

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE
RECOBRO TÉRMICO *HUFF & PUFF* DEFINIENDO LÍMITES DE TRABAJO
BAJO CONDICIONES ACTUALES MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA,
APLICADO A CAMPO JAZMÍN.**

**LINA PAOLA BECERRA CALA
MARÍA ANGÉLICA YUNEZ CALVO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE
RECOBRO TÉRMICO *HUFF & PUFF* DEFINIENDO LÍMITES DE TRABAJO
BAJO CONDICIONES ACTUALES MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA,
APLICADO A CAMPO JAZMÍN.**

**LINA PAOLA BECERRA CALA
MARÍA ANGÉLICA YUNEZ CALVO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**DIRECTOR
ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ
M.Sc. Ingeniero de Petróleos**

**CO-DIRECTORES:
ING. ARLEN ROCIO CHANAGA QUIROZ
ING. GUSTAVO ANDRÉS VALLE TAMAYO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios por regalarme lo más preciado que tengo, la vida y mi fe en el mismo, por mostrar su presencia en cada paso de mi camino y tomarme de su mano para ser mi guía siempre.

A mi motor, mi mejor amiga, mi superhéroe, Mi Madre, por apoyarme en cada paso que decido dar, por levantarme y caminar conmigo cuando siento que no puedo sola, por escucharme y aconsejarme siempre, por ser la mujer más luchadora y sacarme adelante pese a las adversidades, por ti soy quien soy ahora, a ti te debo todo, eres mi mejor regalo y ejemplo de lucha y valentía, esta meta es tuya, porque nunca dudaste de mí, y me acompañaste con amor en cada etapa de este camino, eres mi vida.

A mi Padre por escuchar mis aventuras y reír junto a mí, por la gran confianza y orgullo que sintió siempre al tenerme a su lado, por regalarme sus consejos y recordarme que todo con fe y lucha es posible, por tomarme de su mano y ayudarme a enfrentar el mundo juntos y por soltarme y no dudar de mi cuando fue necesario.

Al feo por ser como un padre para mí, mi mejor amigo, por llenarme de sonrisas, por apoyarme en cada idea que se me ocurría, por escucharme pacientemente y limpiar mis lágrimas, por nunca dudar de mi ni de mis capacidades, por el orgullo que mostro siempre de tener una nueva hija, por regalarnos esta linda familia. A mi tía Lorena por ser mi compañera de aventuras, una madre más que me regalo Dios y la vida, por su hermosa energía que alegra y hace sonreír un mundo entero, por su apoyo constante, porque así tuviera mil ocupaciones siempre sacaba tiempo para escuchar mis problemas y regalarme un consejo, porque nunca dudo de mí, al contrario confió en mi persona más que yo misma y se encargó de que yo recordara siempre que no había nada que no pudiera lograr en la vida.

A mis nonos por soñar con ver este día, por no dudar ni un instante de que lograría esta meta y todas las demás que pasaran por mi cabeza, por confiar en mí, son el mejor ejemplo de lucha y perseverancia que he conocido.

A mi familia por acompañarme en cada etapa de este camino, por estar siempre para mí cuando los he necesitado, por apoyarme y confiar plenamente en la persona que soy, por su amor, sus consejos y su compañía.

A Sebastián Ortiz, una gran bendición que tuve la fortuna de encontrar en mi camino, por llenar de colores cada espacio de mi vida, por regalarme sus sonrisas,

su amor, por acompañarme en esta etapa y apoyarme en cada ocurrencia, por confiar en mí y hacerme sentir segura a su lado, por celebrar junto a mí los buenos momentos y por ayudarme a superar los malos, por recordarme la mujer y persona que soy cada día, Te Amo.

A las hermanas que me regalo la vida Jen y Helena, por convertirse en parte de mi familia, por hacer más emocionante y divertido este camino, por apoyarme en los buenos y malos momentos, por llorar junto a mí y regañarme cuando fue necesario, por su grandiosa amistad y maravillosos consejos, por regalarme la fortuna de conocerlas, por las infinitas risas, las ocurrencias, las largas noches de estudio, los grandiosos momentos a su lado, por confiar en mi aun por encima de mis propias creencias, por demostrarme que aun al otro lado del mundo siempre estarán aquí para lo que necesite.

A Ancherly, Osqui, Migue, Xiomy, Brucxen y Miriam por su acompañamiento constante en cada etapa de este camino, por las grandes aventuras y risas con las alegraron mi vida, por los buenos consejos y maravillosos momentos que me regalaron, por cada ocurrencia y por su apoyo y confianza en cada paso que daba. A la Ingeniera Arlen Chanaga por regalarme la fortuna de contar con su amistad, de escuchar sus consejos, de recibir sus conocimientos, por las risas y la confianza que me regalo, por su humildad y nobleza.

A María Angelica por confiar en mi para llevar a cabo la realización de este proyecto, por ser una gran compañera, gentil, honesta y responsable, por los días de trabajo y preocupación, por las buenas conversaciones y el gran equipo de trabajo.

Lina

DEDICATORIA

Primero que todo le dedico este logro alcanzado a Dios, por permitirme llegar donde me encuentro y siempre mostrarme el camino que debo seguir para alcanzar mis sueños.

Seguidamente, todo este esfuerzo valió la pena por mis padres; Tullia y Luis, y mi Tata, sin su apoyo incondicional y amor, este gran sueño no hubiera sido posible. Solo puedo decirles ¡¡GRACIAS!!, por estar ahí siempre para mí, por nunca desampararme y ser mis consejeros de cabecera. Se que ustedes también tuvieron que afrontar momentos difíciles para lograr mantenerme donde estoy, por eso y más, siempre serán mi motivo para salir adelante. Espero poder hacer que se sientan siempre orgullos de mí, porque cualquier esfuerzo que he hecho en mi vida ha sido en pro de lograr mejorar sus vidas, porque son lo más importante para mí. Deseo que esten e mi lado en cada triunfo que alcance, que los tenga a mi lado cien años de vida. LOS AMO CON TODO MI CORAZON.

A mis amigos de la universidad; Mayra, mi amiga fiel, aunque nunca escuché los consejos que le brindó con todo mi amor y solo los ignora, pero que a pesar de eso siempre me ayuda en todo; José G., mi amigo gruñón del grupo, el que es bueno para hacerle bullýing a los demás, pero a pesar de eso muy en el foooooondo de su corazón sé que me quiere; Daniel, amigo incondicional, con el cual siempre puedo contar cuando necesito de un consejo o apoyo, porque es el sensato de mis amigos; Jota y Pipe D.; los amigos vácanos, los que siempre me sacan una sonrisa en cualquier momento del día con sus ocurrencias, a Uds. amigos de mi alma aspiro seguirlos teniendo presente en mi vida. Se que me tuvieron que aguantar gritos, regaños; pero también tuvimos momentos inolvidables, los que espero que se repitan cuando ya estemos viejitos, ya que cualquier cosa que hacíamos nos la gozábamos. Ustedes son la familia que me brindó Santander.

A Pipe, compañero de este ratito de vida, gracias por acompañarme en mis momentos difíciles, por ser mi pañuelo de lágrimas, por aguantarme mis berrinches y cambios de estado de ánimo, por iluminar mi vida con pequeños detalles, que me demuestran que a pesar de la distancia siempre estoy presente en tu vida, así como tú en la mía. Pero sobre todo te agradezco haber llegado a mi vida, por ser la clase de hombre que eres todo un caballero, por ser tan especial y dulce conmigo, espero que pueda seguir compartiendo muchas más aventuras a tu lado.

Finalmente le agradezco a todas las personas con las que compartí alguna etapa en la universidad, a mi compañera de tesis, Lina; a mis compañeros de estudio y profesores, por ayudar a formarme como profesional y hacer de esta vivencia, una gran experiencia.

María A.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por mostrarnos el camino correcto, por ser guía en este pasaje de la vida y acompañarnos en cada etapa regalándonos su bendición en cada paso que damos.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de ingeniería de petróleos por hacer posible la realización de nuestro sueño y otorgarnos la oportunidad de seguir soñando, formándonos como personas íntegras profesional y personalmente.

A los profesores por ser nuestros guías en este proceso, enseñarnos sus conocimientos, dedicarnos su tiempo, por su paciencia y gran trabajo en la construcción de profesionales y personas éticas.

A nuestro director de tesis el ingeniero Erick Montes por llevarnos de su mano en la realización de este proyecto, por confiar en nosotras y transmitirnos sus conocimientos en cada etapa de este plan de trabajo.

A nuestra Codirectora la ingeniera Arlen Chanaga por su guía constante, por su acompañamiento en el desarrollo de nuestras prácticas y regalarnos toda su experiencia para la realización de esta tesis y para nuestros proyectos futuros.

A nuestro codirector el ingeniero Gustavo por su guía con la herramienta computacional PIPESIM.

A Mansarovar Energy Colombia por apoyarnos en la realización de las pasantías en tan prestigiosa compañía, permitiéndonos entender de forma práctica el conocimiento adquirido y por poner a nuestra disposición excelentes profesionales y trabajadores que nos apoyaron y enseñaron en este proceso.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES DE CAMPO JAZMÍN	22
2. FACILIDADES DE SUPERFICIE PARA LA INYECCIÓN DE VAPOR .	26
2.1 GENERADOR DE VAPOR.....	26
2.2 DISTRIBUIDOR DE VAPOR	27
2.3 TRAMPAS PARA VAPOR.....	29
2.3.1 Trampas mecánicas	30
2.3.2 Trampas termostáticas.....	30
2.3.3 Trampas termodinámicas.....	32
3. PÉRDIDAS DE CALOR PRESENTES EN EL PROCESO DE INYECCIÓN DE VAPOR	33
3.1 PÉRDIDAS DE CALOR EN EL GENERADOR DE VAPOR.....	33
3.2 PÉRDIDAS DE CALOR EN LINEAS DE SUPERFICIE.....	36
3.3 PÉRDIDAS DE CALOR EN TRAMPAS PARA VAPOR Y FUGAS ..	39
4. MECANISMOS DE CONTROL DE PÉRDIDAS DE CALOR	42
5. CASO DE ESTUDIO (CAMPO JAZMÍN)	48
5.1 ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN CAMPO JAZMÍN	48
5.2 DIÁMETRO ÓPTIMO DE LAS LINEAS DE SUPERFICIE	53
5.3 EVALUACIÓN DE AISLANTES TÉRMICOS.....	55

5.4	DIÁMETRO ÓPTIMO DEL AISLANTE TÉRMICO	59
5.4.1	Costo total del proyecto.....	60
5.4.1.1	Costo del aislante	61
5.4.1.2	Costo de la generación de vapor	62
5.5	DISTANCIA ÓPTIMA PARA TUBERIA ENTERRADA.....	65
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	68
7.	CONCLUSIONES.....	70
8.	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización Campo Jazmín.....	23
Figura 2. Esquema de generador de vapor	27
Figura 3. Trampa mecánica convencional.....	30
Figura 4. Trampa termostática convencional tipo fuelle.....	31
Figura 5. Trampa termodinámica convencional tipo disco	32
Figura 6. Pérdidas de por radiación.....	35
Figura 7. Mixer Stratifier.....	43
Figura 8. SpliTigator.....	44
Figura 9. Veleta pre-separadora y difusores.....	46
Figura 10. Gráfica de Presión Vs Distancia.....	51
Figura 11. Gráfica de Temperatura Vs Distancia.....	52
Figura 12. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia.....	52
Figura 13. Gráfica de Presión Vs Distancia.....	56
Figura 14. Gráfica de Temperatura Vs Distancia.....	56
Figura 15. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia.....	57
Figura 16. Gráfica de Presión Vs Distancia.....	58
Figura 17. Gráfica de Temperatura Vs Distancia.....	58
Figura 18. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia.....	59
Figura 19. Diferencia costo total y ahorro aparente con aislantes de 2” y 3”	64

Figura 20. Gráfica de Presión Vs Distancia.....	66
Figura 21. Gráfica de Temperatura Vs Distancia.....	66
Figura 22. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia.....	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros operativos actuales y óptimos del Campo Jazmín.....	25
Tabla 2. Fugas de vapor.....	41
Tabla 3. Generador de vapor.....	49
Tabla 4. Líneas de superficie.....	50
Tabla 5. Comparación de diferentes diámetros de línea de superficie.....	54
Tabla 6. Datos caso Campo Jazmín.....	63
Tabla 7. Costos de aislamiento en tuberías de Campo Jazmín.....	64
Tabla 8. Parámetros óptimos campo Jazmín.....	68
Tabla 9. Distribución de generadores de vapor Campo Jazmín.....	69

NOMENCLATURA

A_{TD}	área superficial de la tubería, ft^2
A_{TF}	área de la tubería con el factor de seguridad, ft^2
C	carbono en el combustible, %
CO	monóxido de carbono en los gases de escape, %
CO ₂	dióxido de carbono en los gases de escape, %
$Costo_a$	costo del material aislante, USD
$Costo_{ea}$	costo de generación de vapor para transportar vapor en tubería aislada, USD/año
$Costo_{ed}$	costo de generación de vapor para transportar vapor en tubería desnuda, USD/año
$Costo_t$	costo total tubería aislada USD
Cp_q	calor específico de los gases secos, KJ/Kg °C
D	diámetro de la línea de vapor, mm
d_a	diámetro aislado, m
d_o	diámetro exterior de la tubería aislada, m
E_a	energía disipada al transportar vapor en tubería aislada, BTU/año
E_{mss}	emisividad de la superficie aislada, adimensional
Esp	espesor del material, m
H_2	hidrógeno en el combustible, %
H_2O	humedad en el combustible, %

h_c	coeficiente de transferencia de calor por convección natural y forzada desde la superficie aislada hacia el ambiente, W/m ² K
h_{pv}	entalpia del vapor a P_{mg} y T_{gas} , KJ/Kg
h_r	coeficiente de transferencia de calor por radiación, W/m ² K
h_s	coeficiente global de transferencia de calor, W/m ² K
h_{Wsat}	entalpia del líquido saturado a T_{ref} , KJ/Kg
Δh_v	entalpia del vapor en la línea, kJ/kg
K_{ais}	conductividad térmica del aislante (W/m°C)
L_q	pérdidas por gases secos, kJ/kg
L_{CO}	pérdidas por formación de CO, kJ/kg
L_R	pérdidas por radiación, kJ/kg
L_h	pérdidas por la humedad producto de la combustión del hidrógeno, kJ/kg
L_{ma}	pérdidas por la humedad del aire, kJ/kg
L_{mf}	pérdidas por la humedad en el combustible, kJ/kg
L_i	pérdidas no determinadas, kJ/kg
P	presión en la línea de vapor (bar)
P_{mg}	presión parcial de la humedad en el flujo de gases, bar
$Precio_a$	precio del material aislante, USD/ft ²
q	pérdidas de calor en líneas de superficie, kJ/s
q_a	pérdidas de calor en tubería aislada, BTU/hr*ft
q_d	pérdidas de calor en tubería desnuda, BTU/hr*ft

q_p	pérdidas de calor en el generador, kJ/s
q_{vf}	pérdidas de calor en trampas de vapor, kJ/s
q_f	pérdidas de calor en fugas de vapor, kJ/s
T	temperatura del vapor en la línea, °C
T_a	temperatura ambiente, °C
T_g	temperatura de los gases de escape, °C
T_{gas}	temperatura parcial de la humedad en el flujo de gases, °C
T_{op}	temperatura de operación, °C
T_{ref}	temperatura de referencia, °C
T_{sup}	temperatura supuesta de la superficie del aislante, °C
V	velocidad del viento (m/hr)
W_a	gasto de aire seco, adimensional
W_{aw}	humedad en el aire, adimensional
W_q	gasto de gases secos, adimensional
W_{Vf}	fuga de vapor, kg/s

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO DE RECOBRO TÉRMICO HUFF & PUFF DEFINIENDO LÍMITES DE TRABAJO BAJO CONDICIONES ACTUALES MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA, APLICADO A CAMPO JAZMÍN*.

AUTORES: Lina Paola Becerra Cala

María Angélica Yunez Calvo**

PALABRAS CLAVES: Campo Jazmín, Pérdidas de calor en superficie, Espesor y material óptimo de aislamiento térmico

DESCRIPCIÓN:

En el proceso de recobro térmico *Huff & Puff*, se pueden generar ciertas pérdidas de calor a lo largo del trayecto desde el generador de vapor hasta cabeza de pozo, lo cual produce una disminución en la calidad de vapor en cabeza de pozo, ocasionando un proceso ineficiente de inyección de vapor, y por ende un mayor consumo de combustible para alcanzar la calidad de vapor deseada.

En este proyecto se determinó las condiciones óptimas operativas para reducir las pérdidas de calor presentes en el proceso de inyección de vapor implementado en Campo Jazmín, destacando que el estudio se llevó a cabo desde el generador de vapor hasta el manifold de cada clúster. Dentro de las soluciones propuestas para contrarrestar dicha problemática se encuentra el uso de aislamiento térmico, en el cual se estimó el tipo de material y diámetro óptimo que debe poseer el aislante para generar mínimas pérdidas de calor, y así obtener una alta calidad de vapor en el manifold, teniendo en cuenta la relación costo-beneficio de cada diámetro estudiado.

