

**OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR DEL AISLANTE TÉRMICO EN EL  
TRANSPORTE DE VAPOR EN TUBERÍAS DE SUPERFICIE EN PROCESOS DE  
INYECCIÓN DE VAPOR**

**JAVIER ORLANDO GUERRERO RIVERA  
CLAUDIA FERNANDA LEAL CONTRERAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2013**

**OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR DEL AISLANTE TÉRMICO EN EL  
TRANSPORTE DE VAPOR EN TUBERÍAS DE SUPERFICIE EN PROCESOS DE  
INYECCIÓN DE VAPOR**

**JAVIER ORLANDO GUERRERO RIVERA  
CLAUDIA FERNANDA LEAL CONTRERAS**

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

**Avalado por el Grupo de Recobro Mejorado en el marco de cooperación tecnológica 004 de  
2004 por la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL S.A, Instituto Colombiano del  
Petróleo**



**Director**

**SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO  
M. Sc. Ingeniero de Petróleos**

**Co-Directores**

**M. Sc. Carlos Eduardo Naranjo Suárez  
Ing. Luis Roberto Oliveros Gómez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2013**

## DEDICATORIA

*A Dios por darme la vida y llenarme de bendiciones que me han permitido alcanzar este logro y seguramente conseguir muchos más.*

*A mi mamá Amparo por ser el motor de todas mis sueños y mi cómplice en todas mis aventuras. Hoy nos graduamos los dos porque tú has sido la compañera más fiel e indispensable que tenido en toda mi vida. A mi papá Orlando por todo su apoyo, dedicación y consejos que han contribuido a formar lo que soy hoy.*

*A los mejores hermanos del mundo y espero sigan mi ejemplo; a Claudia que está lejos y la extraño todos los días y Camilo por ser el más noble y especial y quien siempre ha sido un apoyo incondicional. Y al ángel que nos protege a los tres desde el cielo. Esto para ustedes!*

*A mis primos: Javier, Viviana y Andrés porque son como mis hermanos mayores y los mejores ejemplos a seguir. A Fabri y Caro porque también son mi familia y su amistad es invaluable.*

*A mis Tías: Martha, Mayito y Susy por confiar en mí, motivarme y ayudarme en todo. A mi tía Cristina por ser la mejor teacher de inglés y mis demás primos y familiares que siempre han creído en mí. A Nanes y ChrizFco por su incondicionalidad y su fraternidad conmigo.*

*A mi novia Claudia, por ser la mejor amiga, confidente, compañera de estudios y de tesis. Gracias por ser el norte de este proyecto y apoyarme siempre y en todo momento. Gracias porque a tu lado he podido alcanzar muchos logros y estoy seguro de que juntos alcanzaremos muchos más. Te Amo.*

*A los que hoy no están conmigo pero siempre estarán en mi corazón. A mi Abuelita Alicia, quien siempre me apoyo ciegamente y junto con Don-A fueron patrocinadores de muchas de mis aventuras. A mi Abuelita Fredes quien me hizo mejor en matemáticas y a mi Abuelo Miguel quien siempre tenía una historia para compartir.*

*A mis amigos; Edward, Erick, Llano y Jorgito quienes siempre están ahí para apoyarme y han sido los responsables de momentos inolvidables, así como la fuente de buenos consejos. A Rafa y Mónica por su gran amistad y lealtad en todo momento. A mis amigos del colegio: Diego, Daniel, Yerson, Gabriel y Jota. Gracias a todos por demostrarme que los amigos verdaderos existen.*

*A mis compañeros que durante este paso por la Universidad me han enseñado tantas cosas y que más que compañeros se han convertido amigos: Diana, Pao, Sammy, Alejo, Felipe, Leo, mi junta de SPE y los integrantes de GRM.*

*A veces y sin darnos nuestras pequeñas acciones tienen grandes efectos sobre la vida de los demás. Por lo anterior quiero agradecerles y dedicarles este logro a todos ustedes, por contribuir positivamente en la consecución de este logro, el más importante de mi vida hasta ahora.*

*Javier*

## DEDICATORIA

A Dios, centro de mi vida, por guiar cada paso que doy, por ayudarme a superar tantas dificultades, por demostrarme que confiando en él, todo es posible, y especialmente por llenar de bendiciones a mí y a todos mis seres queridos.

A mi mamá hermosa, por ser mi apoyo incondicional, por confiar ciegamente en mí, por soportar mi estrés y malgenio, por enseñarme a exigirme a mí misma y por ser mi motivo de inspiración para alcanzar grandes logros cada día. Esto es para ti.

A mi abue preciosa, por cuidarme y brindarme todo su amor desde bebé, por ser una madre extraordinaria y por inculcarme tantos valores para ser mejor persona. Espero que siempre te sientas orgullosa de mí.

A mis hermanos, Alfonso, Milena y Laura, por ser mis grandes amigos, por confiar en mí, por escucharme y aconsejarme cuando más los necesito, por reírse junto a mí y por ser mis cómplices en tantas ocasiones.

A mi tía Maritza, por todo su cariño y ayuda, por ser otra madre para mí. A doña Amparo por brindarme su cariño y preocuparse por mi bienestar.

A Javier, por ser mi mejor amigo y mi gran apoyo, por ayudarme a tomar las mejores decisiones y por cuidar de mí. Gracias por aguantarme tantas rabietas, por ti hemos vivido y alcanzado muchos logros juntos. Tú sabes lo mucho que te amo y lo feliz que soy a tu lado.

A mis amigos Luisk, Alejo, Laura T, Fer, Mario, el veci, Tephy, Derly, Viviana, por ser parte importante de mi vida desde que los conocí y por brindarme una amistad verdadera.

A todos mis compañeros de GRM que durante toda mi estadía en el grupo me hicieron sentir en familia, a Palmita y a Lusho por guiarme y ayudarme en muchas ocasiones, además de ser mis jefes son mis amigos.

A la junta de SPE con la que compartí momentos muy agradables y a todos mis compañeros de la Universidad por ayudarme cuando estaba confundida y por enseñarme muchas cosas. Espero verlos de nuevo.

Claudia

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por formarnos como profesionales y personas íntegras para poder afrontar los retos de esta industria

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos y todos sus profesores, por contribuir en nuestra formación, por su dedicación y todas las enseñanzas transmitidas durante nuestro paso por esta grandiosa institución.

Al Ingeniero Samuel Muñoz, por guiarnos, exigirnos y acompañarnos durante nuestra estancia en el Grupo de Investigación y como Director de nuestro Proyecto de Grado.

Al Grupo de Investigación Recobro Mejorado por acogernos durante este tiempo y permitirnos aprender tantas cosas que complementaron nuestra academia. También por ser un lugar donde encontramos amigos y colegas, los cuales nos brindaron su apoyo y consejos en diferentes momentos para alcanzar este logro. Gracias a Luis, Mónica, Xiomara, Palma, Enrique y los demás compañeros auxiliares y tesistas, gracias por su amistad.

Al ingeniero Enrique Núñez, quien fue parte fundamental durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por su amabilidad y compromiso con este trabajo, sin su ayuda difícilmente habiéramos alcanzado este logro.

Al ingeniero Álvaro Salgado, que muy amablemente nos colaboró con información y nos orientó en la realización de este proyecto.

Muchas gracias a todos, Dios los bendiga.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	17
<b>1. GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE INYECCIÓN DE VAPOR</b> .....	19
1.1. PROCESOS DE RECOBRO TÉRMICO .....	19
1.1.1. Inyección Continua de Vapor.....	20
1.1.2. Inyección Cíclica de Vapor .....	23
1.1.3. Efecto de la calidad del vapor sobre los procesos de inyección de vapor	26
<b>2. DISTRIBUCIÓN Y MEDICIÓN DE LA TASA Y CALIDAD DEL VAPOR</b> .....	28
2.1. DISTRIBUCIÓN DE VAPOR.....	28
2.1.1. T de Brazo Lateral .....	30
2.1.1.1. Mixer-Stratifier.....	30
2.1.1.2. SlipliTigator .....	31
2.1.2. T Tipo Impacto .....	33
2.1.2.1. Placa de Orificio.....	33
2.1.2.2. Mixer-Stratifier.....	34
2.1.2.3. Veleta pre-separadora y difusores .....	34
2.1.2.4. T Sobredimensionada .....	35
2.2. CONTROL Y MEDICIÓN DE LA TASA Y CALIDAD DE VAPOR .....	36
2.2.1. Control de la Tasa de Vapor .....	37
2.2.1.1. Choques Ajustables .....	38

2.2.1.2. Choque de Calibre Recto.....	38
2.2.1.3. Choque de calibre cónico.....	40
2.2.2. Monitoreo de Vapor en Cabeza de Pozo .....	41
2.2.2.1. Medición de la tasa de flujo.....	41
2.2.2.2. Medición de la Calidad de Vapor .....	43
2.2.3.1. Orificios Dobles o Choque de Orificio en Serie .....	47
2.2.3.2. Dispositivo SteamScan .....	49
2.2.3.3. Separador de dos fases .....	50
<b>3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....</b>	<b>52</b>
3.1. CONDUCCIÓN .....	52
3.1.1. Resistencia térmica a la conducción.....	53
3.2. CONVECCIÓN.....	54
3.2.1. Coeficiente de convección .....	55
3.2.2. Resistencia térmica a la convección.....	56
3.2.3. Convección Forzada .....	56
3.4. RADIACIÓN .....	57
3.4.1. Emisividad .....	58
3.4.2. Resistencia térmica a la radiación .....	59
3.5. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL .....	60
<b>4. PÉRDIDAS DE CALOR EN LÍNEAS DE SUPERFICIE .....</b>	<b>64</b>
4.1. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LÍNEAS DE SUPERFICIE .....	65
4.2. CALIDAD DEL VAPOR EN CABEZA DE POZO.....	66

4.2.1. Cálculo de la calidad del vapor en la cabeza de pozo .....	67
<b>5. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR CRÍTICO Y ESPESOR ÓPTIMO DE AISLAMIENTO TÉRMICO.....</b>	<b>70</b>
5.1. RADIO CRÍTICO DEL AISLANTE TÉRMICO .....	70
5.2. MÉTODO ASTM C680 PARA CALCULAR ESPESOR RECOMENDADO .....	73
5.2.1. Estimación del Calor perdido .....	74
5.2.2. Cálculo del Espesor Recomendado.....	75
5.2.3. Cálculo de la Temperatura Superficial .....	77
5.3. ESPESOR ÓPTIMO DE AISLANTE TÉRMICO.....	78
5.3.1. Variables involucradas en la determinación del espesor óptimo del aislante. .....	78
5.3.1.1. El costo del aislante en función de su conductividad y espesor.....	79
5.3.1.2. El costo del vapor generado en función del tiempo .....	79
5.3.1.3. El número de años de funcionamiento del aislante.....	80
5.3.1.4. El costo del mantenimiento del aislante .....	80
5.3.2. Relación de inversión-Ahorro.....	80
5.3.3. Determinación del Espesor Óptimo de Aislante Térmico.....	82
5.4. CORRELACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL ESPESOR ECONÓMICO DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS (A. BAHADORI, H. VULTHALURU) .....	83
5.5. AHORRO APARENTE EN FUNCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR .....	86
5.6. COSTO TOTAL DEL PROYECTO.....	88
5.7. CÁLCULO DE EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	90
<b>6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>92</b>

6.1. CONSIDERACIONES HERRAMIENTA COMPUTACIONAL OPTHICK.....	92
6.2. CASO TEÓRICO .....	92
6.2.1. Resultados OPTHICK .....	93
6.2.1.1. Método de Willhite .....	94
6.2.1.2. Método ASTM C680 .....	95
6.2.1.3. Método Novel Correlation .....	96
6.3. Validación de la herramienta computacional OPTHICK.....	99
6.4.1. ECOWIN GREEN .....	99
6.4.2. INSULAN .....	101
6.4.3. Comparación de Resultados.....	102
6.4. CASO CAMPO TECA .....	108
6.4.1. Descripción del Campo .....	108
6.4.2. Evaluación del Campo Teca .....	109
6.4.2.1. Consideraciones del Caso .....	110
6.4.3. Resultados para un diámetro de Tubería de 4 Pulgadas.....	112
6.5. CASO APLICACIÓN PARA DETERMINAR AHORRO DE COMBUSTIBLE.	121
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>129</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>136</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Inyección Continua de Vapor.....	21
Figura 2. Inyección Cíclica de Vapor .....	24
Figura 3. Diagrama Temperatura vs Entalpía del agua .....	27
Figura 4. Sistema de Distribución de vapor. ....	29
Figura 5. Orientaciones de conexiones T. ....	30
Figura 6. Mixer-Stratifier. ....	31
Figura 7. SpliTigator.....	33
Figura 8. Dispositivos de inserción para las IT.....	35
Figura 9. Esquema de una válvula de múltiples orificios. ....	39
Figura 10. Choque de flujo crítico de calibre recto.....	39
Figura 11. Choque de calibre cónico. ....	40
Figura 12. Detector de Neutrones térmicos. ....	44
Figura 13. Q-BAR. ....	45
Figura 14. DSQS.....	47
Figura 15. Medidor de doble orificio.....	48
Figura 16. Medidor Choque-Orificio. ....	48
Figura 17. SteamScan. ....	49
Figura 18. Esquema de un separador de dos fases. ....	51
Figura 19. Transferencia de calor por conducción. ....	53
Figura 20. Transferencia de calor por convección. ....	55
Figura 21. Tubería recubierta con aislante. ....	62
Figura 22. Comportamiento para $rcrit < 1$ .....	72
Figura 23. Comportamiento para $rcrit > 1$ .....	73
Figura 24. Espesor óptimo de aislamiento.....	79
Figura 25. Resultados Método de Willhite .....	94
Figura 26. Resultados Método ASTM C680 .....	95

