Bottom MD (ft)	Shot Dens (#/ft)	Gun Type	Gun Size in	Charge Desc	Internal Type		
11/4/2015 00:00	1,669.0	1,665.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,666.0	1,666.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,701.0	1,709.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,724.0	1,760.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,769.0	1,770.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,792.0	1,786.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,810.0	1,816.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,821.0	1,826.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,866.0	1,873.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,892.0	1,897.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,911.0	1,921.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		
11/4/2015 00:00	1,928.0	1,936.0	6.00	SCALLOP	3.375	SDP-3375-311NT	PERFORATED		

CASINGS									
SURFACE CASING									
Component Name	Top MD (ft)	Btn MD (ft)	Jts	OD (in)	Weight (ppf)	Grade	Connection	Nominal ID (in)	Drift ID (in)
CASING JOINT(S)	15.0	353.0	8	9.875	43.50	N-80	BTC	8.755	8.599
CASING SHOE	353.0	353.0	1	9.875					
PRODUCTION CASING									
Component Name	Top MD (ft)	Btn MD (ft)	Jts	OD (in)	Weight (ppf)	Grade	Connection	Nominal ID (in)	Drift ID (in)
CASING JOINT(S)	353.0	2,669.0	60	7.000	26.00	N-80	BTC	6.276	6.151
CASING SHOE	2,669.0	2,670.0	1	7.000				6.276	

WELLBORE EQUIPMENT								
TUBING STRING								
Component Name	Joints	Top MD (ft)	Btn MD (ft)	Nominal OD (in)	Nominal ID (in)	Grade	Connection	Weight (ppf)
TUBING HANGER	1	11.0	11.9	7.060	2.990			
PUP JOINT	1	11.9	18.8	3.500	2.992	N-80	External-Ups	9.30
TUBING JOINT(S)	1	18.8	49.2	3.500	2.992	J-55	External-Ups	9.30
PUP JOINT	1	49.2	51.2	3.500	2.992	N-80	External-Ups	9.30
TUBING JOINT(S)	47	51.2	1,482.5	3.500	2.992	J-55	External-Ups	9.30
LANDING NIPPLE	1	1,482.5	1,483.8	4.500	2.810		EUE BRD	
PUP JOINT	1	1,483.8	1,489.8	3.500	2.992	N-80	External-Ups	9.30
LANDING JOINT	1	1,489.8	1,523.4	5.000	2.990		EUE BRD	
PACKER	1	1,523.4	1,528.7	6.000	2.990		EUE BRD	
TUBING JOINT(S)	2	1,528.7	1,589.6	3.500	2.992	J-55	External-Ups	9.30
INJECTION MANDREL	1	1,589.6	1,596.1	5.000	2.440		EUE BRD	
TUBING JOINT(S)	4	1,596.1	1,717.3	3.500	2.992	J-55	External-Ups	9.30
LANDING NIPPLE	1	1,717.3	1,718.4	3.680	2.310		EUE BRD	
CROSSOVER	1	1,718.4	1,718.8	3.770	2.440		EUE BRD	
PACKER	1	1,718.8	1,721.1	6.000	3.500		EUE BRD	
INJECTION MANDREL	1	1,721.1	1,727.0	5.000	2.440		EUE BRD	
TUBING JOINT(S)	2	1,727.0	1,786.6	3.500	2.992	J-55	External-Ups	9.30
LANDING NIPPLE	1	1,786.6	1,789.7	3.680	2.260		EUE BRD	
CROSSOVER	1	1,789.7	1,790.0	3.770	2.440		EUE BRD	
PACKER	1	1,790.0	1,792.4	6.000	3.500		EUE BRD	
INJECTION MANDREL	1	1,792.4	1,798.3	5.000	2.440		EUE BRD	
CROSSOVER	1	1,798.3	1,798.7	3.770	2.440		EUE BRD	
PUP JOINT	2	1,798.7	1,816.9	3.500	2.992	N-80	External-Ups	9.30
TUBING JOINT(S)	6	1,816.9	1,997.3	3.500	2.992	J-55	External-Ups	9.30
PLUGBACK	1	1,997.3	1,998.0	4.500			EUE BRD	