La distancia desde el generador de vapor hasta el manifold fue otro parámetro en consideración, en el cual se determinó la distancia máxima para que el proceso presentará las menores pérdidas de calor posible, cabe resaltar que esta medida se estimó tanto para tubería desnuda como tubería enterrada, ya que en campo Jazmín se utilizan ambos tipos de tuberías.

Finalmente, en el trabajo se propuso el uso de un diámetro de tubería de superficie que presentará la menor caída de presión y velocidad erosional, lo cual daba como resultado menores pérdidas de calor, no obstante, para la elección del diámetro óptimo se consideró de igual forma la relación costo-beneficio que traería consigo la implementación de cada diámetro de tubería.

* Trabajo de grado

** Facultad de ciencias Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, M.Sc. Erik Giovanni Montes, Ing. Arlen Rocio Chanaga Quiroz, Ing. Gustavo Andrés Ovalle Tamayo

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS TO OPTIMIZE THE RECOVERY THERMAL METHOD HUFF & PUFF DEFINING WORK BOUNDARIES UNDER CURRENT CONDITION THROUGH NUMERICAL SIMULATION, APPLIED TO JAZMIN FIELD*

AUTHORS: Lina Paola Becerra Cala

María Angélica Yunez Calvo*

KEYWORDS: Jazmin Field, surface heat losses, thickness and material optimum thermal insulation

DESCRIPTION:

A thermal recovery process Huff & Puff, certain heat losses can be generated some along the path from steam generator to wellhead, which produce a steam quality drop, causing an inefficient steam injection process and hence a higher fuel consumption to achieve the desired steam quality.

In this project, the optimal operating conditions to reduce the heat losses present in the steam injection process implement on Jazmin Field were determined, highlighting that the study was carried out from steam generator to manifold of each cluster. Among the proposed solutions to counteract this problem is the use of thermal insulation, which was estimated the optimal type of material and diameter that the insulation must have to generate minimum heat losses, and therefore obtain a high steam quality in the manifold, considering the cost-benefit ratio of each diameter studied.

The distance from steam generator to manifold was another parameter in consideration, which the maximum distance was determined so that the process will present the minimum possible heat losses, it should be noted that this measure was estimated as bare flowline to buried flowline, since both types of pipes are used in Jazmin Field.

Finally, in this paper proposed the use of flowline diameter that it will present the minimum pressure drop and erosional velocity, which resulted in minimum heat losses, however, for the election of the optimum diameter, it was considered equally the cost-benefit ratio that the implementation of each flowline diameter would bring.

* Degree Project

** Physical Chemical Engineering Faculty, Petroleum Engineering School. M.Sc. Erik Giovanni Montes, Eng. Arlen Rocio Chanaga Quiroz, Eng. Gustavo Andrés Ovalle Tamayo.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la industria petrolera colombiana se ha enfocado por la producción de crudos pesados, debido al agotamiento de recursos de fácil extracción, por lo cual las empresas han recurrido a diferentes métodos de recobro que faciliten dicha labor.

La aplicación de procesos de recobro térmico se ha consolidado como una de las alternativas más viables para llevar a cabo la extracción del crudo pesado. La reducción considerable de la viscosidad del crudo permite que este se desplace con mayor facilidad hacia los pozos productores del campo en desarrollo.³

Dentro de los métodos de recobro térmico más usados y con mayor viabilidad económica, se encuentra la inyección de vapor cíclica o conocida también como *HUFF & PUFF*, la cual consiste en inyectar vapor por el mismo pozo que se utiliza para la producción de petróleo. Inicialmente, el vapor se inyecta durante un período de un par de días. El vapor introducido permite calentar el aceite que rodea inmediatamente el pozo de inyección, a través de la convección, reduciendo así su viscosidad.⁴

Sin embargo, en este proceso, la cantidad de vapor que se inyecta desde superficie no llegara en su totalidad a la cara de la arena productora, debido a las pérdidas de calor que se presentan durante el recorrido; desde el generador hasta la arena productora; por lo que se ocasiona una deficiencia en el método, de tal manera que no se logrará el objetivo de calentar en su mayoría la arena de interés.

El presente trabajo busca analizar desde el punto de vista técnico-económico, las pérdidas de calor en superficie que ocurren en el proceso de recobro térmico *HUFF*

³ LEÓN, P.; BERNAL, D.; MUÑOZ, S.; ORDÓÑEZ, A. "Inyección de vapor en medianos. Recuperación y rentabilidad". En: Revista Fuentes: el reventón energético. (2015). Vol. 13, No. 1, p. 21

⁴ ZERKALOV, G. Steam Injection for Enhanced Oil Recovery. [en línea]. [Stanford, EE. UU]: Stanford University, dic. 2015 [citato 1 ene. 2018]. Disponible en: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/zerkalov2/>

& *PUFF* en Campo Jazmín, a través de la simulación numérica. Con el fin de que los resultados obtenidos de la simulación permitan establecer la mejor manera de llevar a cabo este tipo de método de recobro térmico, y así reducir las pérdidas de calor definiendo diferentes parámetros operativos aplicado en campo, como la distancia adecuada desde el generador de vapor al manifold, la clase y diámetro óptimo de aislamiento, y el diámetro de las líneas de superficie que se debe usar para llevar a cabo la inyección de vapor.

1. GENERALIDADES DE CAMPO JAZMÍN

Campo Jazmín fue descubierto en 1982 por Texaco con la perforación del primer pozo Cedro-1. El Campo está ubicado en Puerto Boyacá, 160 Km al noroccidente de Bogotá y 190 Km al sur de la refinería de Barrancabermeja⁵ (Figura 1). Este Campo hace parte del contrato de Asociación Nare bloque “B” junto con los campos Abarco en dirección preferencial que va desde el suroccidente hacia el noreste, con un buzamiento de tres grados al oriente. La estructura del yacimiento esta principalmente controlada por dos fallas; la Falla Velasquez-Palagua, con dirección noroccidente a suroriente y la Falla Cocorna con dirección suroccidente a nororiente.

La zona productora está localizada en las arenas del Oligoceno de la formación Chuspas. El tope de la zona productora varía en profundidad entre 1100 pies en el noroccidente a 1250 pies en el suroriente. Las arenas productoras son fluviales con intercalaciones de capas de arcilla y están divididas en tres yacimientos llamados A, B y C de tope a fondo.

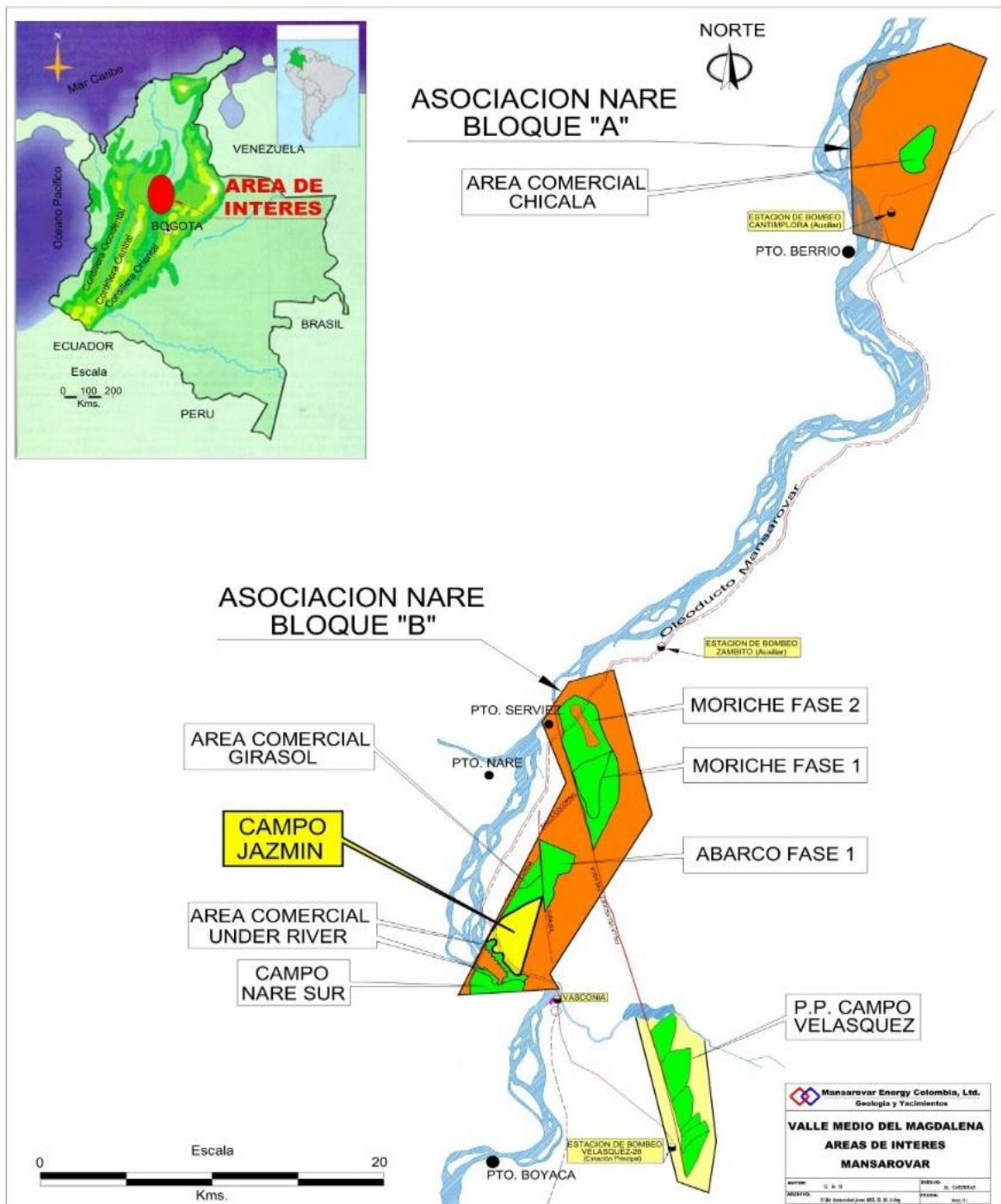
El Campo inició producción en junio de 2002 y seis meses más tarde inicio la inyección cíclica de vapor, proceso térmico que actualmente se encuentra implementado. En noviembre de 2006, Omimex de Colombia LTD. Oficializó la venta de sus intereses a la Compañía Mansarovar Energy Colombia LTD., la cual opera el Campo actualmente.⁶

A la fecha el campo cuenta con 71 clústers, los cuales tienen 398 pozos perforados, aproximadamente 339 están en producción, 39 cerrados por baja producción de petróleo (alto BSW), 4 son inyectores de agua residual, 4 abastecedores de agua industrial y 12 están abandonados.

⁵ CASTIBLANCO, L.; PACHANO, K.; SALAMANCA, A. “Campo Jazmín”. Proyecto de inyección continua de vapor. Bogotá, Mansarovar Energy. (2012). p. 9.

⁶ CASTIBLANCO, Op. cit., p. 1

Figura 1. Localización Campo Jazmín.



Fuente: CASTIBLANCO, L.; PACHANO, K.; SALAMANCA, A. "Campo Jazmín". Proyecto de inyección continua de vapor. (2012).

Con respecto al proceso de inyección cíclica realizada en el campo, se tiene a disposición 10 generadores, donde 7 de ellos son duales (trabajan a gas y crudo) y 3 de ellos, contando el Y (generador móvil) solo trabajan a gas, sin embargo, el generador mencionado anteriormente no se encuentra en funcionamiento, por lo que no se considerará para el análisis del caso estudio.

El campo ha permanecido en producción durante 14 años aproximadamente. La producción máxima alcanzada fue de 16748 BOPD, en mayo de 2008. La campaña de perforación inicio en el 2002 perforando el sector de Jazmín Básico y se dio por finalizada en el 2008, cuando se desarrolló la Fase Oriental. La campaña de reacondicionamiento de pozos fue iniciada en el año 2006 con miras a mantener los niveles de producción del campo enfocados a trabajos de: aislamientos de zonas de agua, sidetracks y tapones de cemento en fondo.⁷

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados por mantener niveles altos de la producción de hidrocarburos, este ha presentado un decrecimiento en los últimos años por la caída de presión del yacimiento, por tal motivo se desea optimizar los procesos actualmente existentes en el campo, para disminuir el declive de producción que se está presentando en este.

Teniendo en cuenta los procesos que se emplean en el campo, en específico el método de recobro térmico *Huff & Puff*, este ha estado presentando ineficiencias con el paso del tiempo, ya que los rangos operativos que se tienen actualmente en el campo están muy por debajo de los rangos óptimos para que se lleve a cabo una adecuada operación de inyección de vapor, a continuación se muestra una tabla comparativa de dichos rangos operativos (Tabla 1) , cabe resaltar que estos datos son un promedio de los datos medidos en el manifold.

De tal forma lo que se busca con el estudio realizado es definir las condiciones de operaciones óptimas en las facilidades de superficie que actualmente posee el proceso de inyección de vapor que se implementa en campo Jazmín, por lo cual

⁷ CASTIBLANCO, Op. cit., p. 10.

este será el caso base del proyecto y la problemática a evaluar serán las pérdidas de calor presente en dicho proceso.

Tabla 1. Parámetros operativos actuales y óptimos del Campo Jazmín.

PROPIEDAD	PARAMETRO	VALOR OPTIMO	VALOR ACTUAL	UNIDADES
Presión en manifold	Normal	1050	850	psi
	Máxima	1200	1000	psi
Temperatura	Promedio	550	540	°F
Calidad	Promedio	75	72	%

Fuente: DEPARTAMENTO DE ING. DE YACIMIENTOS. "Campo Jazmín". Inyección cíclica de vapor. (2017)

2. FACILIDADES DE SUPERFICIE PARA LA INYECCIÓN DE VAPOR

Para la realización del proceso de inyección de vapor se necesitan de facilidades de superficie específicas, que proporcionaran el medio para que el vapor sea generado y posteriormente inyectado al pozo.

2.1 GENERADOR DE VAPOR

Los generadores de vapor son usados para producir vapor para la inyección de vapor. Los generadores más usados son las unidades de 25-50 MMBTU/hr. (Figura 2). La unidad de 25 MMBTU/hr son usados como unidades móviles y proveen vapor para un sistema de inyección cíclica de vapor o para pozos de inyección remotos. La unidad de 50 MMBTU/hr provee vapor para una ubicación central de inyección, la cual simplifica las plantas de tratamiento de agua y combustible y los sistemas de distribuidos de vapor.⁸ Un generador de vapor puede operar a altas presiones aproximadamente de 2700 a 3000 psig. La temperatura de operación cambia con la presión correspondiente. El vapor generado debe entregar una cantidad de calor al reservorio dependiendo de la calidad del vapor, la presión y temperatura.

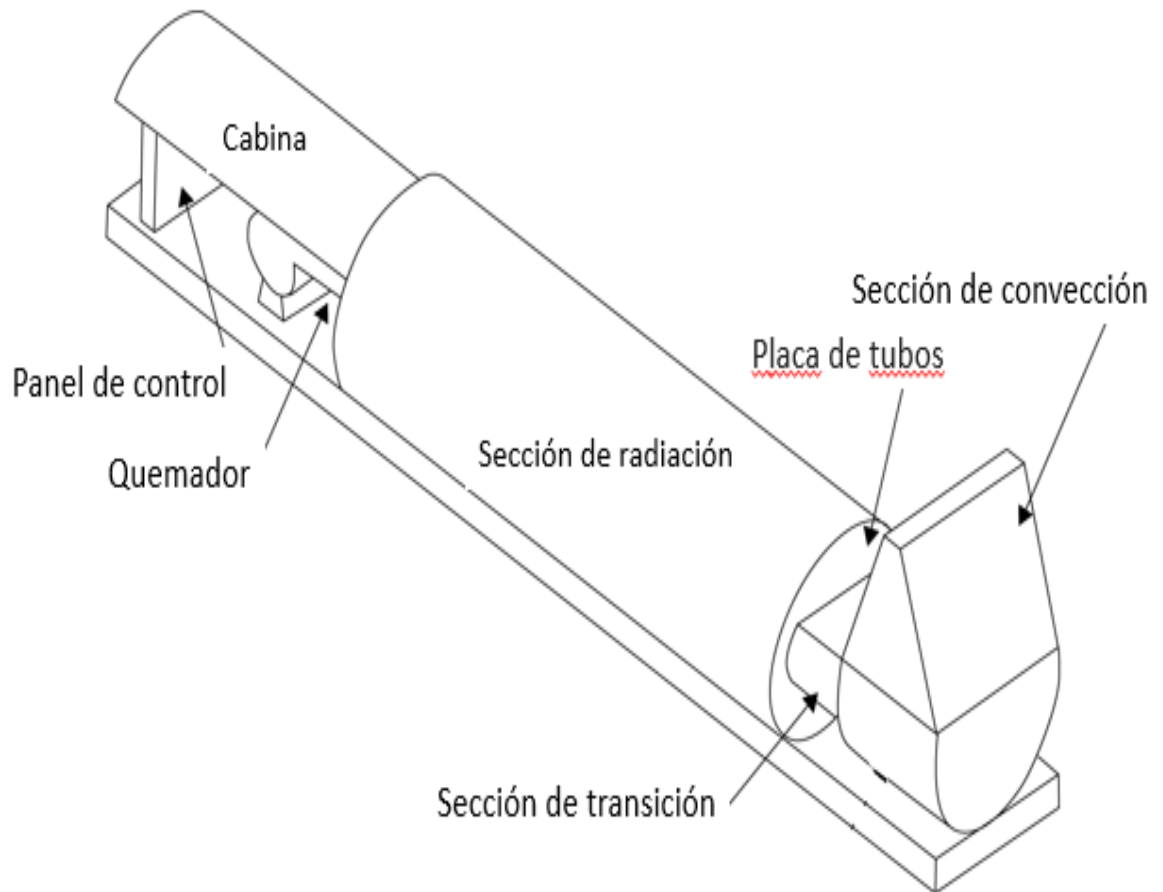
Para un funcionamiento rentable del generador se debe mantener una alta calidad del agua, que tenga las siguientes características:

- Dureza total: < 0.01 mg/L
- Contenido de aceite: < 0.5 mg/L
- Total de sólidos suspendidos: <0.5 mg/L
- Total de metales: < 0.5 mg/L
- Contenido de oxígeno: <0.02 mg/L

⁸ RAWLINS, H. "Facilities for steam generation". [en línea]. [Houston, EE. UU]: PetroWiki, Society of Petroleum Engineers (SPE), ene. 2016. [citado 4 ene. 2018]. Disponible: http://petrowiki.org/Facilities_for_steam_generation

- Concentración de sílice: <200 mg/L

Figura 2. Esquema de generador de vapor



Fuente: RAWLINS, H. "Facilities for steam generation". Society of Petroleum Engineers (SPE), 2016.