Figura 27. Resultados Método Novel Correlation .....	96
Figura 28. Diferencia Costo Total y Ahorro Aparente para el caso teórico .....	98
Figura 29. Menú Principal ECOWIN GREEN.....	100
Figura 30. Cálculo de espesor recomendado ECOWIN GREEN .....	100
Figura 31. INSULAN .....	101
Figura 32. Ventana Cálculo Pérdidas de Calor y Espesor Óptimo Insulan .....	101
Figura 33. Opciones gráficas INSULAN.....	102
Figura 34. Cálculo Espesor Recomendado ECOWIN GREEN para caso 1 .....	103
Figura 35. Cálculo Económico ECOWIN GREEN para caso 1 .....	103
Figura 36. Datos Entrada Caso 1 INSULAN .....	104
Figura 37. Resultados Manta para tubería de 6 pulgadas .....	105
Figura 38. Resultados Rolloflex .....	105
Figura 39. Análisis Económico INSULAN .....	106
Figura 40. Localización Campo Teca.....	109
Figura 41. Tubería Aislada con PRFV .....	112
Figura 42. Resultado Método de Willhite .....	113
Figura 43. Resultado Método ASTM C 680 .....	113
Figura 44. Resultado Novel Correlation .....	113
Figura 45. Costo Total del Aislamiento y Ahorro Aparente de Flexwrap y Rolloflex. .....	116
Figura 46. Costos Proyecto con Rolloflex.....	117
Figura 47. Pérdidas vs. Espesor .....	119
Figura 48. Pérdidas vs. Radio Total.....	120
Figura 49. Temperatura superficial vs Espesor.....	121
Figura 50. Calidad vs. Espesor .....	121
Figura 51. Costo vs. Espesor.....	122
Figura 53. Cálculo de pérdidas de calor para el ejemplo .....	123

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de los dispositivos para distribución de vapor.....	36
Tabla 2. Dispositivos para el control de la tasa de vapor.....	41
Tabla 3. Dispositivos para la medición de la tasa de flujo.....	43
Tabla 4. Dispositivos para la medición simultanea de tasa de vapor y calidad del vapor.....	51
Tabla 5. Emisividades aproximadas de algunos metales. ....	59
Tabla 6. Coeficientes seleccionados por A. Bahadori y H. Vulthuru, usados en las ecuaciones 71, 72, 73 y 74. ....	85
Tabla 7. Factor de Conversión KgCO <sub>2</sub> /Gcal .....	91
Tabla 8. Datos Caso de Aplicación .....	93
Tabla 9. Resumen de Resultados Caso Aplicación .....	97
Tabla 10. Comparación Resultados para Lana Mineral de Roca 6”.....	106
Tabla 11. Comparación de Resultados Rolloflex .....	107
Tabla 12. Comparación de resultados Flexwrap.....	108
Tabla 13. Datos Caso de Aplicación .....	110
Tabla 14. Resumen de Resultados Caso Campo Teca tubería 4”.....	114
Tabla 15. Error Relativo .....	116
Tabla 16. Costo total del proyecto .....	118
Tabla 17. Resultados detallados.....	119
Tabla 18. Datos de entrada ejemplo .....	123

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DIAGRAMAS DE FLUJO .....	136
ANEXO B. MANUAL DE USUARIO OPTHICK 1.0 .....	142

## NOMENCLATURA

$\frac{q_{rad}}{A}$	Tasa de flujo de calor por radiación, $\frac{BTU}{hr*pie^2}$
$h_c$	Coefficiente de transferencia de calor por convección en $\frac{BTU}{h*pie^2*F}$
$h_{ca}$	Coefficiente de convección del aire, $\frac{BTU}{hr*pie^2*F}$
$h_{ce}$	Coefficiente de convección forzada $\frac{BTU}{h*pie^2*F}$
$h_r$	Coefficiente de radiación de la cara externa, $\frac{BTU}{hr*pie^2*F}$
$h_v$	Entalpía del vapor, $\frac{BTU}{lb_m}$
$h_w$	Entalpía del agua saturada, $\frac{BTU}{lb.}$
$A_{TD}$	Área superficial de la tubería, $pie^2$
$A_{TF}$	Área de la tubería con el factor de seguridad, $pie^2$
$A_e$	Area externa, $pie^2$
$A_i$	Area interna, $pie^2$
$A_{ml}$	Área media logarítmica, $pie^2$
$A_{pi}$	Área interna tubería, $pie^2$
$B_a$	Coefficiente de expansión volumétrica del aire, $\frac{vol}{F}$
$C_{pa}$	Capacidad calorífica del aire a presión constante, $\frac{BTU}{lb*F}$
$E_c$	Energía a inyectar por ciclo, $MMBTU$
$E_a$	Energía generada para transportar vapor en tubería aislada, $\frac{BTU}{año}$
$E_d$	Energía generada para transportar vapor en tubería desnuda, $\frac{BTU}{año}$
$K_a$	Coefficiente de conductividad del aislante, $\frac{BTU}{hr*pie*F}$
$K_m$	Conductividad promedio, $\frac{BTU}{hr*pie*F}$
$K_p$	Coefficiente de conductividad de la tubería, $\frac{BTU}{hr*pie*F}$

$L_L$	Longitud de la tubería, <i>pie</i>
$L_v$	Calor latente de vaporización del agua, $\frac{BTU}{lb}$
$Q_a$	Pérdidas de calor en la tubería aislada, $\frac{BTU}{hr*pie^2}$
$Q_d$	Pérdidas de calor en tubería desnuda, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$R_{cond}$	Resistencia térmica a la conducción, $\frac{°F*hr*pie}{BTU}$
$R_{conv}$	Resistencia térmica a la convección, $\frac{°F*hr*ft}{BTU}$
$R_{rad}$	Resistencia térmica a la radiación. $\frac{°F*hr*pie}{BTU}$
$t_{iny}$	Tiempo de inyección, <i>días</i>
$T_1$	Temperatura interna, $°F$
$T_1^*$	Temperatura absoluta del cuerpo a mayor temperatura, <i>R</i>
$T_2$	Temperatura externa, $°F$
$T_2^*$	Temperatura absoluta del cuerpo a mayor temperatura, <i>R</i>
$T_{amb}$	Temperatura del aire, $°F$
$T_e$	Temperatura exterior, $°F$
$T_f$	Temperatura del fluido caliente, $°F$
$T_i$	Temperatura interior, $°F$
$T_m$	Temperatura media, $°F$
$T_p$	Temperatura de operación, $°F$
$T_s$	Temperatura de la superficie, $°F$
$T_{va}$	Tasa de flujo de vapor, $\frac{MMBTU}{día}$
$T_{alimentación}$	Tasa de alimentación de agua, $\frac{Bbl}{día}$
$V_{ca}$	Viscosidad cinemática del aire, $\frac{pie^2}{hr}$
$X_c$	Calidad en el cabezal de pozo
$X_{gen}$	Calidad a la salida del generador
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura en la dirección x, $\frac{°F}{pie}$

$q_c$	Calor en el cabezal de pozo, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$q_{cond}$	Calor transferido por conducción, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$q_{conv}$	Calor transferido por convección, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$q_g$	Calor a la salida del generador de vapor, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$q_{rad}$	Calor transferido por radiación, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$q_t$	Tasa de pérdida de calor total en la línea, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$q_x$	Tasa de calor por unidad de area en la dirección X, $\frac{BTU}{hr*pie}$
$r_a$	Radio exterior del aislante, $pie$
$r_{crit}$	Radio crítico, $pie$
$r_e$	Radio exterior de la tubería, $pie$
$r_i$	Radio interior de la tubería, $pie$
$w_v$	Peso del vapor generado, $\frac{lb.}{hr}$
$\mu_a$	Viscosidad Dinámica del aire, $\frac{lb}{pie*hr}$
$\rho_a$	Densidad del aire, $\frac{lb}{pie^3}$
$\rho_w$	Densidad del agua, $\frac{lb}{Bbl}$
$B$	Aumento previsible del costo de la energía en porcentaje %
$\delta$	Espesor económico, $m$
$A$	Área a través de la cual ocurre el flujo de calor, $pie^2$
$D$	Diámetro exterior de la tubería, $m$
$E$	Precio de la energía $\frac{US\$}{MMBTU}$ .
$K$	Coefficiente de conductividad térmica, $\frac{BTU}{hr*pie*°F}$
$Q$	Tasa de pérdidas de calor, $\frac{BTU}{hr}$
$R$	Resistencia térmica, $\frac{°F*hr*pie}{BTU}$
$U$	Coefficiente de transferencia de calor total, $\frac{BTU}{hr*pie^2*°F}$

$V$	Velocidad del aire, $\frac{millas}{hr}$
$VPN$	Valor presente neto
$Z$	Tiempo de funcionamiento, $\frac{hr}{año}$
$e$	Espesor del aislante, <i>pulg</i>
$n$	Número de años para los que se efectúa el estudio.
$r$	Tasa de actualización neta, %.
$\varepsilon$	Emisividad de la superficie.
$\lambda$	Conductividad térmica material aislante, $\frac{W}{m \cdot K}$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman, $\frac{BTU}{hr \cdot \pi e^2 \cdot F^4}$

## RESUMEN

**TÍTULO:** OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR DEL AISLANTE TÉRMICO EN EL TRANSPORTE DE VAPOR EN TUBERÍAS DE SUPERFICIE EN PROCESOS DE INYECCIÓN DE VAPOR\*

**AUTORES:** Javier Orlando Guerrero Rivera  
Claudia Fernanda Leal Contreras\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Inyección de Vapor, Aislamiento Térmico, Espesor Óptimo Aislamiento

### DESCRIPCIÓN

En el transporte de vapor en tuberías de superficie, en los proyecto de recobro térmico, se presentan pérdidas de calor, las cuales tienen un efecto negativo sobre la calidad de vapor. Estas pérdidas generan mayor consumo de combustible para cumplir con los requerimientos de vapor esperados en cabeza de pozo, aumentando los costos del proyecto. Para dar solución a este problema, se emplea material aislante para recubrir las tuberías de superficie y de esta forma reducir dichas pérdidas.

En esta investigación se desarrolló una herramienta computacional que le permita al ingeniero de procesos determinar el espesor óptimo de diferentes materiales aislantes, a partir de dos métodos para determinar pérdidas de calor como son el método de Willhite y el procedimiento según ASTM C680, complementados con el concepto de valor presente neto; y un tercer método basado en la correlación desarrollada por Bahadori y Vulthuru. Adicionalmente esta herramienta compara la calidad obtenida en cabeza de pozo, con y sin aislamiento térmico en la tubería; además evalúa el costo total de la implementación de este tipo de material, incluyendo costos de los materiales que recubren el aislante.

El uso de aislante implica un costo adicional por su implementación; sin embargo, éste se justifica gracias a la reducción de las pérdidas de energía que permite obtener una mayor calidad del vapor en cabeza de pozo; de esta manera se puede suministrar mayor energía al yacimiento para obtener una mejor respuesta de este o disminuir el tiempo de inyección para generar un ahorro de combustible. La herramienta también cuenta con un módulo para estimar el ahorro aparente en función de las pérdidas de calor. Asimismo la herramienta también permite realizar un análisis ambiental, ya que calcula las emisiones de CO<sub>2</sub> no generadas debido al uso de aislamiento térmico, mostrando un beneficio adicional de estos materiales.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro, M. Sc. Carlos Eduardo Naranjo, Ing. Luis Roberto Oliveros Gómez

## ABSTRACT

**TITLE:** OPTIMIZATION OF THERMAL INSULATION THICKNESS IN STEAM TRANSPORTATION THROUGH SURFACE PIPELINES IN STEAM INJECTION PROCESSES. \*

**AUTORS:** Javier Orlando Guerrero Rivera  
Claudia Fernanda Leal Contreras \*\*

**KEY WORDS:** Steam flooding, Thermal Insulation, Optimal Insulation.

### DESCRIPTION

During steam distribution through surface lines, in thermal enhanced oil recovery projects, heat loss occurred, having a negative effect on steam quality. This loss generates more fuel consumption to fulfill the steam requirements expected in the injection wellhead, raising the costs of the project. A solution for this problem is using thermal insulation in surface lines; this way heat loss will be reduced.

A software was developed in this research to help process engineer to determinate optimal thickness of different insulation materials based on two methods to estimate heat losses like Willhite Method and the procedure according to ASTM C680, complemented with the Net Present Value concept; and a third method based on the correlation for estimation of economical thickness insulation developed by Bahadori and Vulthalluru. Additionally, this software compares steam quality in wellhead using thermal insulation in surface lines and without insulation. It also evaluates the total cost of the implementation of this material including the costs of the material to cover the insulation.

The use of thermal insulation implies an additional cost due its implementation; however, that cost is justified by the reduction of energy losses which means a better steam quality at the wellhead. This allows delivering more energy to the reservoir and it leads to a better reservoir response or it can reduce the steam injection stage generating lower fuel consumption. The software also includes a unit to estimate the savings as a function of heat loss. The software also allows the user to realize an environmental analysis; it calculates CO<sub>2</sub> emissions no generated due the use of thermal insulation, showing an extra benefit of these materials.