ESTADO MECÁNICO 2018



ANEXO C

146 DATOS EXPERIMENTALES

QmfcZ/Pd	Calidad	2,892584	0,7704	3,330224	0,4902	4,254442	0,3113
{2	X	2,898168	0,7701	3,340385	0,569	4,275734	0,343
2,529581	0,929	2,90521	0,844	3,342361	0,564	4,322329	0,3515
2,556243	0,905	2,906245	0,5887	3,348202	0,579	4,325889	0,3551
2,561335	0,902	2,914363	0,7328	3,380973	0,5887	4,443961	0,2951
2,563457	0,896	2,91642	0,581	3,387769	0,5845	4,523103	0,1965
2,571444	0,896	2,926578	0,6944	3,389604	0,3959	4,548032	0,1936
2,574515	0,891	2,952041	0,7903	3,438762	0,3893	4,594306	0,1842
2,577377	0,888	2,95485	0,815	3,44058	0,391	4,621036	0,1836
2,578655	0,886	2,955517	0,788	3,443314	0,5741	4,968605	0,2422
2,580228	0,885	2,96465	0,809	3,451179	0,5748	5,058669	0,2407
2,581808	0,884	2,96599	0,81	3,470376	0,5904	5,067708	0,2351
2,584721	0,7979	2,972213	0,805	3,490392	0,5853	5,091846	0,2258
2,585143	0,883	2,975136	0,802	3,497169	0,4755	5,098958	0,2241
2,588948	0,8009	2,988591	0,7386	3,50275	0,3688	5,21759	0,2059
2,708378	0,6848	2,98926	0,795	3,566603	0,4626	5,282826	0,2024
2,709317	0,686	3,000842	0,759	3,586086	0,4195	5,333619	0,1821
2,730081	0,8759	3,005326	0,7602	3,62596	0,3458	5,358148	0,2008
2,733996	0,7622	3,014957	0,7414	3,650683	0,4276	5,389709	0,1786
2,750541	0,7654	3,019695	0,62114	3,723054	0,4402	5,390998	0,1979
2,757147	0,94	3,038296	0,768	3,755668	0,3992	5,39279	0,2191
2,757614	0,8686	3,042148	0,766	3,768091	0,4497	5,393169	0,208
2,76057	0,939	3,044674	0,765	3,780834	0,4785	5,399654	0,194
2,765412	0,932	3,047711	0,763	3,810382	0,4813	5,419767	0,1948
2,768701	0,93	3,049682	0,762	3,82038	0,4307	5,568787	0,1781
2,769762	0,928	3,052727	0,6591	3,834615	0,4158	5,687835	0,183
2,771895	0,7638	3,054986	0,759	3,836766	0,4212	5,693693	0,1931
2,776255	0,8555	3,057553	0,758	3,869535	0,3821	5,820886	0,1797
2,781938	0,923	3,059438	0,757	3,887616	0,4032	5,885939	0,1805
2,79192	0,7571	3,063987	0,6083	3,910545	0,4068	5,975079	0,178
2,796188	0,7944	3,073438	0,6059	3,924453	0,4054	6,089059	0,1542
2,803791	0,908	3,112823	0,6297	3,946721	0,4173	6,188728	0,1815
2,814557	0,899	3,142483	0,6494	3,978861	0,3951	6,28319	0,1737
2,825871	0,8393	3,196606	0,6044	3,985971	0,4069	6,381481	0,1493
2,839453	0,884	3,239009	0,6025	4,021408	0,3766		
2,846781	0,6387	3,278303	0,6058	QmfcZ/Pd	Calidad		
2,872945	0,6312	QmfcZ/Pd	Calidad	{2	X		
QmfcZ/Pd	Calidad	{2	X	4,052433	0,3853		
{2	X	3,312892	0,6051	4,064666	0,3605		

ANEXO D

Perfiles de Calidad, Densidad, Presión y Temperatura