2.2 DISTRIBUIDOR DE VAPOR

Una vez que el vapor ha salido del generador, este es transportado y distribuido por tuberías de flujo hacia los pozos inyectoros. La red de tuberías de flujo es generalmente aislada para reducir las pérdidas de calor y proveer seguridad al personal que se encuentre en el área. Debido a que los generadores de vapor no

generan 100% de vapor, la tubería de flujo contiene una fase de vapor y una fase de líquido. El vapor puede fluir bajo diferentes patrones de flujos, los cuales dependen de la tasa de vapor, de tamaño de la tubería, la temperatura y la presión. Estos patrones se pueden obtener mediante las siguientes configuraciones:

- **T de brazo lateral:** hasta la década de 1970, la T de brazo lateral estándar fue la unión de tuberías más usada en la distribución de redes. Sin embargo, un artículo publicado en 1978 basado en experimentos de laboratorio de aire-agua por Hong indicó que la fase de vapor y líquido tienden a distribuirse desigualmente en las uniones mencionadas⁹, dando como resultados corrientes de calidad no uniformes en cada brazo.
- **T de tipo impacto:** un artículo publicado por Hong divulgó que los resultados de las pruebas de laboratorio aire-agua indicaba que la conexión T de tipo impacto mejoraba ampliamente la distribución de la fase vapor-líquido sobre la conexión T de brazo lateral¹⁰. Basado en estos hallazgos, el uso de la conexión T tipo impacto ha sido ampliamente adoptada en los proyectos de inyección de vapor en California, Indonesia y China en los últimos quince años. La medida de la tasa de flujo y la calidad en cabeza de pozo han sido realizadas desde la década de 1980, sin embargo, indica que la desigualdad en la distribución de la calidad en las corrientes pueden aun ocurrir a lo largo de la conexión T de tipo impacto cuando la relación de la masa de flujo del vapor en la salida de cada brazo es mayor que 2 o menor a $\frac{1}{2}$ o cuando se supera la velocidad del vapor de 20 ft/seg, el efecto de esta velocidad también fue observado en las pruebas de laboratorio aire-agua para la fracción de entrada de líquido que era igual o menos al 0.02.

⁹ HONG, K. C. "Two phase flow splitting at a Pipe Tee". En: SPE Journal Paper 6530-PA.1978. P.6.

¹⁰ HONG, K.C.; GRISTON, S. "Two phase flow splitting at an Impacting Tee". En: SPE Journal Paper 27866-PA. 1995. P. 5.

2.3 TRAMPAS PARA VAPOR

En la industria se define según ANSI / FCI 69-1-1989 una trampa de vapor como “Válvula autónoma que drena automáticamente el condensado de un lugar que contiene vapor mientras permanece el vapor saturado, o si es necesario, permite que el vapor fluya a una velocidad controlada o ajustada. En la mayoría de las trampas de vapor también pasarán gases no condensables mientras permanecen apretados para funcionar con vapor”¹¹. Este tipo de válvula ha estado en uso desde principios de 1800, después de la Revolución Industrial, ya que el vapor se ha usado más ampliamente como medio de calefacción en lugar de ser fuente motriz (para alimentar trenes, bombas, etc.). Hay tres criterios básicos para que una válvula se considere una trampa de vapor:

- Descarga automáticamente condensado
- No pierde vapor
- También puede descargar gases no condensables.

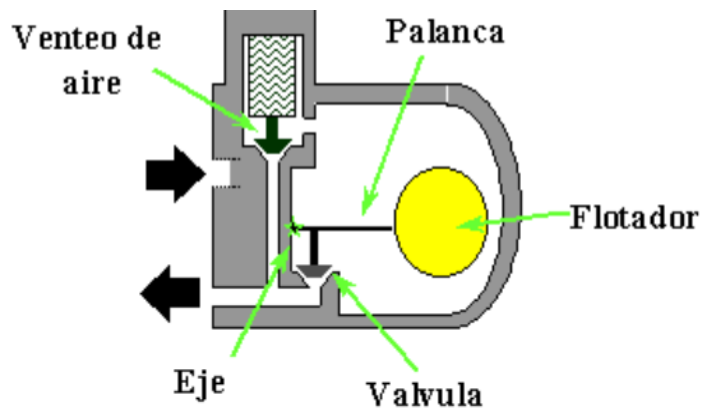
Las trampas de vapor se usan en aplicaciones de calentamiento donde se crea calor latente y se transporta a un producto específico (por ejemplo, calentar crudo y de esta manera reducir su viscosidad). Una vez que el calor / energía latente se ha transferido del vapor al producto, el vapor se condensa, y si este condensado no se elimina eficazmente del proceso, la eficiencia del sistema sufrirá.

Se ha intentado el uso de válvulas estándar para este propósito, es decir, estrangularlas manualmente para permitir que escape solo el condensado, pero este método consume mucho tiempo e ineficiente. Las válvulas manuales deben ajustarse constantemente para tener en cuenta la variación de las cargas de vapor (y del entorno externo), por lo que el riesgo de perder vapor es mucho mayor.

¹¹ CAMERON, SLB Company. “How it Works: Steam traps”. [en línea]. [EE. UU]: Schlumberger Company. 2018. [citado 9 ene. 2018]. Disponible: <http://cameron.slb.com/products-and-services/valves-index/valve-academy/how-does-it-work-steam-traps>

2.3.1 Trampas mecánicas. Las trampas mecánicas detectan la diferencia de densidad entre el vapor y el condensado. El condensado de este tipo de trampa se descarga continuamente, sin dejar nada que obstaculice el proceso. Estos tipos de trampas son los más utilizados en la actualidad en sistemas que requieren grandes capacidades de descarga, que incluyen la mayoría de las aplicaciones de proceso.¹²

Figura 3. Trampa mecánica convencional.



Fuente: MELO, G. "Trampas para vapor". STEAMCONTROL S.A. 2014

2.3.2 Trampas termostáticas. Las trampas termostáticas utilizan un elemento sensor de temperatura para determinar cuándo descargar el condensado. Debido a esto, todas las trampas de vástago operadas por termostato harán que el condensado retroceda en el sistema. Además, manejan muy bien el aire y los no condensables porque las válvulas están abiertas al arrancar cuando el sistema está relativamente frío. Los tipos de trampas incluidas en esta categoría son presión equilibrada y bimetálica¹³.

¹² CAMERON, Op. cit.

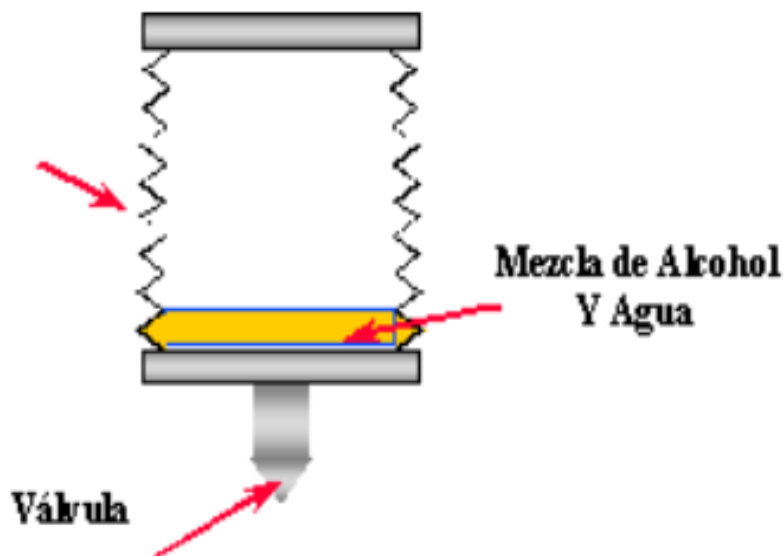
¹³ CAMERON, Op. cit.

Las trampas de presión equilibradas funcionan equilibrando la presión del vapor y la presión interna del elemento termostático (por ejemplo, un fuelle), que se llena parcialmente con un líquido volátil cuya temperatura de saturación es ligeramente menor que la del agua.

La operación de trampa bimetalica se basa en la característica de que dos metales diferentes tienen diferentes tasas de expansión. Cuando el elemento bimetalico se calienta, las diferentes velocidades de expansión de los metales provocan que se desvíe o doble, lo que a su vez proporciona movimiento para cerrar una válvula.

La operación de trampa bimetalica se basa en la característica de que dos metales diferentes tienen distintas tasas de expansión. Cuando el elemento bimetalico se calienta, las diferentes velocidades de expansión de los metales provocan que se desvíe o doble, lo que a su vez proporciona movimiento para cerrar una válvula.

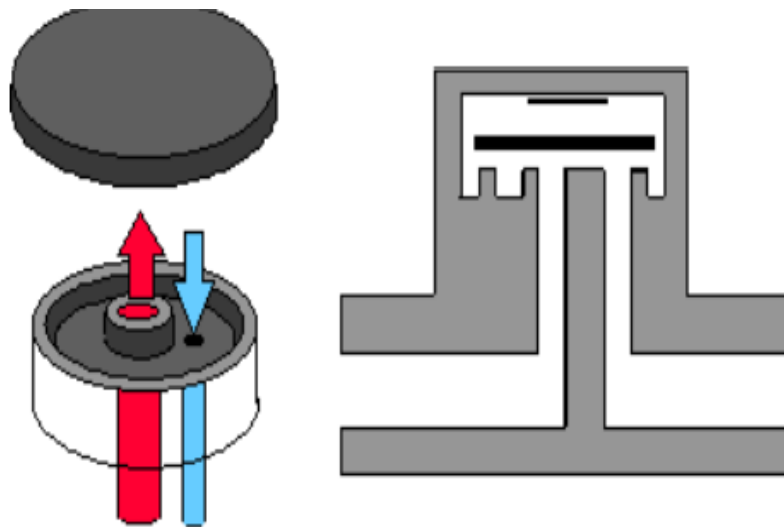
Figura 4. Trampa termostática convencional tipo fuelle.



Fuente: MELO, G. "Trampas para vapor". STEAMCONTROL S.A. 2014

2.3.3 Trampas termodinámicas. Las trampas termodinámicas utilizan la diferencia de velocidad entre vapor y condensado para funcionar. El condensado que ingresa al cuerpo de la trampa de vapor se mueve relativamente despacio en comparación con el vapor y se descarga libremente a través de una válvula (un disco flotante libre)¹⁴. Cuando el vapor alcanza la parte inferior del disco, su velocidad es mucho más alta que la del condensado, creando una caída de presión que cierra la cabeza de la válvula. La válvula permanece cerrada hasta que la presión del vapor sobre el disco cae, permitiendo que la válvula se abra y el ciclo de descarga se repita.

Figura 5. Trampa termodinámica convencional tipo disco



Fuente: MELO, G. "Trampas para vapor". STEAMCONTROL S.A. 2014

¹⁴ CAMERON, Op. cit.

3. PÉRDIDAS DE CALOR PRESENTES EN EL PROCESO DE INYECCIÓN DE VAPOR

En los equipos, tuberías, instrumentación y demás accesorios presentes en el proceso de inyección de vapor, los cuales son usados para transportar el vapor desde el generador hasta el pozo inyector, pueden ocurrir pérdidas de calor debido a los mecanismos de transferencia de calor producidos por la diferencia de temperatura entre el ambiente y el vapor que fluye por la tubería de flujo, lo que ocasiona que cierta parte del vapor se condense, obteniendo un flujo bifásico en el transporte, y el agua caliente que se encuentra ahora inmersa en el flujo presenta un coeficiente de transferencia de calor menor que el del vapor, lo cual provoca una disminución en la cantidad de energía entregada al yacimiento, por lo que se hace necesario determinar estas pérdidas de calor, las cuales son muy importante al momento de realizar un análisis de costo-beneficio.

3.1 PÉRDIDAS DE CALOR EN EL GENERADOR DE VAPOR

En la generación de vapor, el primero equipo que se encuentra en la línea del proceso es el generador de vapor, el cual presenta pérdidas de calor por presencia de gases secos, formación de CO, radiación, humedad producto de la combustión del hidrógeno, humedad del aire, humedad del combustible, y unas pérdidas no determinadas que las proporciona el fabricante¹⁵, las cuales se determinaran a continuación:

- Pérdidas por gases secos (L_q)

$$L_q = W_q \times C p_q \times (T_g - T_{ref}) \quad (1)$$

¹⁵ UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL OCCIDENTE; UNIVERSIDAD DEL ATLANTICO. "Eficiencia energética de la generación y distribución del vapor". Proyecto de UPME y Colciencias. P. 19

Donde W_q es el gasto de gases secos (adimensional), Cp_q es el calor específico de los gases secos (KJ/Kg °C), T_g es la temperatura de los gases de escape (°C) y T_{ref} es la temperatura de referencia (°C).

- Pérdidas por formación de CO (L_{CO})

$$L_{CO} = \frac{CO \times 10160 \times 1,0549 \times 2,205 \times \frac{C}{100}}{(CO_2 + CO)} \quad (2)$$

Donde CO_2 es el dióxido de carbono en los gases de escape (%), CO es el monóxido de carbono en los gases de escape (%) y C es el carbono en el combustible (%)

- Pérdidas por radiación (L_R)

$$L_R = \text{se determinan a partir de la figura 4} \quad (3)$$

- Pérdidas por la humedad producto de la combustión del hidrógeno (L_h)

$$L_h = 8,936 \times H_2 \times (h_{pv} - h_{wsat}) \quad (4)$$

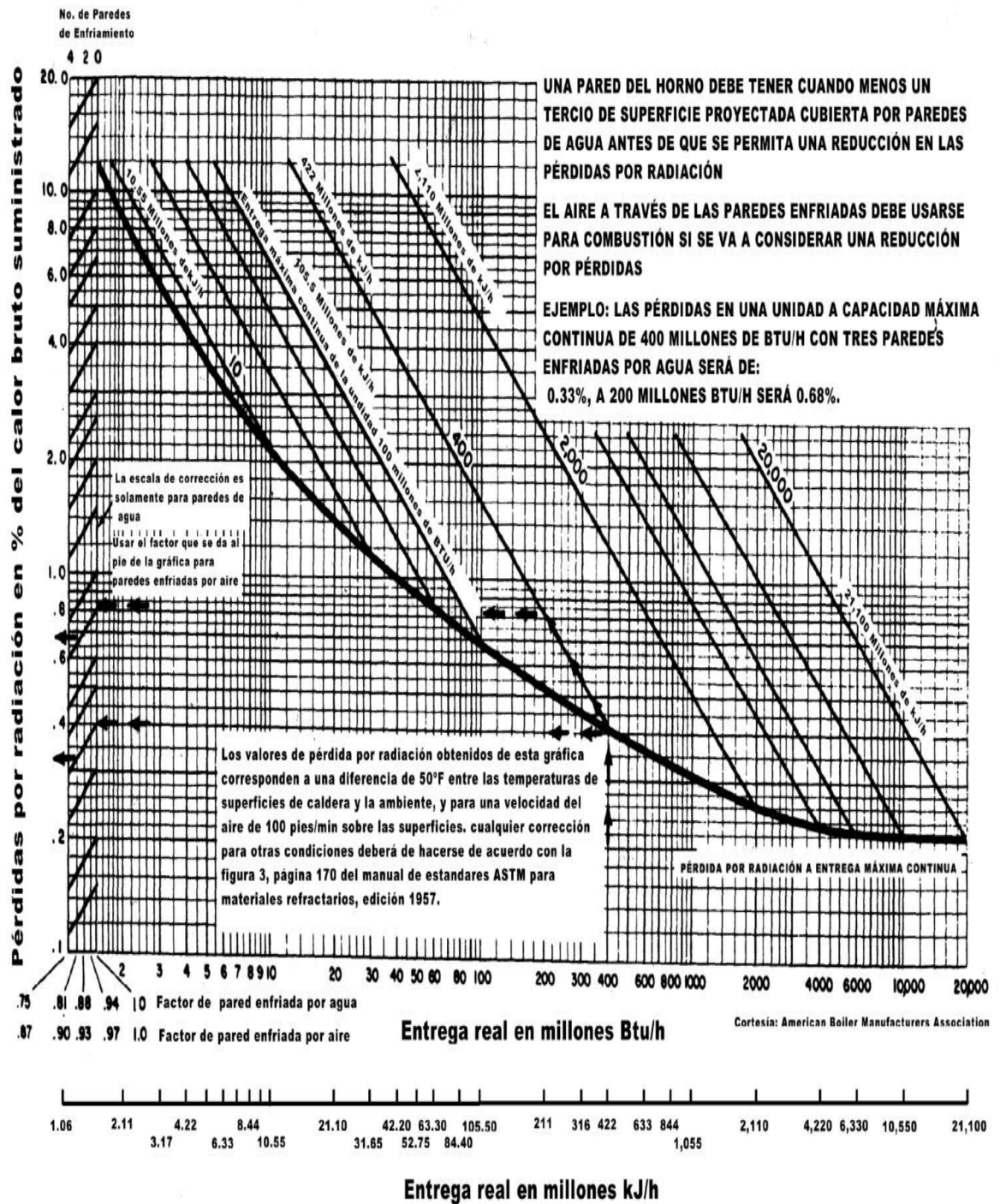
Donde H_2 es el hidrógeno en el combustible (%), h_{pv} es la entalpia del vapor a la presión P_{mg} y T_{gas} (KJ/Kg) y h_{wsat} es la entalpia del líquido saturado a T_{ref} (KJ/Kg)

- Pérdidas por la humedad del aire (L_{ma})

$$L_{ma} = Wa \times Waw \times (h_{pv} - h_{wsat}) \quad (5)$$

Donde Wa es el gasto de aire seco (adimensional) y Waw es la humedad en el aire (adimensional).