---

\* Graduation Project

\*\* Physico-Chemical Engineering Faculty, School of Petroleum Engineering, M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro, M. Sc. Carlos Eduardo Naranjo, Eng. Luis Roberto Oliveros Gómez

## INTRODUCCIÓN

Décadas atrás la producción de crudo pesado no era atractiva para la industria por la difícil explotación de este tipo de yacimientos; aunque el alza en el precio del barril, el poco hallazgo de reservas convencionales y gran cantidad de reservas de este tipo de crudo, permitió considerar el crudo pesado como una opción estratégica para la industria, aumentando significativamente la producción. En Colombia, se han descubierto importantes reservas de crudo pesado y actualmente la mayoría de la producción a nivel nacional proviene de los campos de crudo pesado como Rubiales, Castilla, Quifa, entre otros; por este motivo, varias investigaciones se han enfocado en el entendimiento y estudio de las técnicas que permitan la extracción de este recurso.

La producción de crudos pesados se hace mediante técnicas no convencionales de extracción especialmente por métodos de recobro térmico como la inyección de vapor. Parte importante en el éxito de este tipo de procesos, es el cuidado y seguimiento de las líneas de transporte de vapor debido a que el vapor es distribuido desde el generador hasta la cabeza de pozo inyector y de ésta, al yacimiento. Durante esta trayectoria, se presentan pérdidas de calor debido a la diferencia entre la temperatura del fluido y la temperatura ambiente, siendo esta la causa principal de reducir la calidad del vapor inyectado.

El uso de aislamiento térmico es parte de la solución para evitar dichas pérdidas en las tuberías de superficie. En el diseño de cualquier sistema de aislamientos, siempre están involucradas dos etapas fundamentales, que se deben cumplir para llegar a la decisión y aplicación correcta del mejor aislamiento, estas etapas son la selección del aislamiento de acuerdo a las especificaciones requeridas para cada proyecto planteado y cálculo del espesor de aislamiento para satisfacer los diferentes criterios de cálculo.

La búsqueda del aislamiento adecuado incluye el conocimiento de las condiciones existentes en el campo como el diámetro de la tubería para el transporte de vapor, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, entre otros, para lo cual es indispensable conocer la naturaleza y tipos de aislamiento disponibles, ya que muchas veces la decisión del aislamiento está centrada en la temperatura de aplicación, así que es necesario revisar algunas características para la aplicación.

Una vez seleccionado el tipo de aislamiento técnicamente adecuado, se debe determinar la cantidad óptima a instalar, a causa de los crecientes costos de la energía y los combustibles. El concepto del espesor óptimo se define como aquél espesor a partir del cual, un aumento del mismo no ahorrará el calor suficiente para compensar su costo adicional. Otro motivo para usar aislamiento en tuberías es la protección del personal contra quemaduras, por contacto con las superficies calientes; la temperatura superficial sobre el aislamiento debe estar dentro del intervalo que permita tocarla sin peligro, generalmente hasta 113°F (45°C)<sup>5</sup>.

Por lo anterior, se desarrolló la herramienta computacional OPTHICK para diseñar el sistema de aislamiento térmico en tuberías de superficie para procesos de inyección de vapor, la cual permite determinar el espesor óptimo de una variedad de materiales aislantes que se ajustan a dicho proyecto. Este espesor es calculado a partir del método de Willhite o el procedimiento según ASTM C680, complementados con el concepto de valor presente neto; y un tercer método basado en la correlación para estimar el espesor recomendado, desarrollada por Bahadori y Vulthalluru.

---

<sup>5</sup> McChesney and McChesney – Fuel Save Association. USA.

## 1. GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE INYECCIÓN DE VAPOR

Los crudos pesados se caracterizan por tener una baja gravedad API y altas viscosidades (mayores a 1500 cp)<sup>6</sup>, lo que genera una baja movilidad del fluido dentro del yacimiento. Por esto, se han implementado técnicas cuyo objetivo es influir directamente en este parámetro con el propósito de obtener mejores respuestas de producción.

Entre las que se encuentran los procesos de recobro mejorado, los cuales son cada vez más comunes en la industria de los hidrocarburos debido a que permiten aumentar las reservas y la producción de crudo, contribuyendo a satisfacer la demanda energética mundial. Entre estos procesos están las técnicas de recobro térmico como son la inyección cíclica e inyección continua de vapor, cuya finalidad es aumentar el factor de recobro suministrando energía al yacimiento en forma de calor mediante el vapor de agua, y de esta manera lograr una reducción en la viscosidad del crudo para aumentar su movilidad.

### 1.1. PROCESOS DE RECOBRO TÉRMICO

Los procesos de recobro térmico, consisten en generar o inyectar energía térmica (calor) al yacimiento con el fin de aumentar la recuperación de petróleo; surgen de la necesidad de reducir la viscosidad de los fluidos<sup>7</sup>, aumentando su movilidad y facilitando su producción. Además presentan otros beneficios como la reducción de la saturación residual de aceite por expansión térmica del petróleo, incremento de barrido areal como consecuencia del aumento de movilidad y destilación de livianos.

---

<sup>6</sup> BOBERG, Thomas. Thermal Methods of Oil Recovery. United States of América, 1988.

<sup>7</sup> MARTELO, M. DELGADO G. "Sistemas de completación en procesos térmicos en la faja petrolífera del Orinoco". Trabajo Especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 2006, p. 21.

El calor puede ser suministrado a la formación por un fluido que está a una temperatura mayor que la temperatura de yacimiento o por un fluido que reacciona con los hidrocarburos del yacimiento para producir combustión in situ<sup>8</sup>. Por lo anterior, la clasificación de los procesos térmicos puede ser por inyección de fluidos calientes como: Inyección cíclica de vapor, Inyección continua de vapor, Inyección de vapor con aditivos, Inyección de un tapón de solventes empujado con vapor, Inyección continua de agua caliente, Inyección continua de gas caliente, Inyección cíclica de agua caliente; o por combustión in situ dentro de la cual se encuentran los siguientes métodos: combustión convencional, combustión húmeda y combustión en reversa<sup>9</sup>.

### **1.1.1. Inyección Continua de Vapor**

La inyección de vapor ha sido usada para la producción de crudo pesado y extra pesado, debido a que el vapor es considerado uno de los fluidos calientes de inyección más eficientes, gracias a su capacidad calorífica, lo que proporciona un efecto significativo en la reducción de la viscosidad del crudo<sup>10</sup>.

En un proceso de inyección continua de vapor (Figura 1), el vapor se inyecta de forma continua (hasta que el proceso no sea económico o sea reemplazado por otro proceso), en un patrón de pozos inyectoros, mientras que los fluidos son producidos en unos pozos designados, acorde al patrón establecido. Cuando se inyecta vapor en un yacimiento, el frente que se forma en el yacimiento presenta cinco zonas diferentes: zona de vapor, banco de solventes, zona de agua caliente, banco de crudo y zona de aceite original (frío).

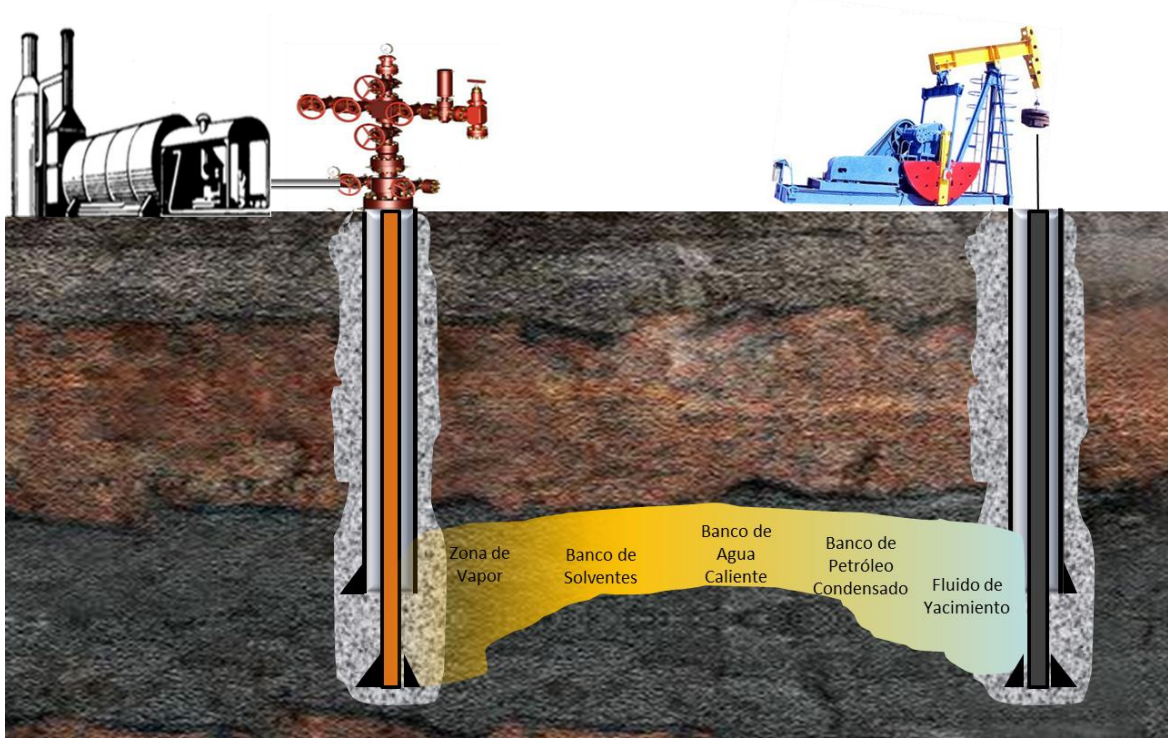
---

<sup>8</sup> HONG, K.C. "Steamflood Reservoir Management". Thermal Enhanced Oil Recovery. PennWell Books. Tulsa.1994, p. 11.

<sup>9</sup> GÓMEZ P, LUIS G. "Recuperación mejorada de hidrocarburos. Inyección cíclica y continua de vapor". Universidad Industrial de Santander. 1989, p. 2.

<sup>10</sup> BARILLAS, J. L.; DUTRA JR., T. V.; MATA, W. "Improved Oil Recovery Process for Heavy Oil: A Review". Brazilian Journal of Petroleum and Gas. 2008, p. 47.

**Figura 1.** Inyección Continua de Vapor.



Fuente: SANDOVAL, J. "A Simulation Study of Steam and Steam-propane Injection using a Novel Smart Horizontal Producer to Enhance Oil Production". 2004.

La primera región más cercana al pozo inyector, corresponde a la zona de vapor, la cual crece a medida que se inyecta el vapor, este vapor reduce la saturación de aceite en la dicha zona, empujando el aceite móvil fuera de esta región. A medida que la zona de vapor crece, el aceite se mueve adelante del frente de vapor. Las fracciones livianas del crudo se vaporizan y se condensan delante de dicho frente de vapor creando un banco de solventes, el cual conforma la segunda zona. El banco de solvente es miscible con el crudo, reduciendo así su tensión interfacial y viscosidad. La tercera zona se compone de la zona de agua caliente donde el vapor se condensa y el crudo volátil entra en contacto con la zona más fría. Como resultado de la disminución de la viscosidad y del desplazamiento en las tres

primeras zonas, se forma un banco de crudo (cuarta zona). La quinta zona la cual está muy lejana del pozo inyector, está compuesta por crudo original.<sup>11</sup>

La inyección continua de vapor generalmente aumenta el factor de recobro donde otros procesos no lo harán, ya que la transferencia de calor puede ocurrir en una dirección perpendicular a la dirección del flujo de fluidos, entonces el calor del vapor puede afectar aceite que no entra en contacto con el vapor.<sup>12</sup> Sin embargo, existe una tendencia del vapor a canalizarse en el tope del yacimiento, y esta tendencia limita la inyectividad del calor hacia las zonas inferiores, disminuyendo la eficiencia de barrido y en consecuencia la recuperación. A este fenómeno se le denomina segregación gravitacional.<sup>13</sup>

En un proceso de inyección continua de vapor, están presentes mecanismos que ayudan a la extracción del petróleo, dentro de los principales están: mejoramiento de la movilidad del aceite, destilación de livianos y craqueo térmico, no obstante, se encuentran presentes mecanismos secundarios que también contribuyen a la producción del aceite como son: expansión del aceite, agotamiento de presión y drenaje gravitacional. Cada uno de estos mecanismos cumple un papel diferente dependiendo de la gravedad API del crudo; es decir, en los crudos livianos, la destilación es el mecanismo más significativo, mientras que en los crudos pesados, es más importante la reducción de la viscosidad para mejorar la movilidad del crudo.

Adicionalmente, el proceso de inyección continua de vapor se ve afectado por la variación en las condiciones tanto operacionales como de yacimiento. Dentro de

---

<sup>11</sup> SANDOVAL M., J. E. "A simulation study of Steam and Steam-Propane Injection Using a Novel Smart Horizontal Producer to Enhance Oil Production". Tesis de Maestría. Texas, United States, 2004, p. 5.

<sup>12</sup> HONG, Op. cit., p. 13.

<sup>13</sup> MARTELO, Op. cit., p. 26.

los parámetros operacionales más relevantes en el diseño de este tipo de proceso están: la tasa de inyección, calidad del vapor y espaciamiento entre pozos<sup>14</sup>.

Generalmente en un proceso de inyección continua de vapor se utilizan tasas de inyección relativamente altas, esto conlleva a que se presente una rápida irrupción del vapor en los pozos productores; la utilización de las altas tasas de inyección requiere de altas presiones de inyección, las cuales pueden generar mayores pérdidas de calor disminuyendo la calidad con la cual el vapor llega a la formación.