Figura 6. Pérdidas de por radiación



Fuente: UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL OCCIDENTE; UNIVERSIDAD DEL ATLANTICO.
"Eficiencia energética de la generación y distribución del vapor". Proyecto de UPME y Colciencias.

- Pérdidas por la humedad en el combustible (L_{mf})

$$L_{mf} = \frac{H_2Ox(h_{Pv}-h_{Wsat})}{100} \quad (6)$$

Donde H_2O es la humedad en el combustible (%)

- Perdidas no determinadas

$$L_i = \text{Pérdidas no determinadas (Información del fabricante)} \quad (7)$$

Las pérdidas de calor que se presentan en el generador son la sumatoria de las pérdidas de calor halladas anteriormente.

$$q_p = L_q + L_{CO} + L_R + L_h + L_{ma} + L_{mf} + L_i \quad (8)$$

3.2 PÉRDIDAS DE CALOR EN LINEAS DE SUPERFICIE

De igual forma como el generador de vapor presenta perdidas de calor, las líneas de superficie que conducen el vapor desde el generador al pozo inyector, también presentarán perdidas de calor por falta de aislamiento, las cuales se determinarán a partir de la norma ASME de eficiencia energética en aislamientos térmicos industriales. Previamente al cálculo de las pérdidas de calor en las líneas de superficie, se debe obtener los parámetros mostrados a continuación, cabe resaltar que las ecuaciones dependen del diámetro de tubería.¹⁶

¹⁶ UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL OCCIDENTE, Op. cit., p. 27.

Para tuberías menores a 609 mm de diámetro nominal, se utilizan las siguientes ecuaciones:

- Diámetro aislado, d_a (m)

$$d_a = d_o + 2xEsp \quad (9)$$

Donde d_o diámetro exterior de la tubería aislada (m) y Esp es el espesor del material (m)

- Coeficiente de transferencia de calor por convección natural y forzada desde la superficie aislada hacia el ambiente (h_c)

$$h_c = 2,7241 \times C \times (d_a)^{-0,2} \times \left[\frac{1,11}{T_{sup} + T_a - 510,44} \right]^{0,181} \times [1,8 \times (T_{sup} - T_a)]^{0,266} \times (1 + 7,9366 \times 10^{-4} \times V)^{0,5} \quad (10)$$

Donde C es el coeficiente de forma (adimensional), T_{sup} es la temperatura supuesta de la superficie del aislante ($^{\circ}\text{C}$), T_a es la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) y V es la velocidad del viento (m/hr)

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_r)

$$h_r = 0,9824 \times 10^{-8} \times E_{mss} \times \left[\frac{T_a^4 - T_{sup}^4}{T_a - T_{sup}} \right] \quad (11)$$

Donde E_{mss} es la emisividad de la superficie aislada (adimensional)

- Coeficiente global de transferencia de calor (h_s)

$$h_s = h_c + h_r \quad (12)$$

Las pérdidas de calor presentes en las líneas de superficie con un diámetro nominal menor a 609 mm, se determinan a partir de la siguiente ecuación (q)

$$q = \frac{\pi \times (T_{op} - T_a)}{\frac{1}{2 \times k_{ais}} \times \ln \frac{d_a}{d_o} + \frac{1}{h_s \times d_a}} \quad (13)$$

Donde T_{op} es la temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$), k_{ais} es la conductividad térmica del aislante ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$)

Para tuberías iguales o mayores a 24 in de diámetro nominal, se utilizan las siguientes ecuaciones:

- Coeficiente de transferencia de calor por convección natural y forzada desde la superficie aislada hacia el ambiente, (h_c)

$$h_c = 3,0075 \times C \times \left[\frac{1,11}{T_{sup} + T_a - 510,44} \right]^{0,181} \times [1,8 \times (T_{sup} - T_a)]^{0,266} \times (1 + 7,9366 \times 10^{-4} \times V)^{0,5} \quad (14)$$

Donde C es el coeficiente de forma (adimensional), T_{sup} es la temperatura supuesta de la superficie del aislante ($^{\circ}\text{C}$), T_a es la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) y V es la velocidad del viento (m/hr)

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_r)

$$h_r = 0,9824 \times 10^{-8} \times E_{mss} \times \left[\frac{T_a^4 - T_{sup}^4}{T_a - T_{sup}} \right] \quad (15)$$

Donde E_{mss} es la emisividad de la superficie aislada (adimensional)

- Coeficiente global de transferencia de calor (h_s)

$$h_s = h_c + h_r \quad (16)$$

Las pérdidas de calor presentes en las líneas de superficie con un diámetro nominal igual o mayor a 24 in, se determinan a partir de la siguiente ecuación (q)

$$q = \frac{(T_{op} - T_a)}{\frac{Esp}{k_{ais}} + \frac{1}{h_s}} \quad (17)$$

Donde T_{op} es la temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$), k_{ais} es la conductividad térmica del aislante ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$)

3.3 PÉRDIDAS DE CALOR EN TRAMPAS PARA VAPOR Y FUGAS

Las trampas para vapor como se explicó anteriormente son dispositivos usados para eliminar los condensados, aire y otros gases no condensables. Sin embargo, por este medio también se puede perder cierta parte del vapor generado, lo que

representa pérdidas de calor y es necesario cuantificar las mismas, a continuación, se muestran los cálculos respectivos para determinar dichas pérdidas¹⁷.

- Fuga de vapor (W_{Vf})

$$W_{Vf} = \frac{\left[\left(\frac{D}{25,4} \right)^2 \times \frac{0,8 \times 0,4118 \times \pi}{4} \times P \times 14,502 \right] \times 0,4536}{[1,8 \times (T+273,15)]^{0,5}} \quad (18)$$

Donde D es el diámetro de la línea de vapor (mm), P es la presión del vapor en la línea (bar) y T es la temperatura del vapor en la línea (°C)

Para este cálculo se debe tener en cuenta que la trampa de vapor se encuentra a presión atmosférica, de no ser de esta manera, se debe considerar que la presión de vapor en la línea debe ser la diferencia entre la presión de vapor y la presión de la línea de condensados.

Las pérdidas de calor en las trampas de vapor (q_{vf}), se determinan a continuación:

$$q_{vf} = W_{Vf} \times \Delta h_V \quad (19)$$

Donde Δh_V es la entalpia del vapor en la línea (kJ/kg), la cual será igual a la resta de la entalpia del vapor que se fuga y la entalpia del de agua de reposición

De igual manera se deben calcular las perdidas por fugas de vapor, que se pueden presentar en la línea de flujo o alguna válvula. Para realizar los cálculos que determinen dichas perdidas se debe tener en cuenta el diámetro equivalente de fuga (aproximado), para así tener un punto de referencia que permita establecer las pérdidas por fugas de vapor.

¹⁷ UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL OCCIDENTE, Op. cit., p. 29.

A continuación, se proporciona una tabla que permite determinar el flujo de vapor que se puede escapar por una fuga (W_{vf}).

Tabla 2. Fugas de vapor

DIAMETRO DE LA FUGA (mm)	PRESIÓN DE VAPOR (bar)		
	102	145	290
0,059	5,5	11	13
0,12	22	35	50
0,16	40	47	95
0,2	62	70	135
0,24	90	120	200
0,3	190	220	310

Fuente: UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL OCCIDENTE; UNIVERSIDAD DEL ATLANTICO. "Eficiencia energética de la generación y distribución del vapor". Proyecto de UPME y Colciencias.

Con el flujo determinado que se puede escapar por una fuga (W_{vf}) y la diferencia entre la entalpía del vapor que escapa por la fuga, y la entalpía del agua de alimentación Δh_v (kJ/kg), se obtiene las pérdidas de calor en las fugas de vapor (q_{vf})

$$q_f = W_{vf} \times \Delta h_v \quad (20)$$

Con este último calculo y los hallados anteriormente, se establece las pérdidas totales de calor que puede presentar las facilidades de superficie usadas para la inyección de vapor.

4. MECANISMOS DE CONTROL DE PÉRDIDAS DE CALOR

Teniendo en cuenta las pérdidas de calor halladas en el capítulo anterior, se puede tener un panorama de la eficiencia que presenta el proceso de inyección de vapor que se aplica en campo, por lo cual se hace necesario el uso de agentes externos que permitan optimizarlo para lograr reducir las pérdidas de calor y de esta manera obtener una mayor calidad de vapor.

Uno de los mecanismos existentes para reducir las pérdidas de calor, es controlar el flujo de vapor a través de las líneas de superficie, y esto puede ser posible mediante el uso de distribuidores de vapor, con el fin de disminuir la cantidad de condensado que se pueda generar por la merma de calor.

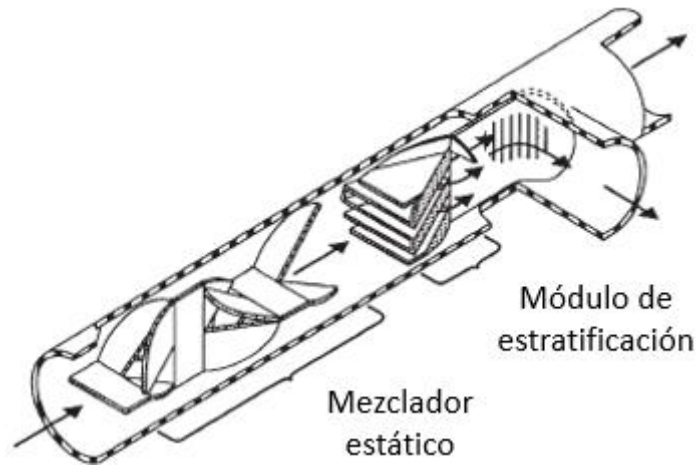
Sin embargo, los distribuidores de vapor existentes han contribuido más a la caída de la calidad de vapor que a mantenerla a lo largo del flujo del mismo, por lo cual se han realizado varias modificaciones de estos, para lograr obtener un mayor porcentaje de calidad de vapor, y evitar diferencias significativas en la calidad alcanzada entre un pozo y otro cuando se realiza inyección simultánea. Las modificaciones del brazo lateral y la T de impacto serán mencionadas a continuación.

- Mixer Stratifier (brazo lateral): Santa Fe Energy diseño y probó una conexión T de brazo lateral modificada¹⁸, la Figura 7 contiene un dispositivo mixer stratifier para mejorar la distribución de la calidad de vapor. El mezclador (mixer) estático trabaja para homogenizar el fluido y el módulo de estratificación (stratifier) obliga a una parte de la mezcla a fluir a través del brazo lateral. Santa Fe Energy

¹⁸ JONES, J.; WILLIAMS, R.L. "A two-phase flow-splitting device that works". En: SPE Journal Paper 21532-PA. 1993. P. 1.

reportó que los datos de las pruebas de campo mostraron un mejoramiento en la distribución de la calidad de vapor en las corrientes.

Figura 7. Mixer Stratifier



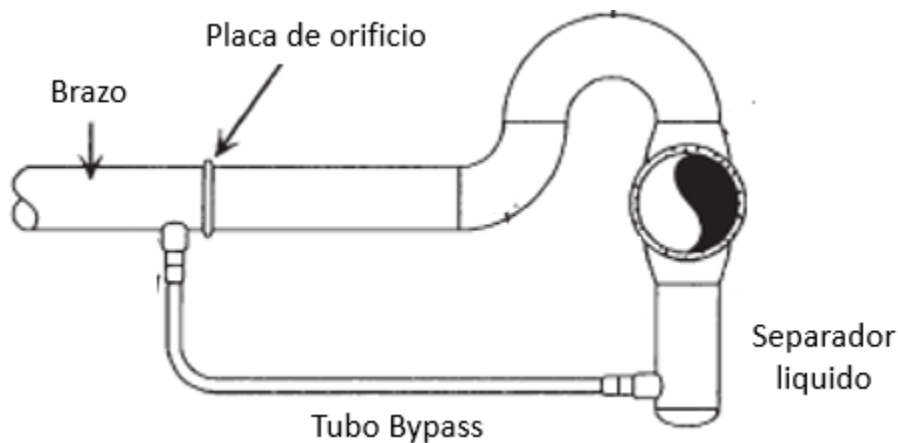
Fuente: JONES, J.; WILLIAMS, R.L. "A two-phase flow-splitting device that works". En: SPE Journal Paper 21532-PA. 1993.

- SpliTigator (brazo lateral): Texaco desarrollo y probó una conexión T de brazo lateral modificada¹⁹ (Figura 8), está básicamente trabaja como separador de vapor/líquido. El diámetro de la parte recta del brazo de la conexión T es mayor en comparación a un diámetro de T común, y es usado para promover la separación de la fase de vapor y líquido. Una porción del vapor y porción de la fase líquida son separados en el tope y en el fondo de la T, respectivamente. La fase líquida separada es dirigida a través de una tubería de menor diámetro hacia un brazo lateral que contiene una placa de orificio. La tasa de líquido suministrada al brazo lateral es controlada por la caída de presión a lo largo de la placa de orificio. Dentro de las características del El SpliTigator se encuentra

¹⁹ BERGER, E.; KOLTHOFF, K.; SCHRODT, J.; LYNN, S.; PAULEY, C. "The SpliTigator: A device for the mitigation of phase splitting". En SPE Journal Paper 37516-MS. 1997. P. 1.

el control de la calidad de vapor de la ramificación dentro de unos pocos puntos de calidad del diseño sobre un amplio rango de las tasas de flujo, presión del sistema y la calidad de vapor de la troncal. No crea caídas de presión adicional en la línea principal y requiere una pequeña caída de presión en la ramificación para operación óptima. No requiere partes móviles, ni ajustes periódicos, y un bajo o nulo mantenimiento a lo largo de la inyección de vapor. Puede ser construido de componentes de tuberías disponibles a partir de uniones de ramificaciones reemplazadas.

Figura 8. SpliTigator



Fuente: JONES, J.; WILLIAMS, R.L. "A two-phase flow-splitting device that works". En: SPE Journal Paper 21532-PA. 1993.

- Placas de orificio: En 1989, la empresa Caltex Pacific Indonesia instaló varias placas de orificio aguas arriba y aguas debajo de cada brazo de la T de impacto en el área de inyección de vapor en Duri para mejorar la calidad de las corrientes²⁰. La placa de orificio fue usada para aumentar la velocidad del flujo

²⁰ HONG, K. C.; GRISTON, S. "Best practice for the distribution and metering of two-phase steam". En: SPE Journal Paper 35422-PA. 1997. P. 2.

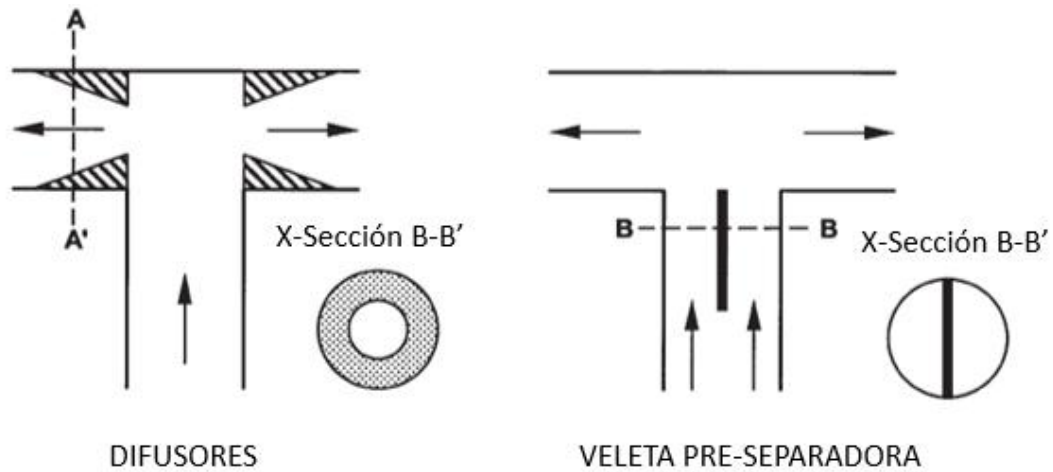
en un intento por homogenizar la mezcla de dos fases del vapor. Una evaluación exhaustiva de las pruebas de procedimientos y data generada reveló que la placa de orificio inserta no mejoró la calidad de las corrientes.

- Mixer-stratifier (T de impacto): el mixer stratifier de brazo lateral de Santa Fe Energy ha sido adoptada para funcionar como una T de impacto²¹. Las pruebas de campo del flujo de vapor muestran que este dispositivo insertado no produce mejoramiento en la calidad de las corrientes por encima de la T de impacto normal. De hecho, el Mixer-stratifier tiende a dividir la misma cantidad fase líquida por las salidas de los brazos independientemente de la relación de la fase de vapor separada, lo que provoca una mala calidad de vapor en cada corriente.
- Veleta pre-separadora y difusores: varios dispositivos de T inserta han sido desarrollados por Hong y Griston en un intento de incrementar el rango de la relación del flujo másico de vapor²², por el cual se lograría una calidad semejante en las corrientes. Este dispositivo fue primero probado en laboratorio usando una mezcla de aire-agua. Una veleta pre-separadora vertical directamente aguas arriba de la unión T e invertida de los difusores directamente aguas debajo de la unión T resulta en la división de fase más favorable (Figura 9). La veleta pre-separadora y difusores aguas abajo tuvieron más pruebas bajo condiciones de flujo de vapor en campo. Los resultados de las pruebas mostraron que ambos dispositivos mejoraron significativamente la calidad de las corrientes por encima del amplio rango de las condiciones del flujo de vapor. Los difusores funcionaron mejor, proporcionando una calidad uniforme en las corrientes bajo todas las condiciones de flujo de vapor evaluadas. Estos dispositivos pueden ser sencillos y económicamente fabricados.

²¹ HONG, K. C.; GRISTON, S. Op. cit., p. 2.

²² HONG, K. C.; GRISTON, S. Op. cit., p. 2.

Figura 9. Veleta pre-separadora y difusores.



Fuente: HONG, K. C.; GRISTON, S. "Best practice for the distribution and metering of two-phase steam". En: SPE Journal Paper 35422-PA. 1997.

- T sobredimensionada: las pruebas de laboratorio de aire-agua y las pruebas del flujo de vapor en campo mostraron que con una T de impacto sobredimensionada²³ también puede producir una calidad uniforme en las corrientes bajo todas las condiciones de flujo de vapor evaluadas. La T sobredimensionada, es típicamente dos veces el diámetro de una tubería, lo cual reduce en gran medida la velocidad el flujo en una unión de T. Este comportamiento es consistente con la calidad uniforme en las corrientes observado para una T de impacto normal cuando la velocidad del vapor es menor a 20 ft/seg.

A demás de los accesorios mencionados anteriormente para mantener o lograr aumentar la calidad de vapor, en la industria también se usan algunos dispositivos como lo son las trampas de vapor²⁴, las cuales permiten separar la fase liquida del flujo y asegurar de esta manera obtener un vapor de 100% de calidad en la entrada

²³ HONG, K. C.; GRISTON, S. Op. cit., p. 2.

²⁴ VALBUENA, E.; BASHBUSH, J.L.; RINCON, A. "Energy balance in steam injection projects: Integrating surface-reservoir systems". En: SPE Journal Paper 121489-MS. 2009. P. 4.

de la línea principal de inyección de vapor, con el fin de maximizar la calidad de vapor que llega a las arenas de los pozos inyectoros. El agua caliente removida del vapor por la trampa es enviada a un intercambiador de calor incorporado a la entrada de la caldera en la línea de alimento de agua, permitiendo una recuperación parcial del calor proveniente del agua caliente lo que incrementa la temperatura del agua de alimento y así reduce los costos totales por energía.

Desde el punto de vista de las pérdidas de calor hacia la atmosfera en la línea de superficie, una de las soluciones más usadas para contrarrestar esta problemática es mediante el uso de aislante de fibra de vidrio con un diámetro aproximadamente de 2 in²⁵, el cual debe estar sujeto a las condiciones ambientales promedios existentes como la velocidad del viento promedio (5 m/s) y la temperatura ambiente promedio local (80 °F). La función del aislante de fibra de vidrio radica en minimizar dichas pérdidas, además que proporciona la protección suficiente a posibles quemaduras del personal del campo que opera cerca a estos

Otras de las consideraciones que se puede tener en cuenta al momento de reducir las pérdidas de calor es la longitud de las líneas de superficie, lo recomendado es que la distancia entre el generador y el cabezal de pozo no superen los 1,2 km²⁶, debido que si se aumenta dicha distancia la calidad del vapor en las arenas del pozo inyector se reduce ligeramente más de un 2% por el incremento de las pérdidas de calor, por lo cual se entrega menor energía al yacimiento.

²⁵ VALBUENA, E.; BASHBUSH, J.L.; RINCON, A. Op. cit., p. 4

²⁶ VALBUENA, E.; BASHBUSH, J.L.; RINCON, A. Op. cit., p. 4

5. CASO DE ESTUDIO (CAMPO JAZMÍN)

En los capítulos anteriores se definieron las facilidades de superficie requeridas para llevar a cabo el proceso de inyección de vapor, de igual forma se determinaron las pérdidas de calor que presentan las mismas, y algunos mecanismos para reducir dichas pérdidas. En este capítulo se abordarán las temáticas estudiadas aplicadas al caso de estudio presentado, Campo Jazmín.

5.1 ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN CAMPO JAZMÍN

Uno de los métodos para determinar las pérdidas de calor presentes en el proceso de inyección de vapor es la simulación numérica. El uso de los simuladores en la industria ha sido de gran ayuda, puesto que permite calcular diferentes variables importantes para realizar un estudio, con el cálculo de estas variables lograr establecer diferentes escenarios para seleccionar las condiciones óptimas de operación, y de esta forma tener una base fundamentada para elegir el procedimiento adecuado teniendo cuenta costo beneficio de la elección que se realice

Actualmente en el mercado existen varios simuladores de flujo multifásico que permiten realizar las tareas mencionadas, dentro de los cuales se encuentran OLGA, LEDAFLOW, PIPESIM. Para el análisis de las variables que se estudiarán en el proyecto se seleccionó PIPESIM, puesto que este simulador permite determinar un transporte de fluidos seguro y efectivo, desde el dimensionamiento de las facilidades, tuberías y sistemas de levantamiento, hasta asegurar el manejo adecuado de líquidos y sólidos, la integridad del pozo y la tubería.

Para el uso del simulador PIPESIM, el primer paso que se realiza es la construcción de la red que conducirá el vapor desde el generador hasta el pozo, cabe resaltar que los valores considerados de la simulación para el análisis del proyecto, serán

las distancias actuales desde el generador hasta el manifold de cada clúster más representativas para el estudio, siendo dichos valores la menor y la mayor distancia en campo Jazmín, Clúster JAZMIN 1 con respecto al gen X (3100 ft) y Clúster JAZMIN 2 con respecto al gen W (9842 ft). La red consta de una fuente (generador de vapor), líneas de superficie, nodo (manifold) y un sumidero (pozo inyector).

Una vez que se ha completado la red, se procede al ingreso de la data necesaria de Campo Jazmín, la cual es mostrada en la Tabla 3 y Tabla 4, estos valores representan las características de todos los generadores que están trabajando actualmente en campo Jazmín, así como las de las líneas de superficie de generador de vapor al manifold de cada clúster:

Tabla 3. Generador de vapor

PROPIEDAD	PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
Presión del vapor	Normal	1200	psi
	Máxima	1500	psi
Temperatura del vapor	Promedio	567	°F
Calidad de vapor	Promedio	80	%
Consumo de agua en los generadores	Normal	90	GPM
	Máxima	110	GPM

Fuente: CASTIBLANCO, L.; PACHANO, K.; SALAMANCA, A. "Campo Jazmín". Proyecto de inyección continua de vapor. (2012).

Dentro de este parámetro se debe tener en cuenta algunas consideraciones, como la longitud y diámetro de las líneas de superficie que existen actualmente en Campo Jazmín. Las tuberías que conducen el vapor desde el generador hasta el manifold tienen un diámetro nominal de 6" y la longitud puede ser desde 3100 ft (945 m) hasta 9842 ft (3000 m), además que presentan un loop cada 328 ft (100 m) de distancia horizontal y 82 ft (2,5 m) de elevación, mientras que para la conexión desde el manifold hasta cabeza de pozo la tubería utilizada tiene un diámetro nominal de 3" y una longitud de 328 (100 m) a 500 ft (152 m).

Tabla 4. Líneas de superficie

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Temperatura del ambiente	90	°F
Coef. de cond. del viento	0.015	BTU/hr-ft-°F
Coef. de cond. de fibra de vidrio	0.0217	BTU/hr-ft-°F
Espesor de aislamiento	2	in

Fuente: CASTIBLANCO, L.; PACHANO, K.; SALAMANCA, A. "Campo Jazmín". Proyecto de inyección continua de vapor. (2012).

El análisis del proyecto radicará en las pérdidas de calor desde el generador de vapor hasta manifold, por lo cual no se hará necesario la realización de un pozo inyector, a su vez se implementará un sumidero, el cual solo requiere de la presión de vapor en cabeza de pozo, que para el caso es un valor promedio de 900 psi.

Posterior al ingreso de la data necesaria para correr la simulación, se procede a generar los perfiles de presión (Figura 10), temperatura (Figura 11) y calidad de vapor (Figura 12), ya que con estos parámetros se podrá establecer las pérdidas de calor que presenta el sistema a lo largo del flujo de vapor. Teniendo en cuenta que la presión mínima de vapor en el manifold, dato especificado por los ingenieros del área de producción de campo Jazmín para llevar a cabo la inyección de vapor a un pozo con el menor número de pérdidas de calor posibles es de 1050 psi.