### **1.1.2. Inyección Cíclica de Vapor**

La inyección cíclica de vapor fue descubierta en Venezuela en 1957, cuando la empresa Shell Oil Company desarrollaba una prueba de inyección continua de vapor en el campo Mene Grande. Actualmente esta técnica se desarrolla con el fin de aumentar la temperatura del yacimiento, reducir el daño de los pozos, disminuir la viscosidad del crudo e incrementar el factor de recobro. La inyección cíclica de vapor es hoy en día, el método de recobro térmico más ampliamente usado en la producción de crudo pesado, ya que es considerado uno de los más efectivos debido a su funcionalidad, fácil aplicación y bajos costos<sup>15</sup>. El factor de recobro alcanzado por este proceso oscila entre el 15 al 18 % del OOIP dentro de la zona afectada por la operación. El proceso se lleva a cabo en tres etapas y la inyección tanto como la producción se realizan en un mismo pozo (Figura 2)

El período de inyección es la primera fase del proceso, en la cual se suministra calor al yacimiento por medio de la inyección de vapor húmedo a la formación durante un periodo de tiempo determinado según de la viscosidad del crudo, por lo

---

<sup>14</sup> GONZALEZ, RICARDO. PINILLA, JAIME. "Evaluación de Procesos de Inyección Continua de Vapor en Yacimientos Estratificados mediante el Análisis de la Eficiencia Térmica. Aplicación Campo Teca. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2009, p. 21.

<sup>15</sup> CHAN M. Y S and SARIOGLU, G. "Numerical Modeling of Cyclically Steamed and Fractured Oil-sands Reservoirs". Artículo SPE 22369. 1992, p. 1.

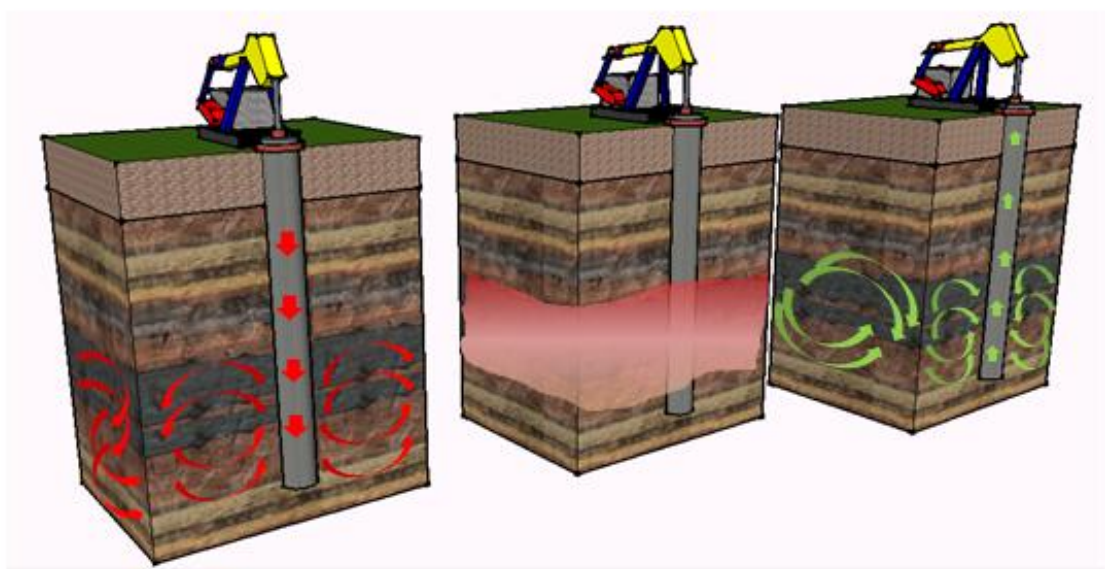
general algunos días. Esta etapa depende del espesor de la arena, la cantidad y calidad del vapor a inyectar y de los equipos disponibles. Es recomendable emplear altas tasas de inyección con la finalidad de reducir las pérdidas de calor. Según las características de la formación, existen tres formas de inyectar vapor en el yacimiento: inyección convencional, inyección por espacio anular e inyección selectiva.

**Figura 2.** Inyección Cíclica de Vapor

a) Período de inyección

b) Período de Remojo

c) Período de Producción



Fuente: CARREON, C.; DADASHI, Z. "Evaluation Energy and Water Saving Opportunities in Oil Sand Plants via Process Integration. University of Calgary.

En la segunda etapa del proceso, una vez finalizado el período de inyección, se cierra el pozo inyector por varios días para establecer la distribución de la zona caliente alrededor del pozo, y estabilizar la presión del yacimiento. Durante este tiempo se realizan los trabajos de workover de cambiar la sarta de producción con el objetivo de prepararse para la etapa de producción. La duración del período de remojo depende de parámetros como presión y temperatura de yacimiento, espesor de la formación, viscosidad del aceite y pérdidas de calor, de acuerdo a

las propiedades térmicas de las formaciones adyacentes y la cantidad de vapor inyectado. Este período, generalmente tiene poca duración para evitar pérdidas de calor significativas a los estratos adyacentes no productores, sin embargo, debe cumplir con la duración necesaria, de manera tal, que el vapor sea capaz de entregar calor a la roca y al fluido.

En la etapa de remojo, una fracción del vapor inyectado se condensa cerca a la cara del pozo<sup>16</sup>, haciendo que esta zona esté principalmente saturada por agua. Por consiguiente, el pozo producirá gran cantidad de agua al inicio de la etapa de producción, seguido de una gran producción de hidrocarburo ocasionada por el calentamiento previo y reducción de la viscosidad del aceite.<sup>17</sup>

Posterior al período de remojo, cuando el vapor ha calentado la formación y la presión del yacimiento se ha estabilizado, el pozo es abierto y puesto en producción. Como se mencionó anteriormente, al comienzo de la producción se presenta grandes cantidad de agua a altas temperaturas, como consecuencia de la condensación del vapor inyectado, sin embargo, a medida que transcurre este período, la tasa de producción de agua comienza a disminuir mientras que la producción de aceite aumenta.

La respuesta del pozo a la estimulación depende principalmente de la viscosidad del crudo, la permeabilidad de la roca, radio de calentamiento, presión inicial del yacimiento y pérdidas de calor.<sup>18</sup> La duración de la etapa de producción depende principalmente de la rapidez con la que los fluidos producidos enfrían la formación, y de las pérdidas de calor que se presenten en el sistema hacia las formaciones

---

<sup>16</sup> GOZDE, S. CHHINA, H. "An Analytic Cyclic Steam Simulation Model for Heavy Oil Reservoirs". Artículo SPE 18807. 1989, p. 2.

<sup>17</sup> URIBE, CARLOS. "Evaluación Técnico-Financiera de un Proceso de Inyección de Cíclica de Vapor usando Pozos Horizontales. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2012, p. 32.

<sup>18</sup> RODRIGUEZ, E; BARRIOS W.; SANTOS N. "Numerical Simulation for Cyclic Steam Injection at Santa Clara Field". CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol 3. Núm. 4. 2008.

adyacentes. Cuando la tasa de producción de aceite tiende a la tasa de inicio de la estimulación, se considera que el yacimiento se ha enfriado y debe repetirse el proceso sucesivamente hasta que se alcance el límite económico<sup>19</sup>.

### **1.1.3. Efecto de la calidad del vapor sobre los procesos de inyección de vapor**

La calidad del vapor es un parámetro importante en la implementación de un proyecto de inyección de vapor; depende principalmente de propiedades del agua tales como temperatura y presión de saturación, calor específico, calor latente y calor sensible; y por otro lado del equipo de generación de vapor que se emplee, ya sea portátil o fijo.<sup>20</sup> Este parámetro indica la fracción en peso del vapor contenido en una libra de vapor húmedo (Figura 3), proporcionando de forma indirecta un indicativo de cuanto calor se está transfiriendo del fluido inyectado a la formación; en la medida en que dicha calidad tome valores cercanos a 1, mayor es el contenido de calor que esta puede transportar por unidad de masa<sup>21</sup>.

La calidad del vapor debe oscilar entre 80% y 90% a la salida del generador, teniendo en cuenta parámetros como costos y la necesidad de una fase líquida para transportar sólidas en suspensión; posteriormente al pasar por la línea de transporte y la tubería de inyección del pozo, el vapor sufre una serie de pérdidas que disminuyen la calidad, sin embargo, esta debe ser la más alta posible en la cara de la formación para conservar la mayor cantidad de energía y calentar efectivamente el crudo y la roca en el yacimiento.

La disminución en la calidad del vapor se verá reflejada en el tamaño del radio calentado, el cual será menor y la disminución de la viscosidad del aceite, ya que esta será más pequeña y la producción incremental de crudo no será la esperada.

---

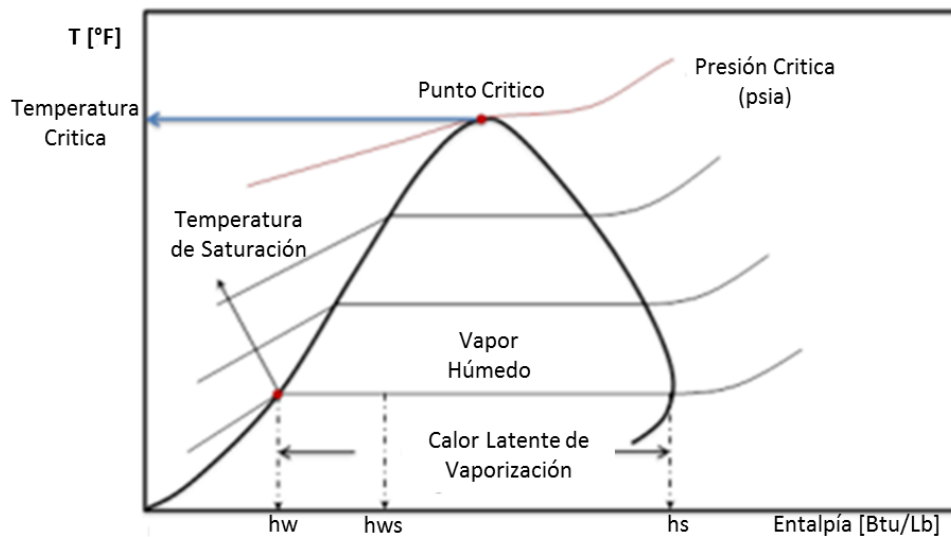
<sup>19</sup> GONZALEZ, Op. cit., p. 22.

<sup>20</sup> MANNUCCI, J.E.: "Recobro Adicional de Petróleo por Métodos no Convencionales". 1990. Capítulo 3.P.14.

<sup>21</sup> BOBERG, THOMAS."Thermal Methods of Oil Recovery".United States of America, 1988.

Por lo anterior, es necesario garantizar la máxima calidad de vapor posible en cabeza de pozo ya que minimizando las pérdidas de calor en superficie se puede lograr una mayor calidad en fondo y de esta manera administrarle una mayor energía al yacimiento para disminuir efectivamente la viscosidad del crudo y de esta manera tener mayor producción.

**Figura 3.** Diagrama Temperatura vs Entalpía del agua



Fuente: BELTRAN, J. "Análisis e Interpretación de Yacimientos Sometidos a Inyección Continua de Vapor mediante analogías". Tesis de Pregrado. 2005.

## **2. DISTRIBUCIÓN Y MEDICIÓN DE LA TASA Y CALIDAD DEL VAPOR**

La producción de crudo pesado se ha incrementado de manera excepcional desde la primera aplicación de la inyección de vapor a finales de los años 50<sup>22</sup>. Este crecimiento, especialmente durante los años de 1980 y 1990, fue resultado de los avances tecnológicos y técnicos realizados en diferentes áreas de la inyección de vapor, especialmente las áreas de generación y distribución del vapor y el área de control de la tasa y calidad del vapor. Estos avances ayudaron a incrementar el factor de recobro, a extender la aplicación del proceso y a mejorar la eficiencia del proceso.

Inicialmente, el vapor es generado en grandes plantas de vapor y luego es distribuido a través de complejas redes de tuberías a los pozos de inyección. Una vez el vapor llega a la cabeza del pozo inyector, se espera que tenga una calidad similar a la obtenida por predicciones; sin embargo, la calidad en cabeza es diferente a la esperada, debido a diversos factores como la distribución no uniforme en las conexiones, pérdidas de calor, entre otros.

El proyecto puede ser optimizado controlando la tasa y la calidad de vapor que se entrega al yacimiento, mediante diversos métodos de control y monitoreo, que a pesar de los costos adicionales que representan, pueden garantizar que se realice la administración adecuada de calor.

### **2.1. DISTRIBUCIÓN DE VAPOR**

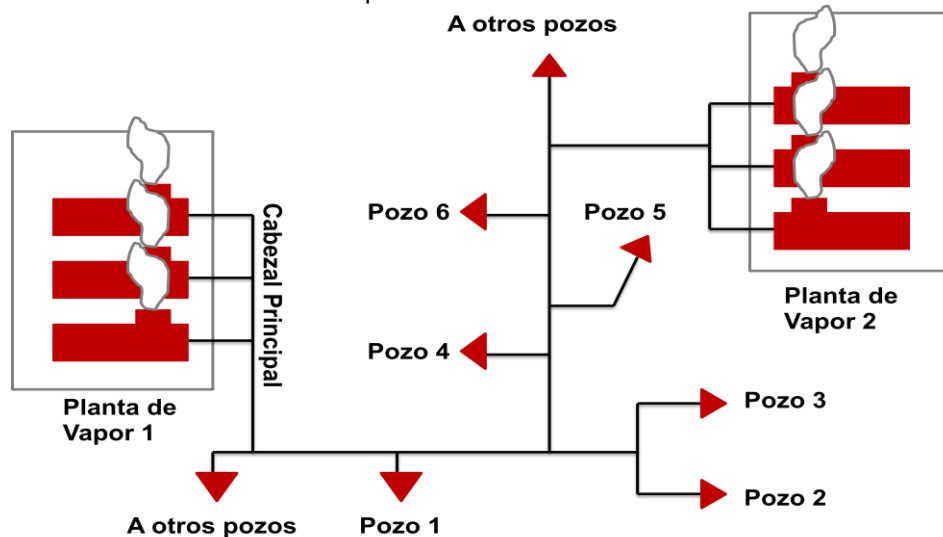
En muchos campos de crudo pesado, el vapor es generado en grandes plantas y luego es distribuido a través de complejas redes de tuberías a numerosos pozos de inyección (Figura 4). La función primaria de un sistema de distribución de

---

<sup>22</sup> HONG, K. C. "Recent Advances in Steamflooding Technology". Artículo SPE 54078.1999, p. 1.

vapor es transportar vapor uniformemente a las tasas deseadas, a cada uno de los pozos de inyección dentro del área del proyecto de inyección de vapor.

**Figura 4.** Sistema de Distribución de vapor.



Fuente: GRISTON, S.; CHOI, J. "Two Phase Flow Splitting at Side-Branching Tees". SPE 46237.1998.

Los puntos de bifurcación en estas redes están constituidos por divisores de flujo tipo T, los cuales se clasifican en T de brazo lateral y T de impacto (Figura 5). Sin embargo, estos tipos de divisores son inadecuados para la distribución del vapor<sup>23</sup> e interfieren con la optimización de las tasas de inyección. A causa de esto, ambas configuraciones han sido modificadas en los últimos años para lograr una distribución uniforme del vapor.

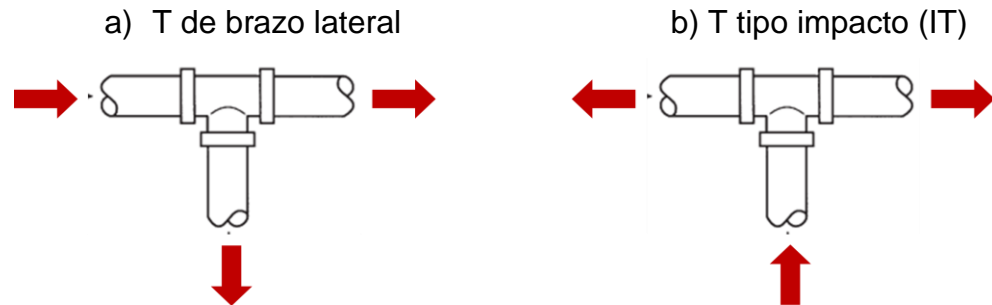
Es importante destacar que hace muchos años, Texaco intentó solucionar el problema de división desigual del vapor, separando las fases líquido y vapor a la salida del generador y recombinándolas en cada cabeza de pozo.<sup>24</sup>. Aunque

<sup>23</sup> JONES, J. WILLIAMS R. "A two-Phase Flow Splitting Device that Works". Artículo SPE 21532. 1993, p.1.

<sup>24</sup> RECTOR, B. P. "Steam Separating Solves Phase Splitting Problems in Wet Distribution Systems" Artículo CIM/SPE 90-13. 1990.

parece un enfoque sencillo, este método puede ser muy costoso, debido a que requiere separar las líneas de vapor y líquido a cada pozo.

**Figura 5.** Orientaciones de conexiones T.



Fuente: HONG, K.; GRISTON, S. "Best Practices for Distribution and Metering of Two-Phase Steam". Artículo SPE 35422. 1997.

### 2.1.1. T de Brazo Lateral

Hasta 1970, la T de brazo lateral era la conexión de tubería más usada en las redes de distribución de vapor; sin embargo, un artículo publicado en 1978, basado en pruebas de laboratorio aire-agua realizadas por Hong<sup>25</sup>, indicó que las fases vapor y líquido tienden a distribuirse de manera desigual en dichas conexiones T, resultando en corrientes con calidad diferente a cada brazo de estas.

#### 2.1.1.1. Mixer-Stratifier

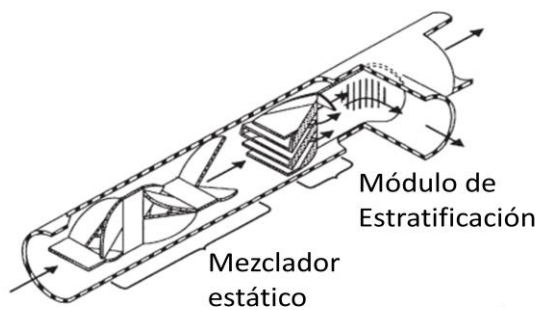
Santa Fe Energy diseñó y probó una conexión T de brazo lateral modificada en 1993<sup>26</sup>, que contiene un dispositivo mixer-stratifier (Figura 6) para mejorar la distribución de la calidad de vapor. La función de este dispositivo es homogeneizar los fluidos; el mezclador estático homogeniza el flujo y el estratificador y la pared

<sup>25</sup> HONG, K. C. "Two Phase Flow Splitting at a Pipe Tee". Artículo SPE 6530. 1998.

<sup>26</sup> JONES, J. WILLIAMS R. "Op. cit.

de partición fuerzan a una parte de la mezcla de dos fases a fluir a través de los brazos laterales. La única consideración crítica es que la velocidad de flujo debe ser mayor a  $25 \text{ }^{pie}/\text{seg}$  para evitar la separación de fases. En 1996, Jones<sup>27</sup> reportó que el diseño de mixer-stratifier podía ser empleado para mejorar la división del vapor tanto para T de brazo lateral como para T de impacto. Hong y Griston<sup>28</sup> publicaron los resultados de unas pruebas de campo sobre el comportamiento de mixer stratifier instalado en T de impacto bajo condiciones controladas de vapor. Los resultados demostraron que el dispositivo tiende a distribuir la fase líquida igualmente a cada brazo, independientemente de la división de la fase de vapor.

**Figura 6.** Mixer-Stratifier.



Fuente: HONG, K.; GRISTON, S. "Best Practices for Distribution and Metering of Two-Phase Steam". Artículo SPE 35422. 1997.

### 2.1.1.2. SlipliTigator

Texaco desarrolló y probó una conexión T de brazo lateral modificada en 1997<sup>29</sup>, denominada SlipliTigator, la cual está distribuye la calidad del vapor de manera

<sup>27</sup> JONES, J. "Care and Feeding of Steam Injection EOR Projects" Journal of Petroleum Technology. 1996.

<sup>28</sup> HONG K. GRISTON S. "Two-Phase Flow Splitting at an Impacting Tee" SPE Production and Facilities. 1995.

<sup>29</sup> BERGER et al. "The SlipliTigatorTM: A device for the Mitigation of Phase Splitting" Artículo SPE 37516. 1997.

consistente a medida que la tasa de flujo, la caída de presión y las condiciones de flujo cambien al interior de la T. La caída de presión dentro de este dispositivo es pequeña, permitiendo que se utilicen numerosos dispositivos en serie.

Básicamente trabaja como un separador gas-líquido, permitiendo la acumulación de la fracción de la fase líquida en el fondo del dispositivo, y luego dirigida hacia los brazos de la T en proporción al flujo de vapor. El diámetro de la porción recta del brazo a la entrada de la T, es mayor a comparación del diámetro de una T común, y es usado para promover la separación de las dos fases. Una parte de la fase vapor y de la fase líquida del vapor son separadas en el tope y en el fondo de la T, respectivamente. El líquido separado es introducido a través de una tubería de diámetro menor (bypass tubing) al diámetro de la parte recta del brazo de la conexión, hacia un brazo lateral que posee una placa de orificio, que determinará la calidad del vapor a cada brazo. La tasa de líquido que entra a la rama lateral es controlada por la caída de presión a lo largo de la placa<sup>30</sup> (Figura 7).

El SpliTigator está diseñado según el balance de las pérdidas por fricción, en el brazo que transporta el vapor y la tubería que transporta el líquido (bypass tubing), para la relación de mezcla vapor-líquido deseada. Como resultado, el brazo para distribuir el vapor, es independiente de los cambios de la tasa de flujo.

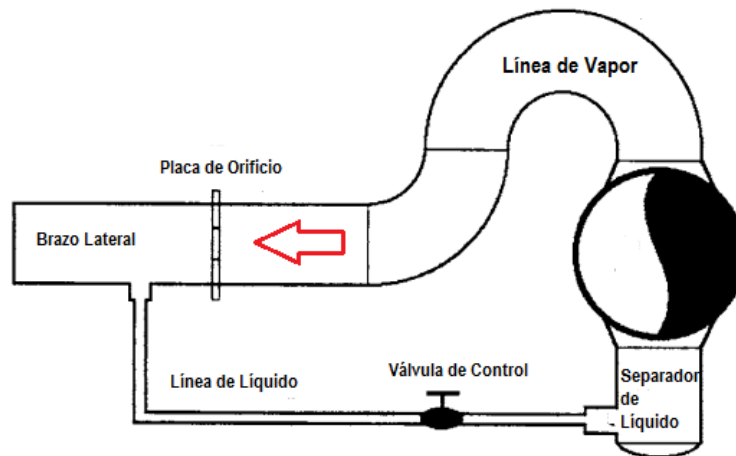
En aplicaciones actuales de campo, las características de operación del diseño de SpliTigator dependen de la separación efectiva de fases en la conexión T y de la habilidad de controlar la cantidad de líquido y vapor suministrada al brazo lateral con placa de orificio<sup>31</sup>. Adicionalmente, la tubería, de este dispositivo, para transportar líquido es de diámetro pequeño (1/4 o 1/2 de pulgada) y por lo tanto está sujeta a taponamiento con partículas y escamas.

---

<sup>30</sup> HONG, Op. cit., p. 1..

<sup>31</sup> GRISTON, Op. cit., p. 2.

**Figura 7.** SpliTigator.



Fuente: HANZLIK, Edward. “La aplicación de la tecnología para desarrollar yacimientos de crudo pesado”. Energía a debate. Mayo – Junio 2009.

### 2.1.2. T Tipo Impacto

El artículo presentado por Hong en 1978<sup>32</sup>, mostró resultados que indicaban que la conexión tipo impacto mejoraba la relación líquido-vapor a comparación de la conexión T de brazo lateral. Basado en estos resultados, el uso de la conexión tipo impacto ha sido adoptado en numerosos proyectos de inyección de vapor en California, Indonesia y China<sup>33</sup>. La medición de la tasa de flujo y calidad del vapor en cabeza de pozo realizadas en los años 1980, indicaron que se podría presentar distribución no uniforme en este tipo de conexiones, si la relación de flujo másico de vapor a cada brazo de salida es mayor que 2 o menor a  $\frac{1}{2}$ .

#### 2.1.2.1. Placa de Orificio

En 1989, Caltex Pacific Indonesia instaló gran cantidad de placas de Orificio a cada brazo de salida de T tipo impacto, en el área del campo Duri donde se realiza un proyecto de inyección de vapor para mejorar la calidad del vapor en las

<sup>32</sup> HONG, K. Op. cit.

<sup>33</sup> HONG K. GRISTION, S. “Best Practice for the Distributio and Metering of Two Phase Steam” Artículo SPE Production and facilities. 1997.

divisiones. Estas placas fueron usadas para incrementar la velocidad de flujo con el objetivo de homogeneizar la mezcla de fases del vapor, a pesar de esto, la examinación del procedimiento y de los resultados obtenidos revelaron que dichas placas no mejoraron la división de la calidad del vapor.

### **2.1.2.2. Mixer-Stratifier**

Este dispositivo fue modificado por Jones en 1996<sup>34</sup>, para ser empleado en los divisores de flujo tipo impacto, conservando algunas características de mixer-stratifier anterior. Sin embargo, Hong y Griston<sup>35</sup> probaron que esta modificación tipo impacto no era recomendable, debido a que el Mixer-stratifier tiende a dividir igualmente la fase líquida a cada brazo de salida, sin importar la relación de la división con la fase de vapor, causando que la calidad del vapor disminuya.

### **2.1.2.3. Veleta pre-separadora y difusores**

Hong y Griston<sup>36</sup> desarrollaron varios dispositivos de inserción a las conexiones T con el propósito de incrementar el rango de la relación del flujo másico de vapor, para el cual se dividiera de igual forma la calidad del vapor. Estos dispositivos fueron probados con pruebas de laboratorio usando mezclas aire-agua. Se ubicó una veleta pre-separadora vertical corriente arriba de la conexión T y unos difusores en la corriente debajo de la conexión; de esta forma, se obtuvieron resultados favorables para distribuir el vapor (Figura 8).

La veleta pre-separadora y los difusores fueron probados bajo condiciones de campo<sup>37</sup>; los resultados mostraron que ambos dispositivos mejoraron significativamente la calidad del vapor en las divisiones entre un rango

---

<sup>34</sup> JONES, J. WILLIAMS, R. Op. cit.