Figura 10. Gráfica de Presión Vs Distancia

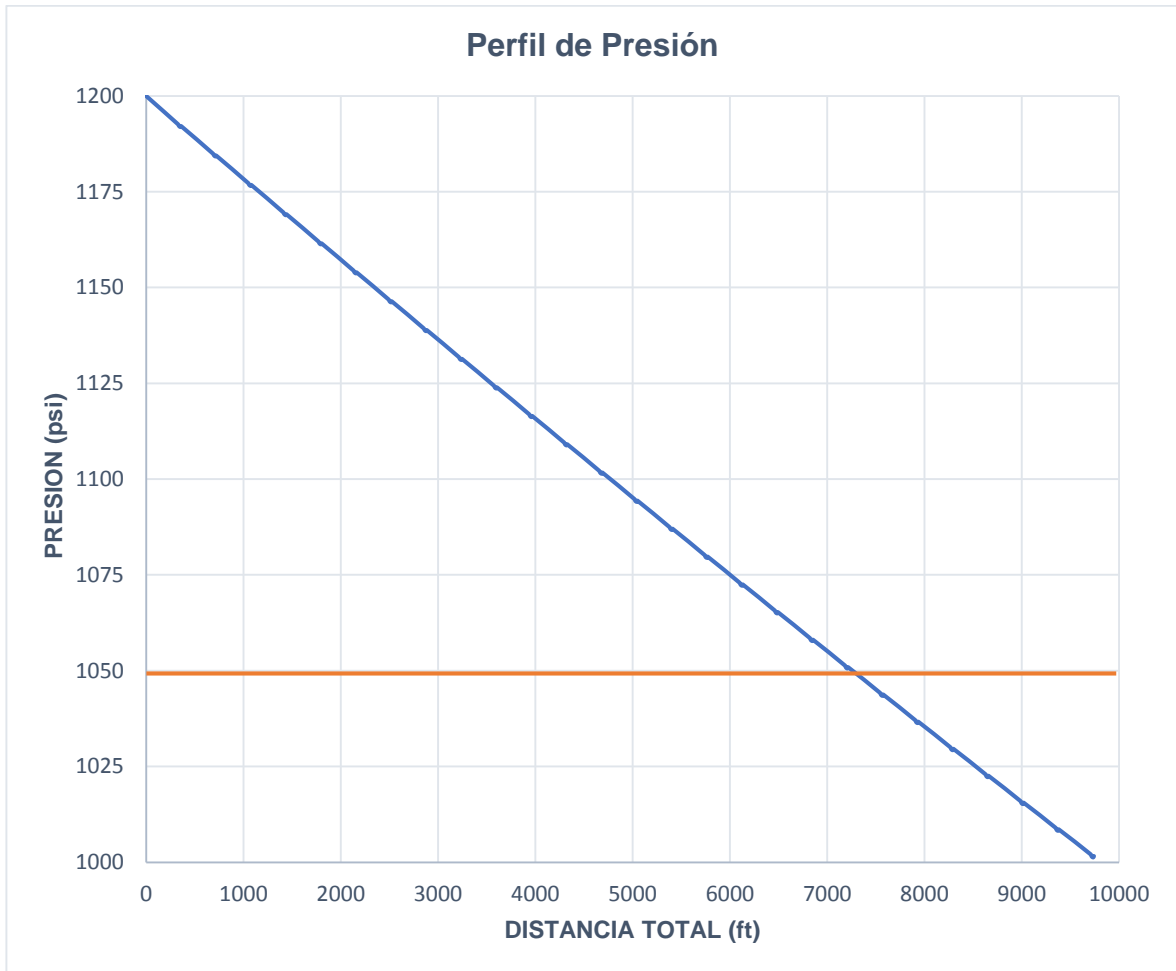


Figura 11. Gráfica de Temperatura Vs Distancia

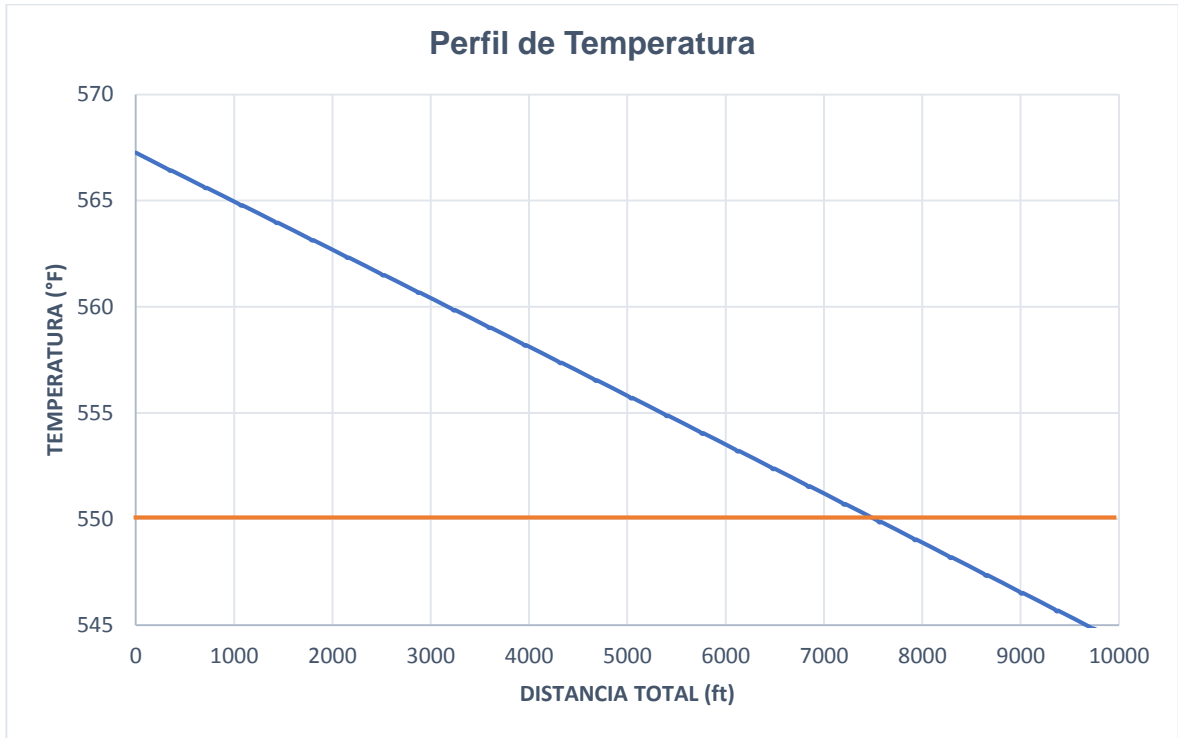
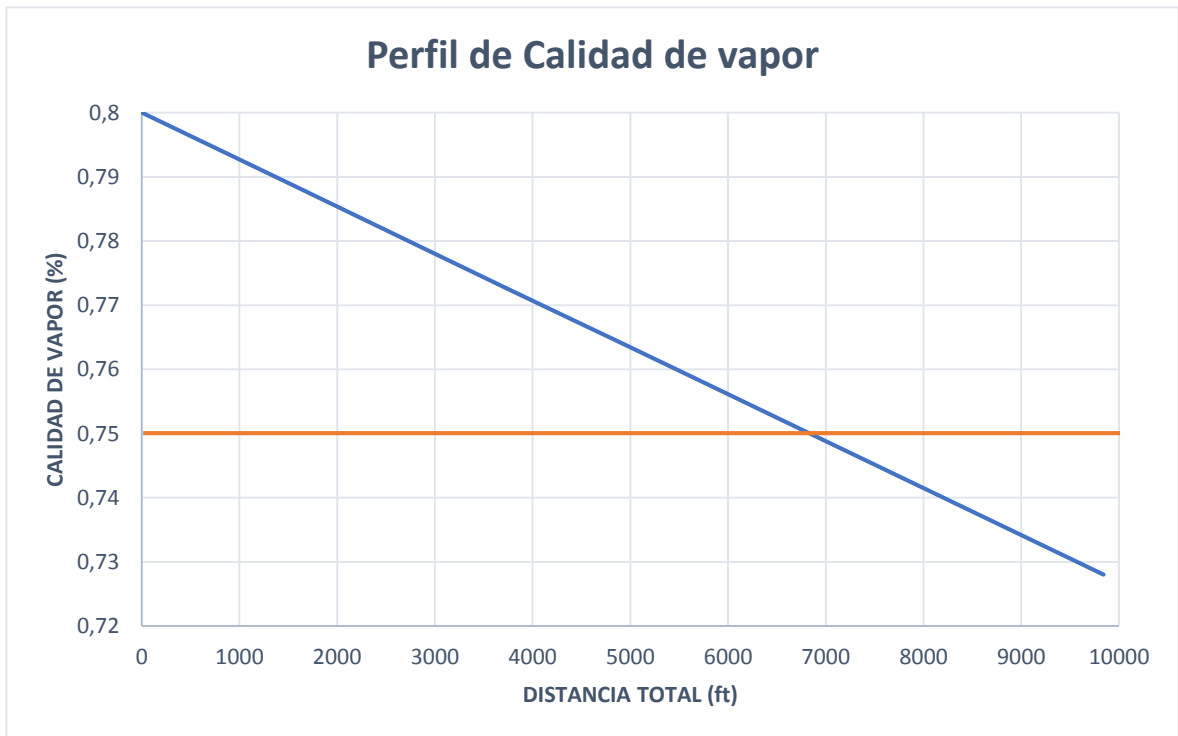


Figura 12. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia



Con los perfiles de presión, temperatura y calidad de vapor, se evidencia grandes pérdidas de calor cuando la distancia que recorre el flujo de vapor desde el generador hasta el manifold es superior de 6900 ft (2100 m), ya que se obtiene una presión de vapor por debajo del valor mínimo requerido, la temperatura decae a valores inferiores de 550 °F, y la calidad de vapor disminuye a valores iguales o menores del 75%.

Los valores obtenidos en estos parámetros son muy bajos, y no permitirán obtener un factor de recobro alto, ya que la energía entregada al yacimiento no será suficiente para lograr la producción que se requiere, por tal motivo se hace necesario del uso de mecanismos que permitan mantener los niveles operativos óptimos.

5.2 DIÁMETRO ÓPTIMO DE LAS LINEAS DE SUPERFICIE

Dentro de las variables que se tienen en consideración para el proceso de inyección de vapor, que influya en gran medida en la caída de presión, temperatura y calidad de vapor es el diámetro de la tubería que se utiliza para conducir el vapor, por lo cual una de las medidas correctivas para mantener los rangos operativos óptimos es seleccionar el diámetro que presente las menores pérdidas de calor, y que tenga una buena relación de costo-beneficio. Por tal motivo se realizará una comparación de diferentes diámetros de líneas de superficie (Tabla 5), teniendo en cuenta que deben cumplir con los siguientes criterios para obtener una buena eficiencia en el proceso de inyección de vapor.

- Velocidad máxima en tubería:

$$VELOCIDAD\ EROSIONAL = \frac{100}{\sqrt{3,6461 \frac{lb}{ft^3}}}$$

$$VELOCIDAD\ EROSIONAL = 52,37 \frac{ft}{s}$$

- La caída de presión máxima: 2,5 psi/100 ft.

Los diámetros de tuberías que cumplen con los requerimientos técnicos son los de 6", 8" y 10", sin embargo teniendo en cuenta la relación costo-beneficio, resulta más económico seleccionar el diámetro más pequeño de tubería que presente bajas pérdidas de calor posible, por lo cual el diámetro óptimo de la línea de superficie es el de 6", debido que esta tubería es la que se usa en campo Jazmín desde generador a manifold, no se tendrá que realizar una inversión para cumplir con este parámetro.

Tabla 5. Comparación de diferentes diámetros de línea de superficie

Diámetro nominal (in)	Designación del espesor de pared de tubería	Diámetro interno (in)	Velocidad (ft/s)	Pérdidas de presión (psi/100 ft)
2	XS	1,94	203,67	234,29
3	STD	3,07	81,35	21,27
4	STD	4,03	47,24	5,16
6	STD	6,07	20,82	0,61
8	STD	7,98	12,02	0,14
10	STD	10,02	7,62	0,05

5.3 EVALUACIÓN DE AISLANTES TÉRMICOS

Uno de los mecanismos aplicados en la industria para contrarrestar las pérdidas de calor presentes en un sistema es el aislamiento térmico, ya que el uso de un aislante sobre la tubería restringe el flujo del calor proveniente del vapor hacia el ambiente.

En el mercado se encuentra una gran variedad de aislantes térmicos, los cuales se clasifican de acuerdo con el material con que fueron hecho, de la conductividad térmica que posee, de la temperatura de operación permitida, entre otras variables. Para el desarrollo del proyecto, se comparan dos tipos de aislantes térmicos.

- Rolloflex: rollos de lana mineral de roca aglutinados con resina termoestable y reforzado con foil de aluminio en una de las caras. Entre las especificaciones técnicas tiene una temperatura de operación de 849.2 °F y una conductividad térmica de 0.25 BTU-in/hr-ft²-°F.
- Flex wrap: rollos de fibra de Vidrio de alta calidad y eficiencia térmica. La fibra de vidrio presenta bucles sobre un laminado, aportando la rigidez necesaria para mantener el espesor del aislamiento uniforme y la resistencia mecánica para hacerlo durable. Entre las especificaciones técnicas tiene una temperatura de operación de 850 °F y una conductividad térmica de 0.29 BTU-in/hr-ft²-°F.

De acuerdo a los aislantes térmicos mostrados anteriormente, para la realización de la simulación se seleccionó un generador de vapor con respecto a un clúster que cumpliera con la distancia óptima, el gen X y el clúster JAZMIN 1 (3100 ft), un diámetro de 2" del aislante y la conductividad térmica que presenta cada uno, con el objetivo de establecer las caídas de presión (Figura 13), temperatura (Figura 14) y calidad de vapor (Figura 15) que presentaría proceso al momento de implementarlos.

Figura 13. Gráfica de Presión Vs Distancia

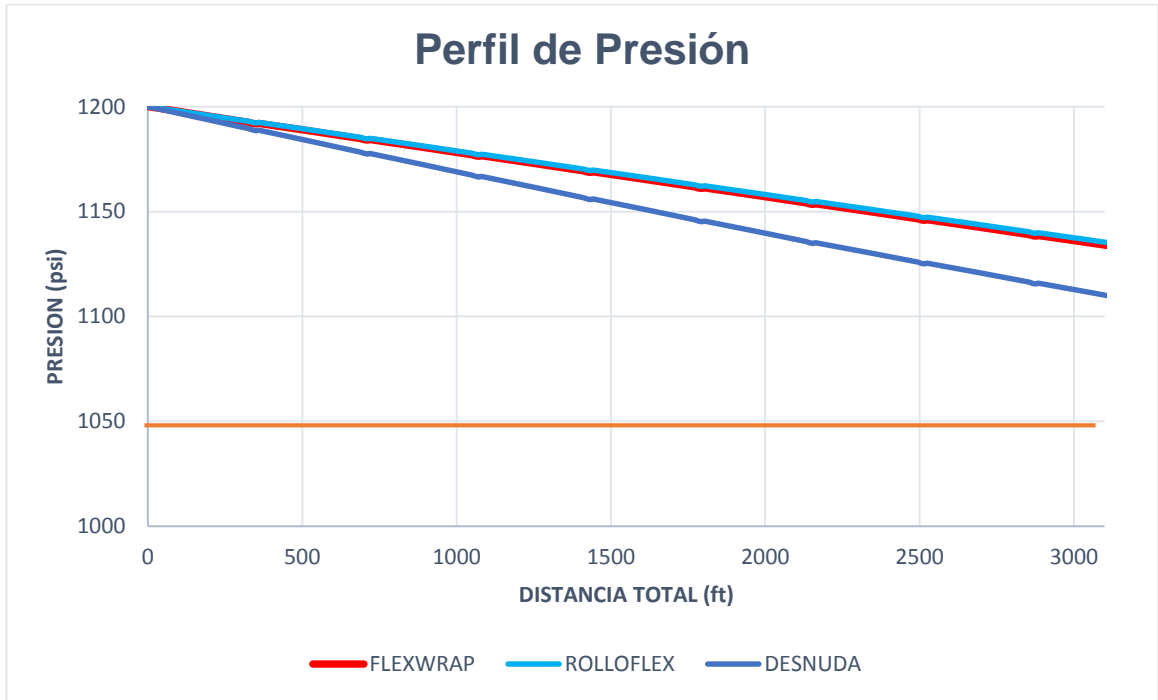


Figura 14. Gráfica de Temperatura Vs Distancia

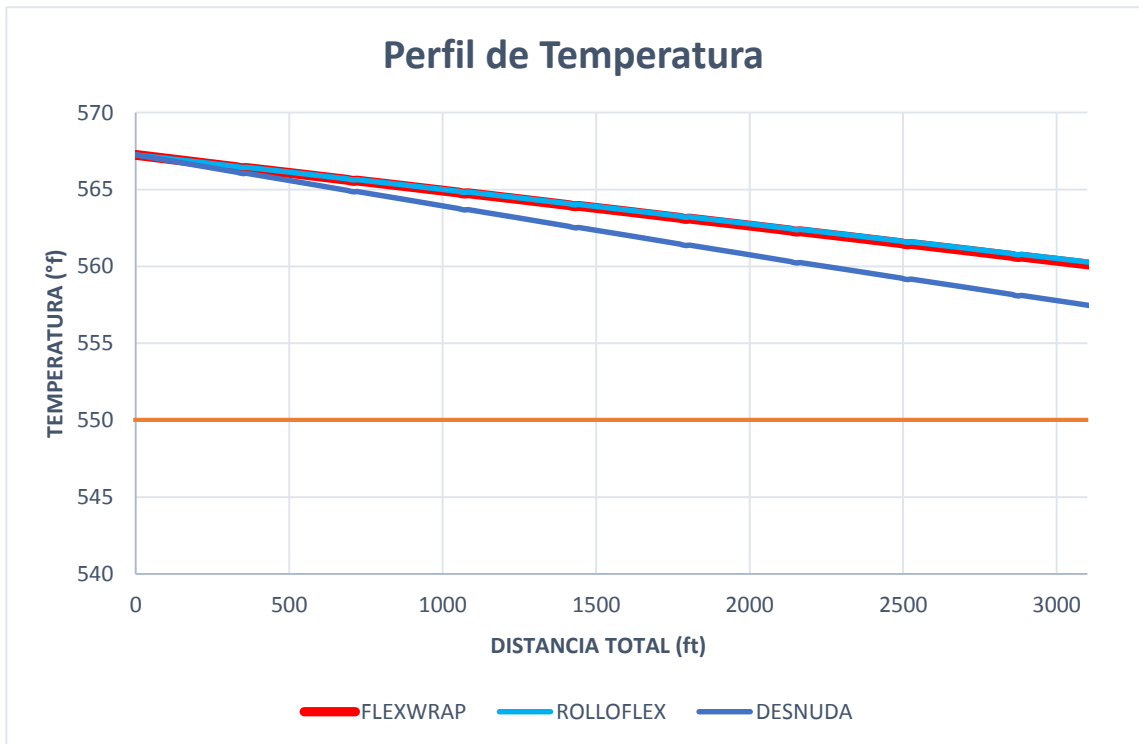
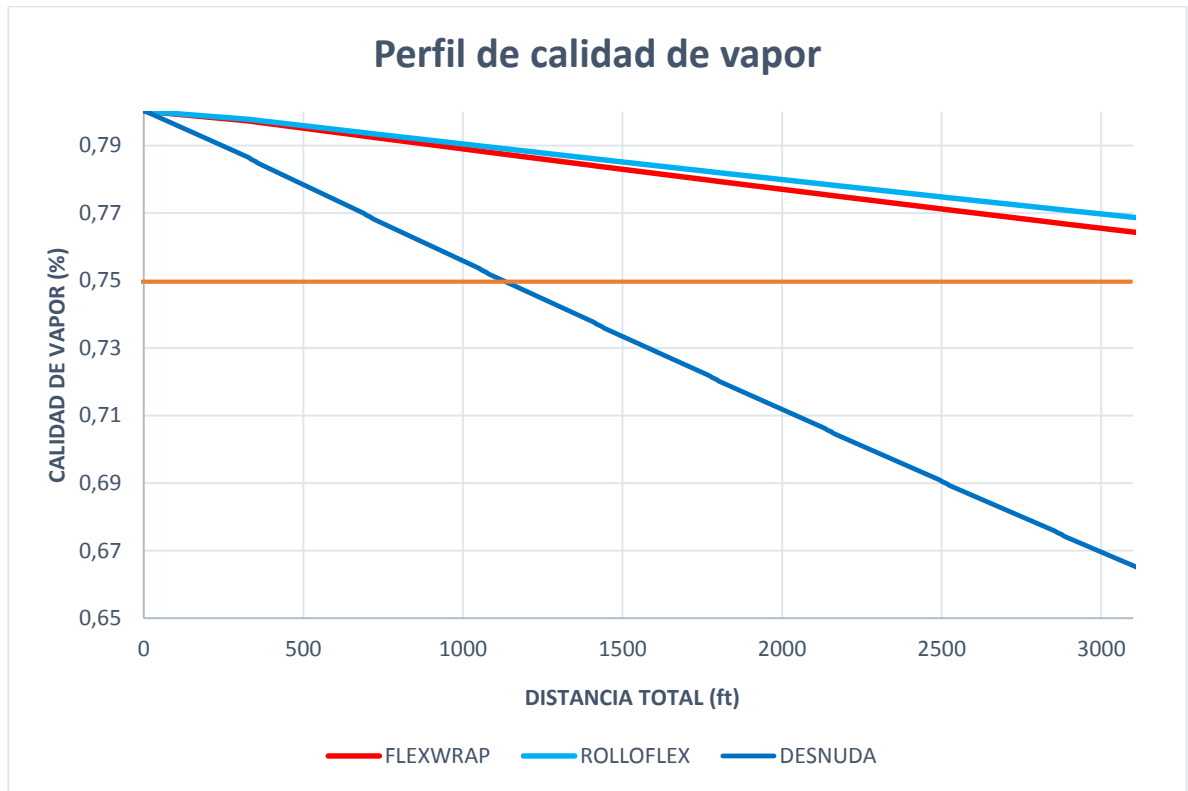


Figura 15. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia



A partir de los perfiles generados, se observa que se presentó una baja caída de los parámetros estudiados desde el gen X con respecto al clúster JAZMIN 1 con el uso de los aislantes térmicos, sin embargo, teniendo en cuenta a las ventajas del tipo de material del aislante no hay gran diferencia entre los considerados para el estudio, por lo cual se seleccionará el aislante térmico Rolloflex, al ser el más económico en el mercado.

Sin embargo, se hace necesario determinar el espesor del aislante térmico que presente las menores pérdidas de calor, a partir de los parámetros estudiados, por lo cual se simulará nuevamente para obtener los perfiles de presión (Figura 16), temperatura (Figura 17) y calidad de vapor (Figura 18), variando el espesor del mismo, conservando el caso estudio de gen X - clúster JAZMIN 1.