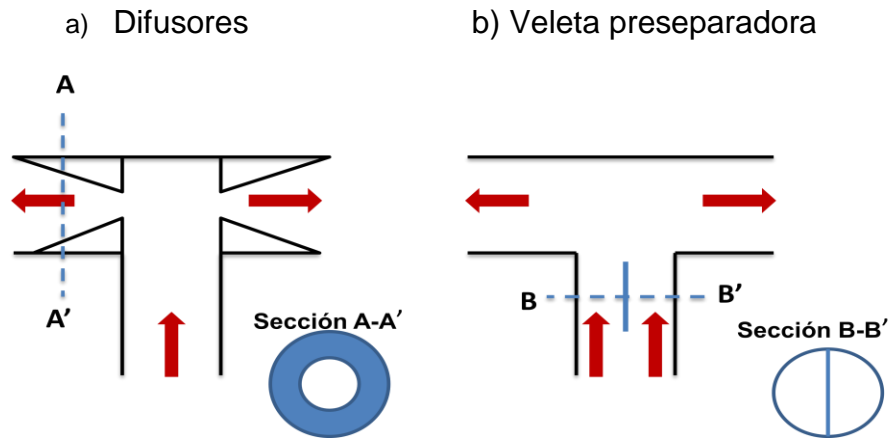
<sup>35</sup> HONG, K, GRISTON, S. Op. cit

<sup>36</sup> HONG, K, GRISTON, S. Ibid.

<sup>37</sup> HONG, K, GRISTON, S. Ibid.

considerable de condiciones de flujo de vapor. Los difusores mostraron mejores resultados, proporcionando divisiones uniformes de calidad del vapor bajo las condiciones de la prueba realizada. Estos dispositivos pueden ser fabricados fácil y económicamente.

**Figura 8.** Dispositivos de inserción para las IT.



Fuente: HONG, K.; GRISTON, S. "Best Practices for Distribution and Metering of Two-Phase Steam". Artículo SPE 35422. 1997.

#### 2.1.2.4. T Sobredimensionada

Pruebas de laboratorio aire-agua y pruebas de campo han mostrado que este tipo de conexión también permite la distribución uniforme de la calidad de vapor<sup>38</sup>. El diámetro de los brazos de T sobredimensionada, es dos veces mayor que una T común, reduciendo de esta manera la velocidad dentro de la conexión. Este dispositivo presenta resultados consistentes si la velocidad del vapor es menor a  $20 \text{ pie}/\text{seg}$ .

La Tabla 1 presenta las principales características de los dispositivos para distribución de vapor comparando principio de operación, ventajas, desventajas y costos de estos.

<sup>38</sup> HONG, K, GRISTON, S. Op. cit

**Tabla 1.** Comparación de los dispositivos para distribución de vapor.

Dispositivo	Principio de Operación	Ventaja	Desventaja	Costo Relativo
<b>T de brazo lateral - Configuración básica</b>	Parte del flujo es dividido hacia el brazo lateral	Fácil de instalar	Distribución no uniforme	Bajo
<b>Mixer-Stratifier</b>	Mezcla el flujo a la entrada de la T y la división del flujo se realiza por el estratificador.	Requiere una modificación mínima de tubería	Incrementa la posibilidad de formación de escamas	Bajo a moderado
<b>Splitigator</b>	Separa y recombina fases en el brazo lateral	Requiere una modificación mínima de tubería	Distribución no uniforme	Moderado a alto
<b>T tipo impacto - Configuración Básica</b>	Usa arreglo simétrico a la salida de los brazos	Proporciona división uniforme a radios de división <2:1	Puede requerir tubería extra para alcanzar radios de división <2:1	Bajo
<b>Orifice Plate</b>	Flujo homogéneo en la conexión T	Modificación simple a la configuración básica de T tipo impacto	No es efectiva para la mayoría de condiciones del vapor	Bajo a moderado
<b>Mixer-stratifier</b>	Mezcla el flujo a la entrada de la T; divide el flujo al pasar por el estratificador	Usa T tipo impacto	Muy mala distribución del vapor	Bajo a moderado
<b>Difusores</b>	Mezclan el flujo en la conexión T para mejorar la distribución	Muy efectivo para relaciones de división de 10:1	No se ha probado la aplicación de una T de brazo lateral	Bajo
<b>Oversized T</b>	Reduce la velocidad de entrada de fluido	Efectiva cuando la velocidad de entrada es <20 pie/s	No es práctica en líneas de >8 pulgadas de diámetro	Bajo a moderado

Fuente: HONG, K.; GRISTON, S. "Best Practices for Distribution and Metering of Two-Phase Steam". SPE 35422. 1997.

## 2.2. CONTROL Y MEDICIÓN DE LA TASA Y CALIDAD DE VAPOR

La calidad y la tasa de flujo de vapor puede variar significativamente durante un proyecto a medida que las fases líquido y vapor son divididas en los complejos sistemas de tuberías. Debido al alto costo de generación de vapor, es fundamental

monitorear las tasas y calidades del vapor a la salida del generador y en el pozo inyector como parte de la administración de calor en los proyectos de inyección de vapor<sup>39</sup>. Se han desarrollado y probado en campo, diversos dispositivos para medir la tasa de flujo y la calidad del vapor. Estos dispositivos varían desde separadores de dos fases hasta herramientas modernas como detectores de radiación.

En general, los equipos disponibles para la medición de vapor pueden ser clasificar en dos grupos: intrusivos y no intrusivos. Los dispositivos intrusivos deben ser instalados como parte de la tubería o la tubería debe ser ajustada para permitir la conexión periódica de la herramienta. Los dispositivos no intrusivos pueden estar sujetos a la superficie exterior de la tubería y la tubería no requiere de mayores modificaciones para acomodarlos.

### **2.2.1. Control de la Tasa de Vapor**

Los dispositivos para controlar la tasa de vapor en cabeza de pozo son válvulas, boquillas, y choques de flujo crítico. Todos estos dispositivos, los cuales se originaron de principios de control de flujo de gas, han sido adoptados para este tipo de aplicaciones donde el vapor se encuentra en dos fases<sup>40</sup>. Estos se dividen en dos categorías principales: flujo crítico y flujo subcrítico.

Por definición, el flujo crítico ocurre cuando la tasa de flujo a través de un dispositivo de control permanece constante a pesar de los cambios en la presión de la corriente de salida del dispositivo. Como resultado, se dice que el flujo está chocado, y la tasa sólo puede alterarse cambiando la presión de la corriente de entrada y/o el área de flujo de la sección transversal. Una condición para que ocurra flujo crítico es la siguiente, la caída de presión a lo largo del dispositivo de

---

<sup>39</sup> GRISTON, S. "Steam Distribution and Metering". Short Course, Integrated Sciences Group. 2011.

<sup>40</sup> GRISTON, S. HONG, K., Op. cit., p. 3.

control debe ser alrededor de la mitad de la presión de la corriente de entrada; de lo contrario, el flujo es considerado subcrítico. En el flujo subcrítico, la tasa de flujo también dependerá de la presión de la corriente de salida.

Las placas de orificio son usadas para mantener una caída de presión baja. Frecuentemente se requiere ajustes en las tasas, no obstante, se usan válvulas de múltiples orificios o válvulas de aguja. La tasa de flujo depende de la presión de corriente de salida porque el flujo a través de estos dispositivos generalmente es subcrítico. Estos dispositivos no son confiables porque requieren ajustes frecuentes para adaptarse a las condiciones cambiantes de flujo.

#### **2.2.1.1. Choques Ajustables**

Algunas válvulas de múltiples orificios (Figura 9) y válvulas de aguja están diseñadas para condiciones de flujo crítico, las cuales se conocen como válvulas de choque ajustables.

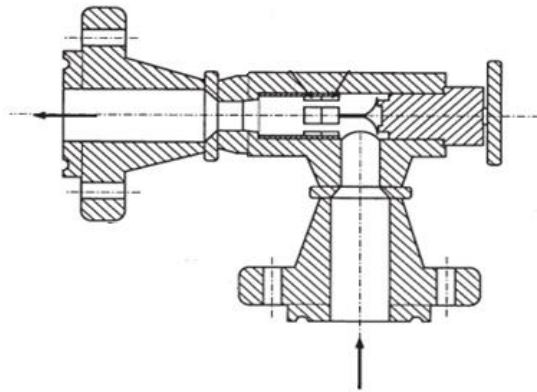
La tasa de flujo inicialmente es ajustada por la abertura del choque o el tamaño equivalente del niple, el cual es ajustado rotando uno o ambos discos; cada disco tiene un par de orificios. La geometría de flujo no circular de las válvulas de múltiples orificios hace más difícil usar un coeficiente de válvula constante para ajustar el orificio a la tasa de flujo. Como resultado, cada choque de las válvulas de múltiples orificios debe ser calibrado en sitio para asegurar un control adecuado de la tasa.

#### **2.2.1.2. Choque de Calibre Recto**

Este tipo de choques son los más recomendados para controlar las tasas de flujo de vapor a pozos inyectores; el choque Thornhill-Craver con un niple de calibre recto removible (Figura 9), es el más usado de este tipo de choques. Bajo

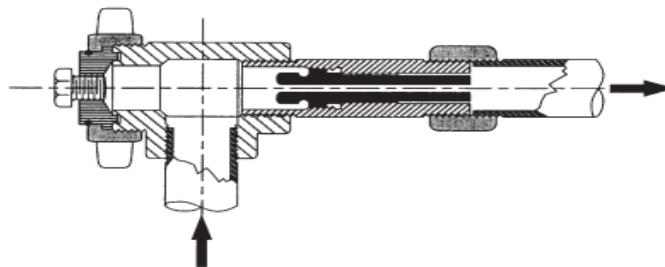
condiciones de flujo crítico, la tasa de flujo de vapor depende sólo de la presión de la corriente de entrada, calidad del vapor y del tamaño del niple. Para calidad de vapor dada, la tasa de flujo debe ser controlada ajustando la presión de entrada o el tamaño del niple. Mientras el flujo crítico predomine, la tasa de flujo es independiente de la presión de salida del choque.

**Figura 9.** Esquema de una válvula de múltiples orificios.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

**Figura 10.** Choque de flujo crítico de calibre recto.



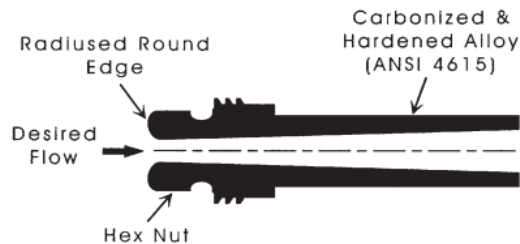
Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

La principal desventaja del choque de calibre recto es la gran caída de presión requerida. Este tipo de choque no puede ser usado con corrientes de vapor de baja presión o en condiciones donde el flujo crítico sea difícil de establecer.

### 2.2.1.3. Choque de calibre cónico

Los choques de calibre cónico pueden ser usados, en lugar de los choques de calibre recto, para alcanzar el flujo crítico con una caída de presión más baja a lo largo del choque. Este choque usa un ensamblaje convencional tipo Thornhill-Craver, junto con un niple de calibre cónico (Figura 11). El flujo crítico se alcanza en la garganta del niple de manera similar que los choques de calibre recto. Sin embargo, la sección cónica que se encuentra en la garganta del niple actúa como un difusor que permite que la corriente de salida incremente en un proceso de recuperación de presión. Consecuentemente, los choques de calibre cónico producen condiciones de flujo crítico a una caída de presión más baja, haciéndolos ideales para el uso en pozos con alta presión o baja inyectividad.

**Figura 11.** Choque de calibre cónico.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

Las ventajas de este tipo de choque sobre el tipo de choque de calibre recto es una menor caída de presión requerida para el diseño de tuberías, válvulas y accesorios, menor consumo de combustible del generador, la habilidad de alcanzar y mantener el flujo crítico para inyectores con presiones altas de cabeza de pozo.

La Tabla 2 presenta un resumen con los principales aspectos que se tienen en cuenta para seleccionar el dispositivo de control de la tasa de vapor.

**Tabla 2.** Dispositivos para el control de la tasa de vapor.

Dispositivo	Principio de Operación	Ventaja	Desventaja	Costo
<b>Choque de calibre recto</b>	El flujo crítico minimiza los efectos de las fluctuaciones de presión	Buen control para calidades mayores al 20%	Requerimiento mínimo de caída de presión: 50%	Bajo a moderado
<b>Choque de calibre cónico</b>	Flujo crítico a través de una boquilla venturi con recuperación de presión	Buen control para calidades mayores al 20% Se requiere sólo el 20% de la caída de presión para alcanzar el flujo crítico	Los nipples de pequeño diámetro están sujetos a taponamiento	Bajo a Moderado
<b>Choque ajustable</b>	Ajusta la abertura del flujo chocado mediante la rotación de discos	Fácil de cambiar las tasas de flujo	Debe ser calibrado para diferentes tasas de flujo	Moderado a alto

Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

## 2.2.2. Monitoreo de Vapor en Cabeza de Pozo

Los dispositivos para monitorear la calidad y la tasa de flujo varían desde un separador de dos fases hasta detectores de radiación. En general, los equipos disponibles para monitorear el vapor pueden ser agrupados en dos categorías: intrusivo y no intrusivo. Los dispositivos intrusivos deben ser instalados como parte del sistema de cabeza de pozo, o el sistema de tubería debe ser modificado para permitir una conexión periódica del dispositivo. Los dispositivos no intrusivos pueden ser sujetados en la superficie exterior de la tubería y no requiere mayores modificaciones para acomodarlos.

### 2.2.2.1. Medición de la tasa de flujo

Los dispositivos intrusivos incluyen choques de cabeza de pozo, medidores de orificio o vórtex y separadores. Actualmente no hay ningún dispositivo no intrusivo para monitorear la tasa de flujo.

## **Placas de Orificio**

Las placas de Orificio han sido usados por décadas para medir las tasas de flujo de vapor en generadores y en pozos de inyección. Para una calidad de vapor conocida, la caída de presión a lo largo de plato de orificio puede ser usada para calcular la tasa de flujo. Estos dispositivos han trabajado satisfactoriamente para vapor con alta calidad, el cual se comporta como un gas seco. Para vapor de baja calidad, puede presentarse lecturas incorrectas debido a que la ecuación de flujo de dos fases no es confiable, y a causa de los baches de líquido que pasan por el orificio, se producen grandes fluctuaciones en la caída de presión medida. Se puede instalar un dispositivo de mezcla directamente en la corriente de entrada al orificio para minimizar los efectos de los baches.

## **Choques en Cabeza de Pozo**

Bajo condiciones de flujo crítico, la tasa de flujo de vapor depende de la presión de la corriente de entrada, de la calidad del vapor y del tamaño del niple. El tamaño del niple es diseñado para lograr una determinada tasa de vapor para una calidad de vapor conocida. Los choques de calibre recto y los choques de calibre cónico siguen los mismos principios de flujo; por esto se puede usar la misma ecuación de choque. La presión de entrada y la presión de salida del choque son medidas periódicamente para asegurar que se mantengan las condiciones de flujo crítico. La tasa de flujo es calculada para una calidad de vapor de entrada, presión de salida y tamaño del niple determinados usando la ecuación de flujo crítico de Thornhill-Craver. Esta ecuación es más confiable que las empleadas en medidores de orificio.

La Tabla 3 muestra el principio de operación, ventajas, desventajas y costos de los dispositivos para la medición de la tasa de flujo de vapor.

**Tabla 3.** Dispositivos para la medición de la tasa de flujo.

Dispositivo	Principio de Operación	Ventaja	Desventaja	Costo
<b>Orifice Plate</b>	La tasa de flujo es calculada midiendo la calidad y caída de presión a lo largo del dispositivo	Relativamente fácil de instalar y operar, no hay limitaciones de presión o temperatura	No se obtienen correlaciones entre tasa de flujo, calidad y caída de presión	Bajo a moderado
<b>Wellhead Choke</b>	La tasa de flujo crítico se obtiene de la medida de la presión y la calidad	Es confiable si el flujo es crítico	Se requiere alta caída de presión	Bajo a Moderado

Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

### 2.2.2.2. Medición de la Calidad de Vapor

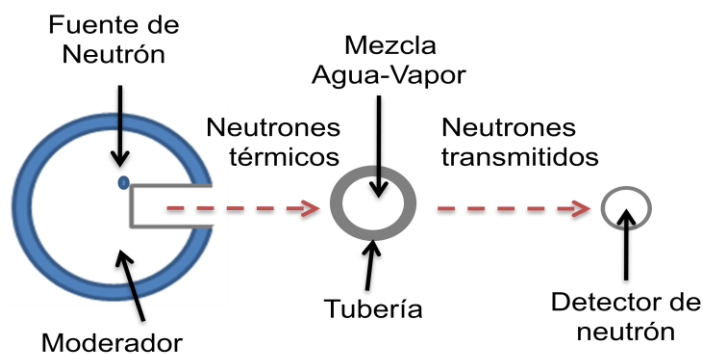
Los dispositivos intrusivos para medir la calidad de vapor incluyen dos platos de orificio en serie, orificios y choques en serie, cono-V y medidores vórtex o turbinas en serie, densitómetros, medidores dieléctricos y separadores. Los dispositivos no intrusivos incluyen detectores de radiación gamma y medidores ultrasónicos.

#### Detectores de Radiación

La mayoría de dispositivos no intrusivos para la medición de calidad de vapor detectan la densidad del vapor de dos fases pasando rayos gamma o neutrones térmicos a lo largo de la sección transversal (Figura 12). La densidad de vapor medida por estos dispositivos es una de medida del holdup de líquido o de la cantidad de líquido presente en la sección transversal de la tubería. Sin embargo, la densidad y el holdup de líquido por si solos no pueden determinar la calidad del vapor que está fluyendo. Las velocidades de la fase vapor y la fase líquida deben ser medidas en adición a la densidad del vapor para determinar de manera adecuada la calidad del vapor que fluye por la tubería.

Se realizó una prueba en la cual se agregó un dispositivo Kay-Ray a un mezclador estático para reducir la velocidad de deslizamiento entre las fases de vapor y líquido. Sería ideal reducir dicha velocidad a cero, con el propósito que la densidad del vapor pueda ser usada para determinar la calidad del vapor que fluye. No obstante, las pruebas de flujo de vapor mostraron que es difícil mantener dicha velocidad en cero a través de una tubería.

**Figura 12.** Detector de Neutrones térmicos.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

### Medidor Ultrasónico

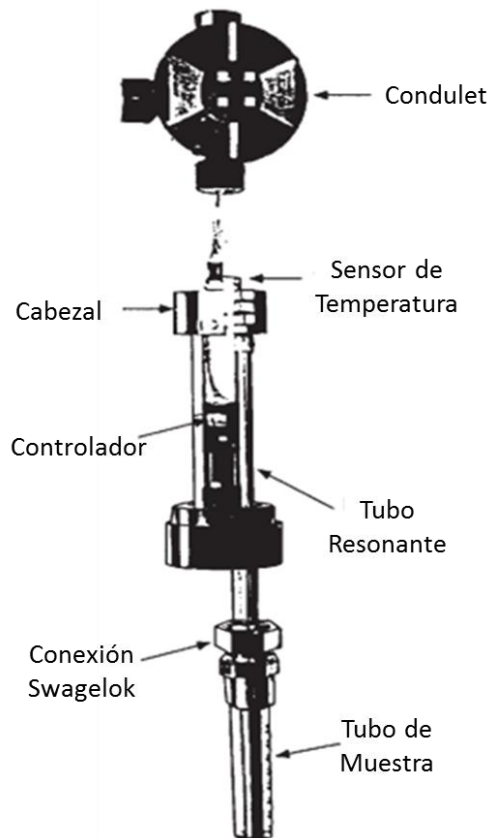
Esta técnica fue adoptada de un método patentado para medir la fracción de holdup de una fase de fluidos discontinua fluyendo dentro de una fase de fluido continua. El principio del medidor ultrasónico es similar al principio de un detector de radiación, con el cual se mide la densidad del vapor de dos fases, y no la calidad del vapor fluyendo.

### Densitómetro Q-BAR

El dispositivo Q-Bar (Figura 12) fue desarrollado y comercializado por la compañía Engineering Measurement Co. (Emco) y tiempo después comercializado por Baker

Oil Tools. Este dispositivo recolecta una muestra de vapor a través de un tubo multipuertos posicionado verticalmente a lo largo de la sección transversal de la tubería, y mide la vibración constante de la muestra a medida que fluye a través de los tubos resonantes. El densitómetro está basado en la segunda Ley de Newton, la cual es usada para convertir la vibración constante de la masa de la muestra de vapor y luego la calidad del vapor.

**Figura 13.** Q-BAR.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

La desventaja de este dispositivo es que la calidad de la muestra no es representativa respecto a la calidad de toda la corriente de vapor que fluye por la tubería; debido a que se pueden tomar diferentes mezclas de líquido y vapor dependiendo del diseño y la posición del tubo de muestra. En una tubería horizontal, el vapor de dos fases fluye en régimen de flujo segregado; por esto,

capturar las proporciones correctas de líquido y vapor no es tan seguro. En una prueba se ubicó un dispositivo estático de mezcla en la corriente de entrada del tubo de muestra, pero este dispositivo no fue eficiente para capturar la muestra representativa.

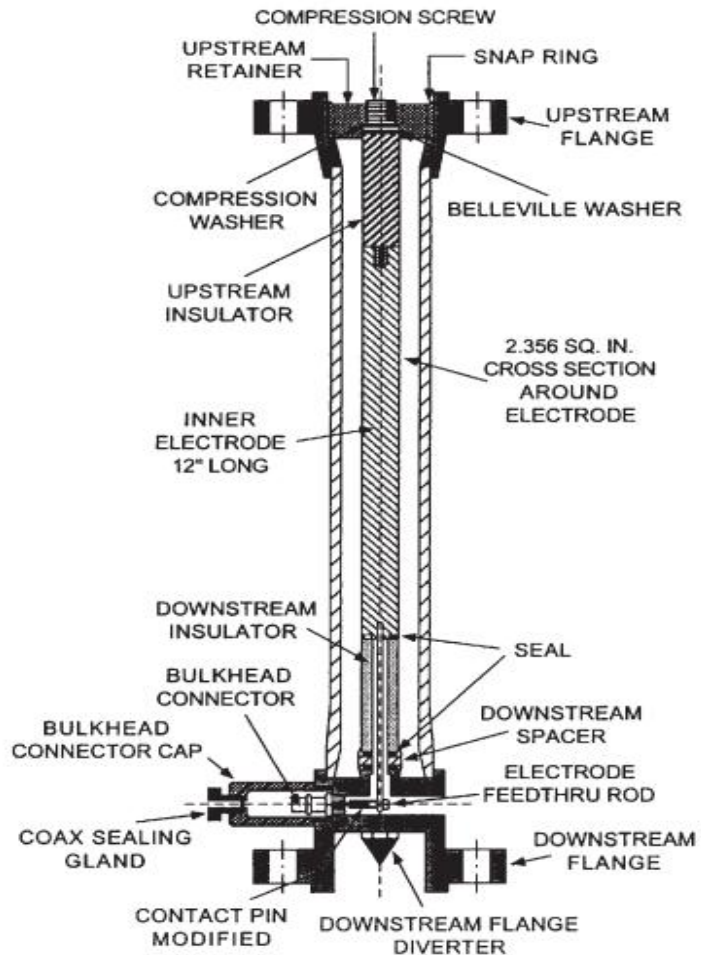
### **Sensor Dieléctrico**

Texaco desarrolló un sensor que mide las propiedades dieléctricas del vapor de dos fases que fluye a través del campo de detección dentro de la sección transversal de una tubería anular. El dispositivo, llamado Sensor dieléctrico de Calidad del Vapor, DSQS (Figura 14), actualmente es comercializado por California Steam Service.

Este dispositivo también mide el holdup de líquido, no la calidad del vapor. En adición, la conversión de las medidas dieléctricas a calidad del vapor requiere conocer la constante dieléctrica de la fase líquida. Debido a que esta constante puede cambiar de pozo a pozo dependiendo de la calidad del vapor, por esto se debe obtener una muestra representativa de líquido y se debe analizar en el lugar donde el medidor dieléctrico sea empleado.

Pruebas de campo recientes realizadas por Chevron indicaron que este sensor dieléctrico proporciona resultados similares a las medidas realizadas con separadores para vapores de calidad entre 30% y 70%. Para vapores de calidad mayor al 70% las medidas del sensor dieléctrico son 10% mayor a las obtenidas con el separador. Para vapores con calidad menor a 30% es difícil realizar mediciones.

Figura 14. DSQS.

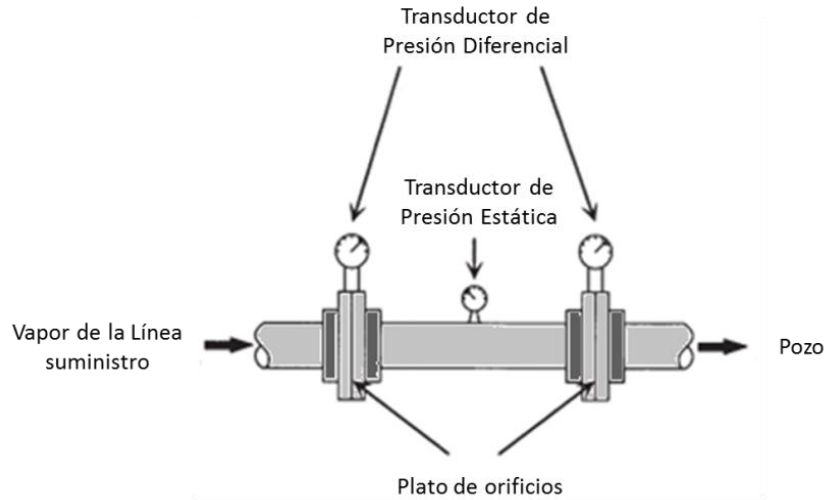


Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

### 2.2.3.1. Orificios Dobles o Choque de Orificio en Serie

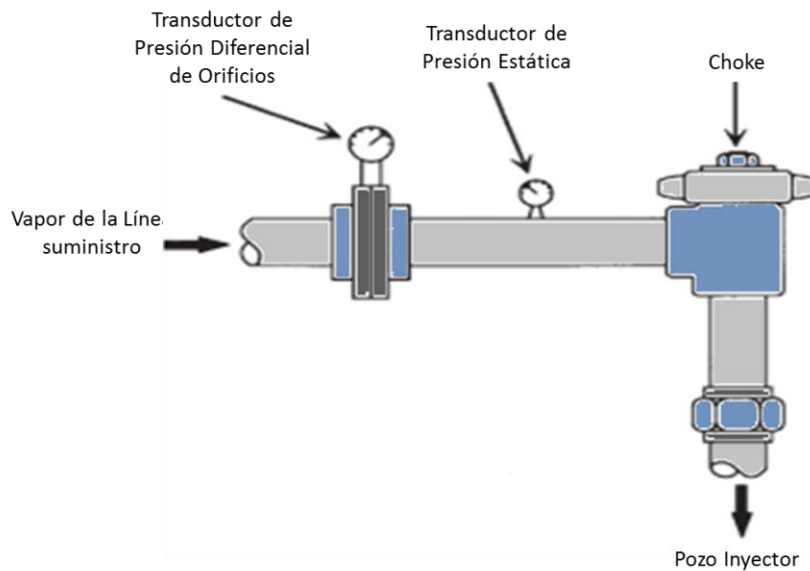
El medidor de doble orificio (Figura 15) mide la caída de presión a lo largo de cada plato de orificio. El medidor de choque-orificio (Figura 16) mide la caída de presión a lo largo del plato de orificio y la presión absoluta de la corriente de entrada al choque. La calidad y la tasa de vapor son determinadas de una solución simultánea de dos ecuaciones de Bernoulli las cuales describen el flujo a través de dos dispositivos de restricción.