Figura 16. Gráfica de Presión Vs Distancia

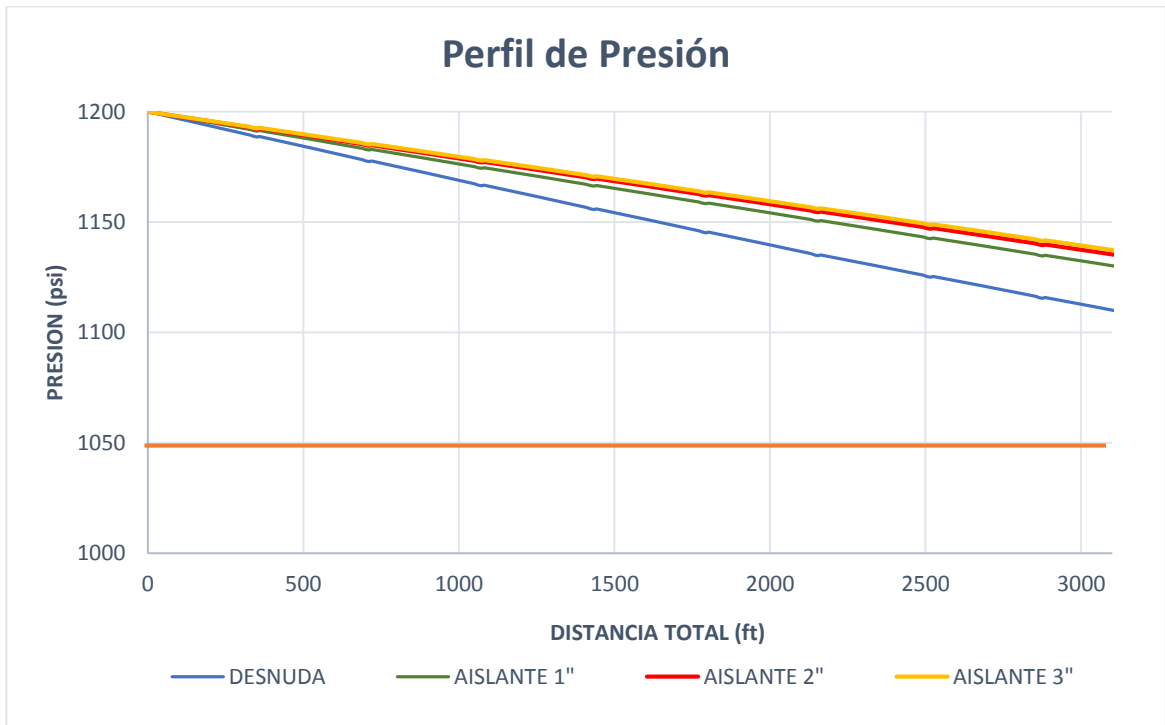


Figura 17. Gráfica de Temperatura Vs Distancia

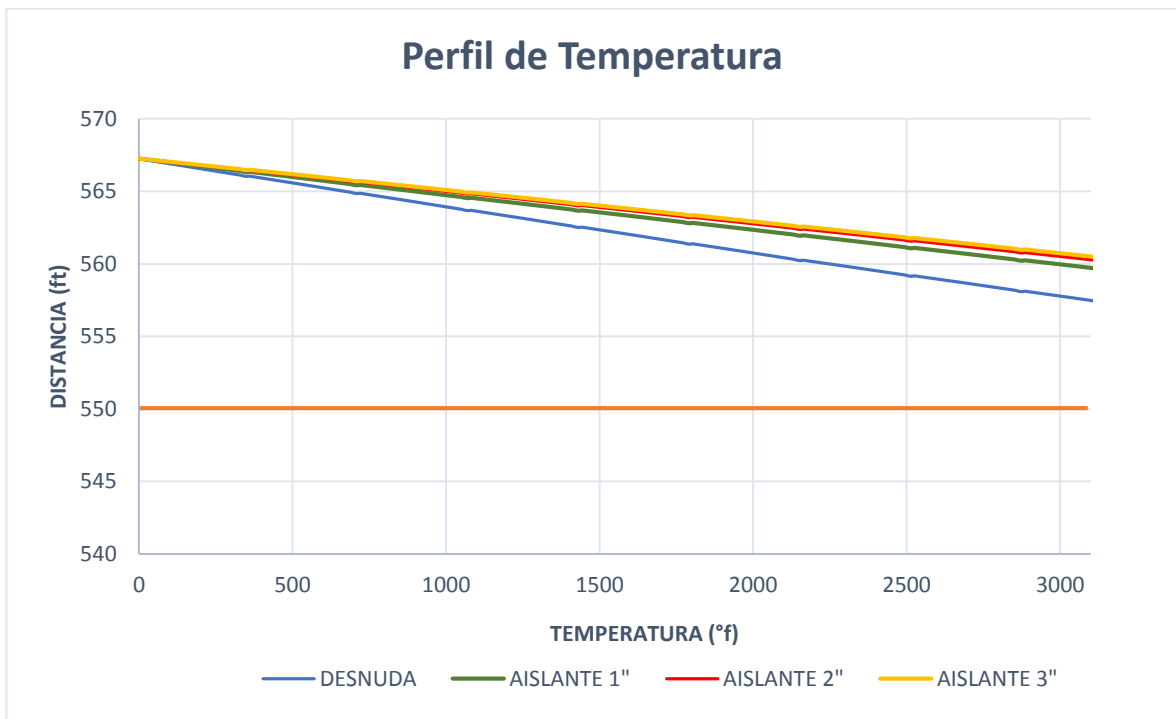
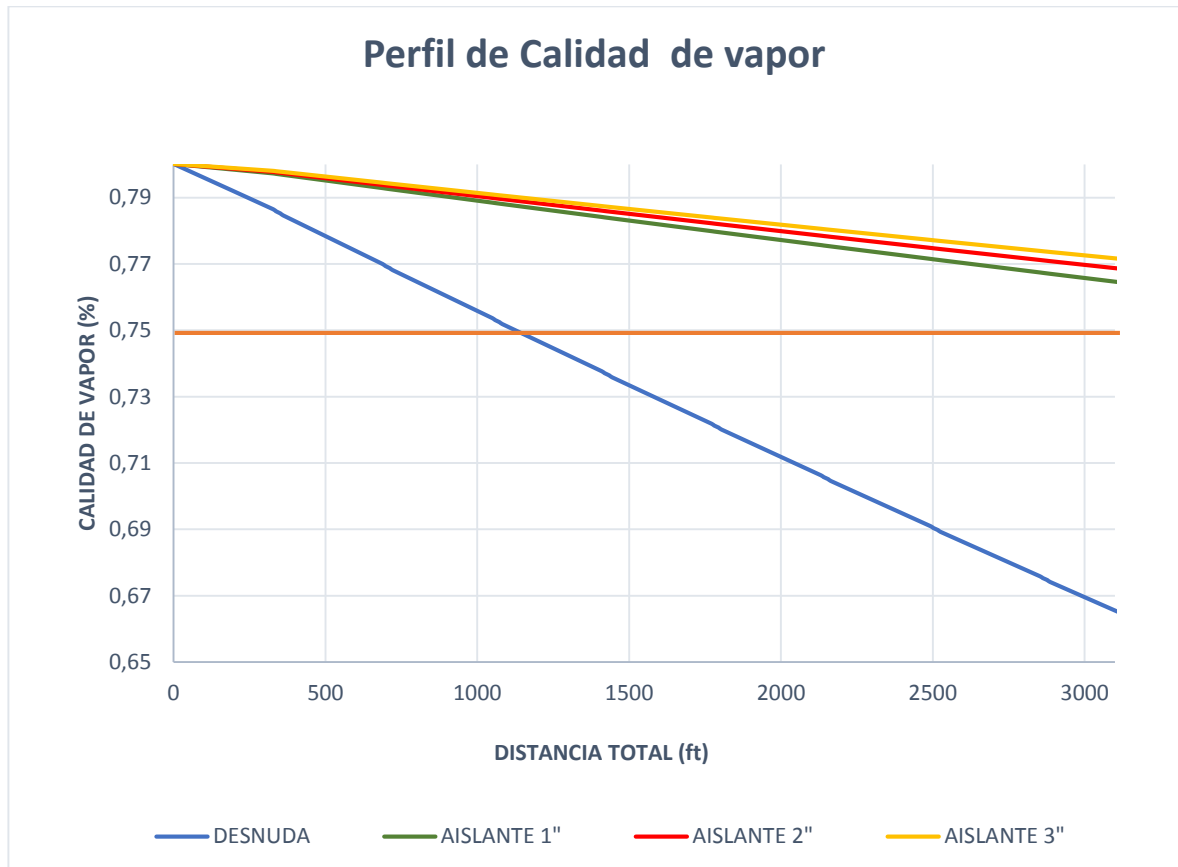


Figura 18. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia



Considerando los perfiles que se obtuvieron anteriormente, el espesor del aislante que presentan las mejores condiciones para aumentar la eficiencia en la inyección de vapor es el de 3", no obstante, para determinar el espesor óptimo del aislante se debe tener en cuenta el análisis económico que se realizará a continuación.

5.4 ESPESOR ÓPTIMO DEL AISLANTE TÉRMICO

Para definir el espesor óptimo de aislante a ser utilizado en campo Jazmín es necesario tener en cuenta un análisis económico que permita definir respecto a

costos, el aislante más adecuado para dichas tuberías, teniendo en cuenta las diferentes variables externas.

Como se mencionó anteriormente el material escogido es Rolloflex, que consiste en finas fibras de Lana Mineral de Roca elásticas, esponjosas y aglutinadas con resinas termoestables en forma de rollos, este material me proporciona mejor calidad a un menor precio, por lo que solo este se tendrá en cuenta en el análisis de costos²⁷.

5.4.1 Costo total del proyecto. Para determinar el costo total del proyecto de implementación de aislamiento térmico se deben tener en cuenta el valor del aislante a utilizar y el costo de la energía perdida.

5.4.1.1 Costo del aislante. El costo de aislamiento depende del área superficial de la tubería que se recubrirá con dicho material. Se debe tener en cuenta un 10 % extra como un factor de seguridad para posibles eventos.

- Área superficial de la tubería (A_{TF})

$$A_{TF} = 1,1 * A_{TD} \quad (21)$$

Donde A_{TF} es el área de la tubería con el factor de seguridad (ft^2).

- Área de la tubería con el factor de seguridad (A_{TD}).

$$A_{TD} = \frac{\pi D}{12} * L_L \quad (22)$$

Donde A_{TD} es el área superficial de la tubería (ft^2).

²⁷ GILBERT, A.; RETIRADO, Y.; LAURENCIO, H.; PALACIOS, A.; GONGORA, E. "Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor". En: Minería y geología. (2016). Vol. 32, No. 2, p. 21-37.

- Costo del material aislante ($Costo_a$)

$$Costo_a = A_{TF} * Precio_a \quad (23)$$

Donde $Precio_a$ es el precio del material aislante $\left(\frac{US\$}{ft^2}\right)$.

Una vez determinado el costo del aislante, se calcula el costo de la energía

5.4.1.2 Costo de la generación de vapor Para determinar el valor de la energía perdida es necesario calcular la energía disipada y multiplicarla por el precio, de acuerdo con cada uno de los escenarios: tubería desnuda y tubería aislada.

- **Tubería desnuda**

Para determinar el costo de la energía en tubería desnuda, primeramente, se debe calcular el costo de generación de vapor para transportar vapor en tubería desnuda ($Costo_{ed}$)

$$Costo_{ed} = E_d * Precio Energia \quad (24)$$

Donde E_d es la energía disipada al transportar vapor en tubería desnuda $\left(\frac{BTU}{año}\right)$

- Energía disipada al transportar vapor en tubería desnuda (E_d)

$$E_d = Q_d * Tiempo de funcionamiento \quad (25)$$

Donde Q_d son pérdidas de calor en tubería desnuda $\left(\frac{BTU}{hr*ft}\right)$.

- **Tubería Aislada**

En la tubería aislada se realizan los mismos cálculos de una tubería desnuda, para calcular el costo de la energía.

$$Costo_{ea} = E_a * Precio \text{ Energia} \quad (26)$$

Donde E_a es la energía disipada al transportar vapor en tubería aislada $\left(\frac{BTU}{año}\right)$

- Energía disipada al transportar vapor en tubería aislada (E_a).

$$E_a = Q_a * Tiempo \text{ de funcionamiento} \quad (27)$$

Donde Q_a son pérdidas de calor en tubería aislada $\left(\frac{BTU}{hr*ft}\right)$.

Una vez obtenidos el costo del aislante y el costo de la energía perdida se procede hallar el costo total y el ahorro aparente generado por el uso de aislante térmico.

- Costo total tubería aislada ($Costo_t$)

$$Costo_t = Costo_a + Costo_{ea} \quad (28)$$

Donde $Costo_a$ es el costo del material aislante (USD) y $Costo_{ea}$ es el costo de generación de vapor para transportar vapor en tubería $\left(\frac{US\$}{año}\right)$.

- Ahorro aparente

$$Ahorro \text{ aparente} = Costo_{ed} - Costo_t$$

Donde $Costo_{ed}$ es el costo de generación de vapor para transportar vapor en tubería desnuda $\left(\frac{US\$}{año}\right)$

Para el análisis económico realizado en las tuberías de campo Jazmín se definió el caso estudio generador X y el clúster JAZMIN 1 con una longitud de 3100 ft, ya que no se cuenta con la información completa para determinar la longitud de las tuberías a aislar, y un tiempo de estudio de un año, resaltando que el funcionamiento del generador es de 362 días al año, es decir 8688 horas, debido a los manteamientos realizados a los equipos durante el año.

Tabla 6. Datos caso Campo Jazmín

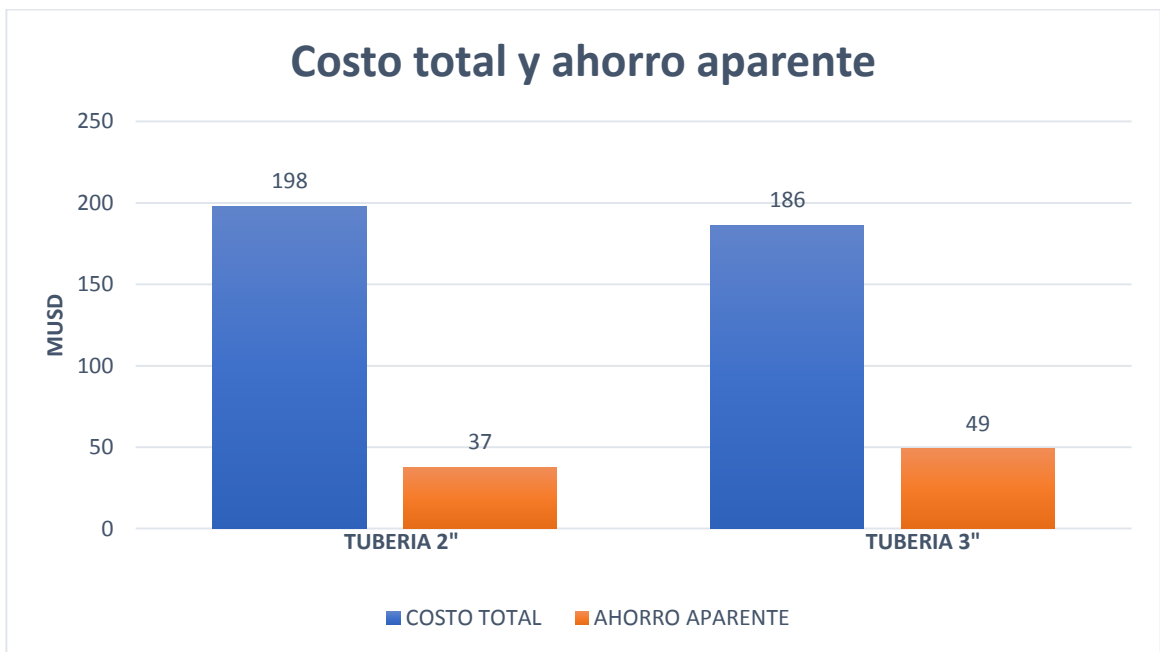
PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Tiempo de funcionamiento	8688	hr/año
Precio del aislante 2"	5,19	USD/ft ²
Precio del aislante 3"	6,89	USD/ft ²
Precio de la energía	0,08	USD/Kwh
Longitud	3100	ft
Temperatura del vapor	567	°F
Temperatura ambiente	90	°F

De acuerdo con el análisis económico realizado en campo jazmín el espesor óptimo de aislamiento es de 3" debido a que presenta una calidad alta y la diferencia de ganancias con respecto al aislante de 2" es significativa, ya que el ahorro aparente es mucho mayor con el aislante seleccionado (Tabla 7).

Tabla 7. Costos de aislamiento en tuberías de Campo Jazmín

PROPIEDAD	TUBERIA DESNUDA	TUBERIA 2"	TUBERIA 3"
Diámetro, r (in)	6,05	8,05	9,05
Coefficiente de transferencia de calor, U (BTU/hr*ft ² *°F)	0,52	0,24	0,18
Pérdidas de energía, Q (MBTU/hr)	1219	742	650
Energía disipada, Ed (MMBTU/año)	10,59	6,44	5,64
Costo Generación de vapor(MUSD/año)	235	143	125
Costo Aislante (MUSD)	0	55	61
Costo Total (MUSD)	235	198	186
Ahorro Aparente (MUSD)	0	37	49

Figura 19. Diferencia costo total y ahorro aparente con aislantes de 2" y 3"



A partir de los datos calculados anteriormente, el uso de aislante disminuye de manera significativa las pérdidas de energía, y consigo los costos de inversión.

5.5 DISTANCIA ÓPTIMA PARA TUBERIA ENTERRADA

En algunas ocasiones en campo se implementa el enterramiento de la tubería, debido a ciertas condiciones, como poco espacio en superficie para que la tubería pueda ser ubicada en esta área, por lo cual recurren a enterrarla para no desviar el trayecto que debe seguir la misma. Sin embargo, realizar esta acción puede traer consigo algunos inconvenientes en el proceso de inyección de vapor, ya que también en este tipo de tuberías se generan pérdidas de calor, las cuales deben ser calculadas de igual forma que una tubería desnuda o aislada, para determinar la eficiencia que tiene el proceso.

Por tal motivo se realizarán los perfiles de los parámetros estudiados anteriormente para determinar las pérdidas de calor en un caso teórico, que se podrían presentar al momento de utilizar tubería enterrada en el proceso de inyección de Campo Jazmín desde generador a manifold, teniendo en cuenta que los datos que se utilizaron para la simulación de dicha tubería, están plasmados en la estimación de pérdidas de calor en campo Jazmín (Tabla 3 y Tabla 4), adicionando el dato de profundidad de enterramiento de la tubería que es de 2,62 ft (80 cm).

Teniendo en cuenta los perfiles generados de los parámetros estudiados, no es conveniente realizar la inyección de vapor con tuberías enterradas a distancias mayores de 4500 ft (1372 m), debido que se presenta una gran caída en dichos parámetros, alcanzando bajos valores que reflejan altas pérdidas de calor, ocasionando que la energía entregada al yacimiento no sea la requerida, por lo tanto, el proceso no sea eficiente, cabe destacar que la simulación en tuberías enterradas se realizó con aislante de 2" de material Fibra de vidrio como se encuentra actualmente en campo jazmín para las tuberías en superficie.

Figura 20. Gráfica de Presión Vs Distancia para tuberías enterradas

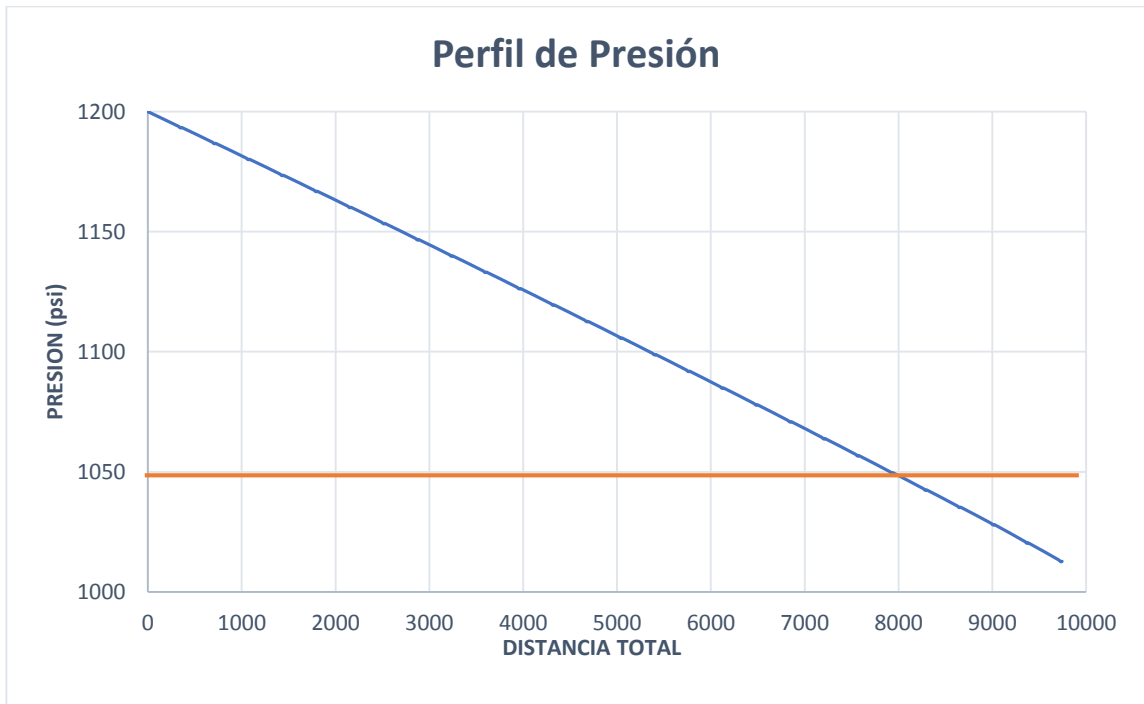


Figura 21. Gráfica de Temperatura Vs Distancia para tuberías enterradas

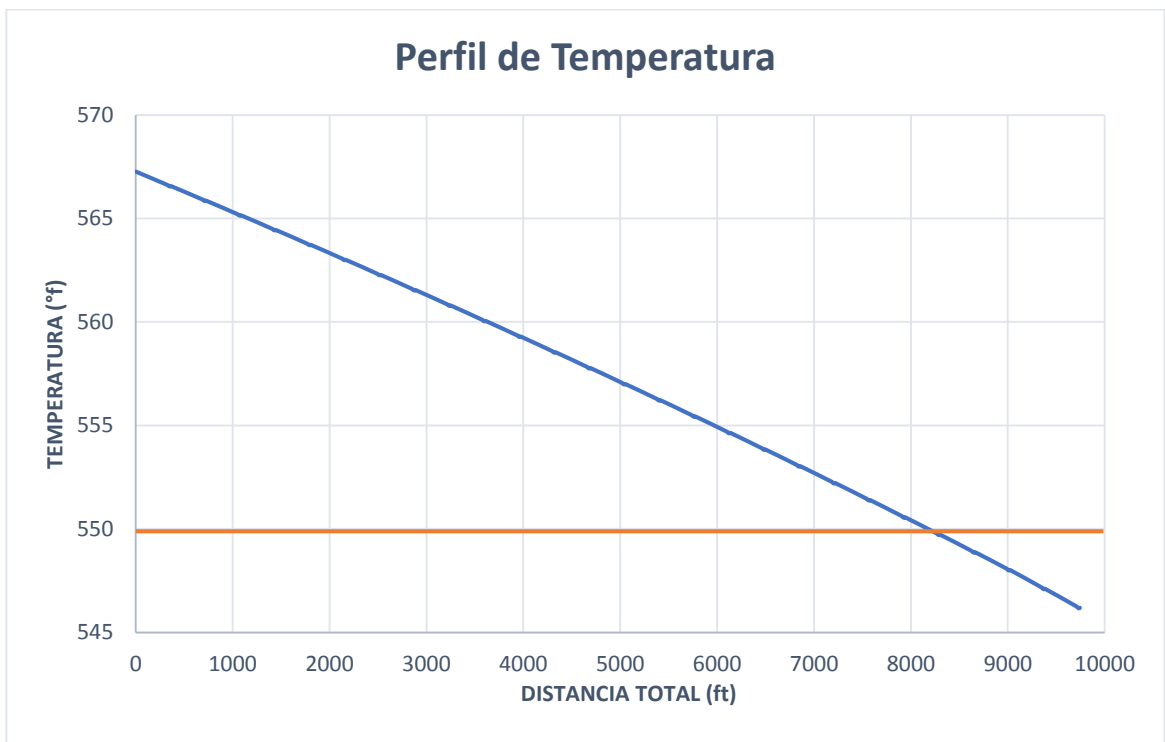
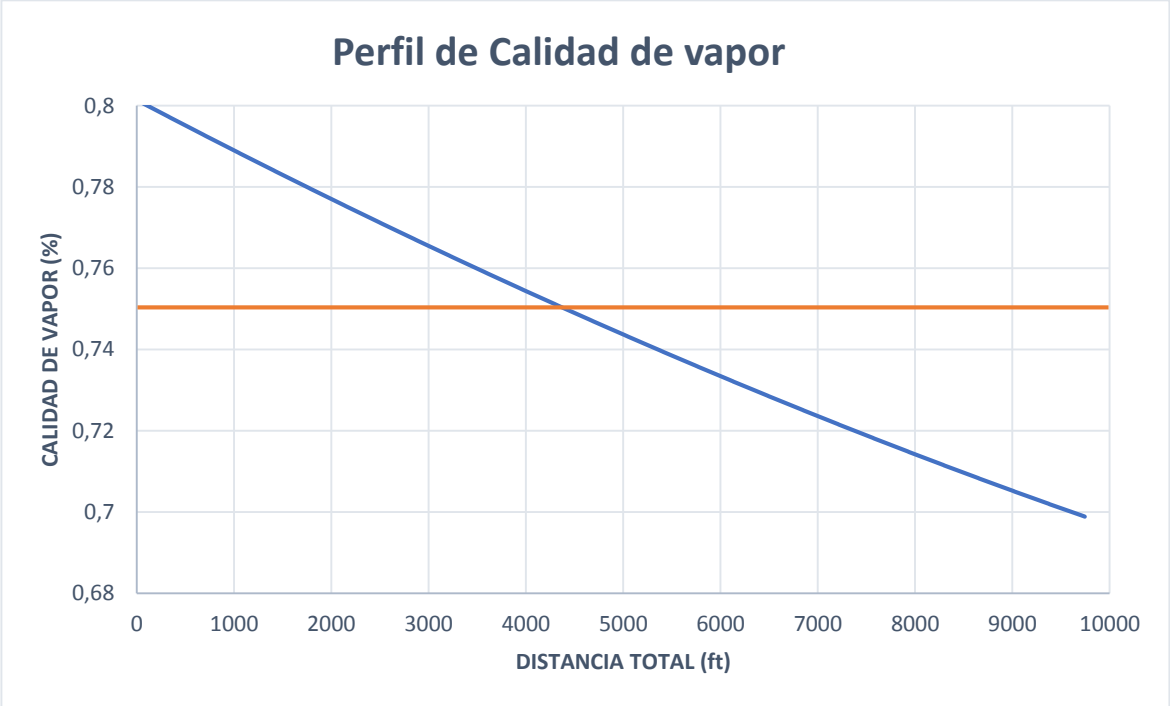


Figura 22. Gráfica Calidad de vapor Vs Distancia para tuberías enterradas



6. ANALISIS DE RESULTADOS

El propósito principal de este proyecto consiste en reducir la problemática en la inyección de vapor en campo Jazmín, siendo este las pérdidas de calor durante el transporte de vapor desde generador a manifold, como método de solución se propuso buscar las condiciones óptimas para el transporte de vapor a través de las líneas de flujo de generador a manifold mejorando la calidad de este, aumentando así la eficiencia del proceso en general, estas condiciones fueron definidas a través de la herramienta computacional PIPESIM simulando el proceso con las condiciones actuales de campo Jazmín.(Tabla 8)

Tabla 8. Condiciones óptimas para campo Jazmín

PARAMETRO ÓPTIMO	VALOR	UNIDADES
LONGITUD DE GEN-MAN	6900	ft
DIÁMETRO LÍNEA DE SUPERFICIE	6	in
TIPO DE AISLANTE	Lana Mineral	
ESPESOR DEL AISLANTE	3	in
LONGITUD DE GEN - MAN EN TUB. ENTERRADA	4500	ft

La implementación de las condiciones óptimas permiten mejorar en al menos un 3% la calidad del vapor y una caída de presión y temperatura mucho menor respecto a las condiciones actuales del campo, asegurando una mejor distribución de vapor y un proceso mucho más eficiente, cabe destacar que muchas de las condiciones ya se encuentran implementadas en campo como el diámetro de la tubería y es posible controlar las distancias de generador a manifold siguiendo la distribución recomendada en la tabla 9, resaltando que si el proceso de inyección de vapor se

realiza con distancias mayores a las propuestas, estas serán las zonas que presentarán las mayores pérdidas de calor.

Tabla 9. Distribución de generadores de vapor Campo Jazmín

Generador de vapor	No. de Clúster	Distancia (ft)	Diámetro tubería
X	8 clúster	5577	6"
W	7 clúster	5413	6"
Y	5 clúster	3281	6"
Q	6 clúster	5577	6"
P	9 clúster	3609	6"
L	11 clúster	4265	6"
M	9 clúster	3281	6"
N	8 clúster	6069	6"
O	3 clúster	2625	6"
C	3 clúster	1312	6"

7. CONCLUSIONES

La longitud máxima de las líneas de superficie desde el generador a manifold para la inyección de vapor en campo Jazmín, no debe ser superior a 6900 ft (2100 m), y en tuberías enterradas de 4500 ft (1372 m), ya que a una distancia mayor genera una caída de presión y calidad significativa, habiendo definido esta distancia es recomendable seguir la distribución de generadores de vapor de generador, como se presentó en la tabla 8, ya que cumple con las condiciones establecidas para el campo.

El diámetro óptimo del aislamiento térmico utilizado en campo Jazmín debe ser de 3", y como material aislante ROLLOFLEX, teniendo en cuenta las pérdidas de calor generadas en la tubería y la relación costo-beneficio, debido que resulta más conveniente seleccionar este diámetro y material que presenta mínimas pérdidas de calor, para alcanzar la calidad de vapor deseada, sin elevar el costo total del proyecto.

Según el estudio realizado en este proyecto el diámetro óptimo de las líneas de superficie en campo Jazmín es de 6", debido que presenta una alta eficiencia en el proceso de recobro térmico *Huff & Puff*, reduciendo de manera significativa las pérdidas de calor lo que contribuye que la energía entregada al yacimiento sea la adecuada, además este es el mínimo diámetro que cumple con los valores de velocidad erosional y caída de presión máxima establecida para campo Jazmín.

8. RECOMENDACIONES

Realizar una búsqueda de nuevas técnicas que permitan aumentar la eficiencia del proceso de recobro térmico *Huff & Puff*, mediante la disminución de las pérdidas de calor que no implique una inversión tan alta como la implementación de aislamiento térmico.

Desarrollar una investigación mediante simulación numérica que permita determinar las pérdidas de calor presentes en el proceso de recobro térmico *Huff & Puff*, desde generador de vapor hasta fondo de pozo en campo Jazmín.

Realizar un análisis financiero que muestre la influencia de este proyecto en cuanto a la economía del campo, determinando el aumento de la producción al momento de implementar el proceso térmico *Huff & Puff*, con los parámetros óptimos establecidos en el estudio realizado.

BIBLIOGRAFÍA

CAMERON, SLB Company. "How it Works: Steam traps". [en línea]. [EE. UU]: Schlumberger Company. 2018. [citado 9 ene. 2018]. Disponible: <http://cameron.slb.com/products-and-services/valves-index/valve-academy/how-does-it-work-steam-traps>

CASTIBLANCO, L.; PACHANO, K.; SALAMANCA, A. "Campo Jazmín". Proyecto de inyección continua de vapor. Bogotá, Mansarovar Energy. (2012). 73 p.

GILBERT, A.; RETIRADO, Y.; LAURENCIO, H.; PALACIOS, A.; GONGORA, E. "Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor". En: Minería y geología. (2016). Vol. 32, No. 2, 37 p.

HONG, K. C. "Two phase flow splitting at a Pipe Tee". En: SPE Journal Paper 6530-PA.1978. 7 p.

HONG, K. C.; GRISTON, S. "Best practice for the distribution and metering of two-phase steam". En: SPE Journal Paper 35422-PA. 1997. 8 p.

HONG, K.C.; GRISTON, S. "Two phase flow splitting at an Impacting Tee". En: SPE Journal Paper 27866-PA. 1995. 7 p.

JONES, J.; WILLIAMS, R.L. "A two-phase flow-splitting device that works". En: SPE Journal Paper 21532-PA. 1993. 6 p.

LEÓN, P.; BERNAL, D.; MUÑOZ, S.; ORDÓÑEZ, A. “Inyección de vapor en medianos. Recuperación y rentabilidad”. En: Revista Fuentes: el reventón energético. (2015). Vol. 13, No. 1, 69 p.

RAWLINS, H. “Facilities for steam generation”. [en línea]. [Houston, EE. UU]: PetroWiki, Society of Petroleum Engineers (SPE), ene. 2016. [citado 4 ene. 2018]. Disponible: http://petrowiki.org/Facilities_for_steam_generation

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL OCCIDENTE; UNIVERSIDAD DEL ATLANTICO. “Eficiencia energética de la generación y distribución del vapor”. Proyecto de UPME y Colciencias. 39 p.

VALBUENA, E.; BASHBUSH, J.L.; RINCON, A. “Energy balance in steam injection projects: Integrating surface-reservoir systems”. En: SPE Journal Paper 121489-MS. 2009. 6 p.

ZERKALOV, G. Steam Injection for Enhanced Oil Recovery. [en línea]. [Stanford, EE. UU]: Stanford University, dic. 2015 [citado 1 ene. 2018]. Disponible en: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/zerkalov2/>