**Figura 15.** Medidor de doble orificio.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

**Figura 16.** Medidor Choque-Orificio.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

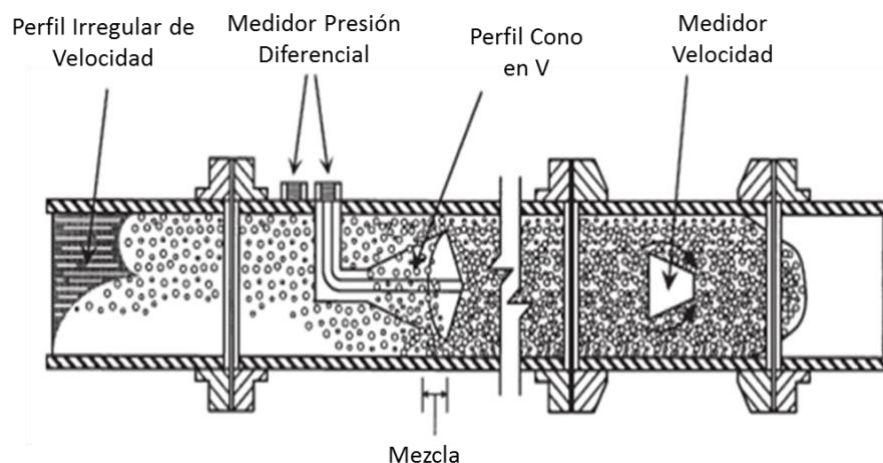
El problema con este método es que las dos ecuaciones no son independientes, así que no pueden ser resueltas para calidad y tasa. Aunque se pueden obtener una serie de coeficientes de flujo para cada dispositivo desde pruebas de campo, no indica que las dos ecuaciones de flujo sean independientes. Chevron realizó

pruebas con ambos dispositivos sobre un amplio rango de condiciones de flujo. La información obtenida con los resultados mostró que las ecuaciones de flujo no son independientes. Texaco ha desarrollado y comercializado un sistema de medida orificio-choque llamado Daniel Flowmeter. En 1994, Arco publicó un artículo similar al de Texaco. No obstante, ninguno de estos métodos es usado.

### 2.2.3.2. Dispositivo SteamScan

Barton y Shell desarrollaron un método llamado SteamScan (Figura 17) el cual incorpora un cono-V (una combinación de mezcla de flujo y elemento de presión diferencial) y otro dispositivo para la lectura de la velocidad (medidor vórtex o turbina). Este dispositivo emplea la Segunda Ley de Newton para convertir la fuerza (medida por la diferencia de presión en el cono-V) y las medidas de velocidad a calidad del vapor y tasa de flujo utilizando un procedimiento específico.

Figura 17. SteamScan.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

El cono-V, usado como dispositivo de diferencial de presión, y el medidor vórtex operan bajo el principio de momento de flujo. Por esto, parece que el SteamScan

tiene algunas limitaciones similares a las limitaciones de los dispositivos de doble orificio. Adicionalmente, el efecto homogeneizador del cono-V no proporciona beneficios. Según algunas pruebas de campo, el fluido homogeneizado se separa en dos fases luego de recorrer 12 pulgadas del punto de mezcla. En el dispositivo SteamScan, el medidor vórtex está localizado a 16 ó 24 pulgadas del cono-V.

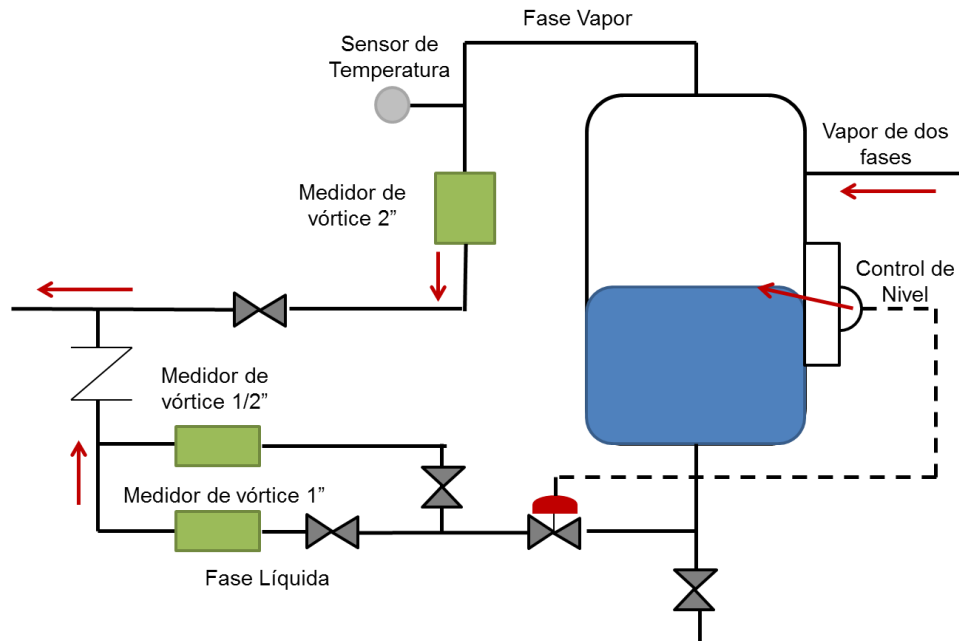
### **2.2.3.3. Separador de dos fases**

El separador de dos fases (Figura 18) es considerado el método más confiable y adecuado para el monitoreo de tasa y calidad debido a que mide el flujo de cada fase por separado utilizando una tecnología de medición de flujo de una fase. Las fases líquido y vapor son separadas en el separador y la tasa de flujo másico de cada fase es medida usando platos de orificio o medidores vórtex. El flujo másico total es determinado mediante la adición de flujos másicos de la fase líquida y la fase vapor. La calidad del vapor es determinada dividiendo la tasa de flujo másico de vapor sobre el flujo másico total.

Una limitación del separador de dos fases, es su alto costo si se requieren mediciones frecuentes. Sin embargo, su costo se justifica en la realización de medidas adecuadas para el monitoreo de la tasa y calidad del vapor.

La Tabla 4 relaciona los principales aspectos de los diferentes dispositivos para la medición simultánea de la tasa y calidad de vapor. Una vez la tasa y la calidad del vapor hayan sido medidas a lo largo del sistema de distribución, la información obtenida puede ser empleada para mejorar y optimizar el desempeño del sistema de distribución. Esta información también puede ser usada para realizar estudio de administración de calor en yacimiento también.

**Figura 18.** Esquema de un separador de dos fases.



Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

**Tabla 4.** Dispositivos para la medición simultanea de tasa de vapor y calidad del vapor.

Dispositivo	Principio de Operación	Ventaja	Desventaja	Costo
<b>Orificios y Choques</b>	Usa ecuaciones de flujo para orificios y choques	No hay limitaciones de presión o temperatura	Tasa única de flujo y no se obtiene determinación de la calidad	Bajo a moderado
<b>Cono-V</b>	Las ecuaciones de flujo son similares a las ecuaciones para orificios y choques	No hay limitaciones de presión o temperatura	Tasa única de flujo y no se obtiene determinación de la calidad	Alto
<b>Separador de dos fases</b>	Separa y mide las tasas de flujo de vapor y liquido	Son las medidas más confiables	Requiere de la observación de un operador	Alto a muy alto

Fuente: GRISTON, S. HONG, K. "Best Practice for the Distribution and Metering of the two-phase Steam". SPE 35422. 1996.

### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura; donde esta diferencia de temperatura es definida como calor. Esta ciencia pretende no sólo explicar cómo la energía térmica suele ser transferida, sino también predecir a rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas tendrá lugar esta transferencia<sup>41</sup>.

Los mecanismos de transferencia de calor se pueden clasificar de acuerdo con la relación existente entre esta forma de energía y la sustancia de trabajo. Estos mecanismos son: conducción, convección y radiación.

#### 3.1. CONDUCCIÓN

Es el flujo intermolecular de calor dentro de una sustancia. Toda molécula, a una temperatura dada, vibra con una cierta frecuencia; si en el interior de una sustancia existen gradientes de temperatura, las moléculas más calientes vibran a una frecuencia mayor que las más frías (Figura 19). Las moléculas que vibran más rápidamente transferirán parte de su energía a la molécula vecina, es decir, cede parte de su calor. Esta última, al aumentar su frecuencia, cederá parte de su nueva energía a la siguiente, originándose de esta manera el mecanismo de transferencia de calor en la dirección del gradiente de temperatura<sup>42</sup>.

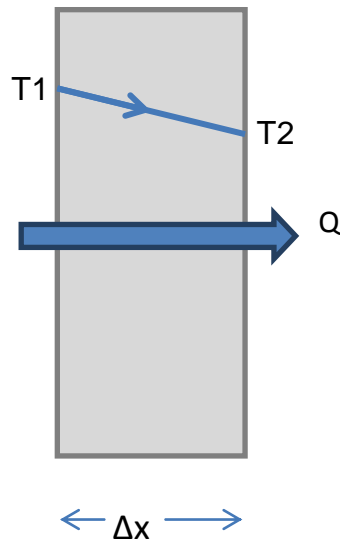
La ley que determina el flujo continuo de calor por conducción a través de un cuerpo, fue determinada experimentalmente por Fourier:

---

<sup>41</sup> MARTELO S. M.; DELGADO A. G. Op. cit., p. 44.

<sup>42</sup> KREITH, F.; MANGLIK. R.; BOHN, M. "Principles of Heat Transfer" Seventh Edition. Cengage Learning. 2011, p. 71.

**Figura 19.** Transferencia de calor por conducción.



Fuente: Fidan, Silcuk. Wellbore Heat Loss Calculation during Steam Injection in Onshore&Offshore Environments. Stanford University. 2011

$$q_x = -K \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde

$q_x$  = Tasa de calor por unidad de área en la dirección  $x$ ,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie^2}$

$K$  = Conductividad térmica,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie \cdot ^\circ F}$

$\frac{dT}{dx}$  = Gradiente de temperatura en la dirección  $x$ ,  $\frac{^\circ F}{pie}$

La ecuación de Fourier exige un flujo que sea continuo, es decir, que el gradiente de temperatura permanezca constante en la dirección en que se transfiere el calor.

### 3.1.1. Resistencia térmica a la conducción

La resistencia térmica es la oposición que ofrece el material a la transferencia de calor por conducción, y se define como una propiedad inversa a la conductividad

térmica. La cual se puede determinar como el cociente entre la diferencia de temperatura del sistema y la cantidad de calor que es transferido por conducción.

$$R_{cond} = \frac{(T_1 - T_2)}{q_{cond}} \quad (2)$$

Donde

$T_1$  = Temperatura interna, °F

$T_2$  = Temperatura externa, °F

$q_{cond}$  = Calor transferido por conducción,  $\frac{°F \cdot hr \cdot pie}{BTU}$

### 3.2. CONVECCIÓN

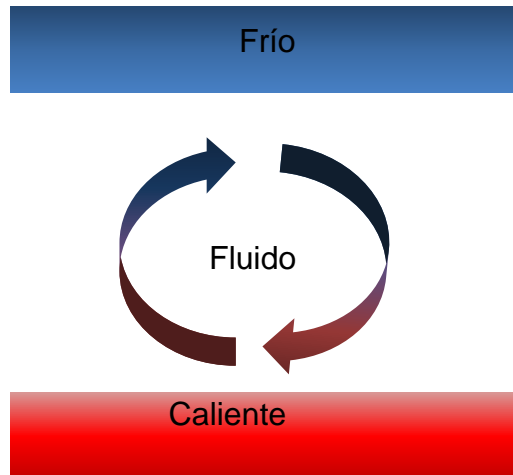
El mecanismo de transferencia de calor por convección se da mediante el movimiento global o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se muevan de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido<sup>43</sup>.

Este mecanismo de transferencia sólo es posible entre líquido y/o gases (Figura 20). Cabe anotar que la diferencia fundamental con el mecanismo anterior es solamente en la forma como se transporta el calor. Mientras que en la conducción es un proceso que pudiéramos llamar estático, sin desplazamiento molecular, la convección es un proceso dinámico, que supone siempre el desplazamiento del fluido. A nivel molecular, la transferencia de calor sigue siendo por conducción.

---

<sup>43</sup> INCROPERA. F. P. DE WITT, D. P. "Fundamentos de transferencia de calor". Cuarta Edición. Prentice Hall. México, 1999, p. 284.

**Figura 20.** Transferencia de calor por convección.



Fuente: Fidan, Silcuk. Wellbore Heat Loss Calculation during Steam Injection in Onshore & Offshore Environments. Stanford University. 2011

La convección de calor viene dada por:

$$\frac{q_{conv}}{A} = h_c |T_f - T_s| \quad (3)$$

Donde

$q_{conv}$  = Tasa de flujo de calor por convección,  $\frac{BTU}{hr}$

$A$  = Área a través de la cual ocurre el flujo de calor,  $pie^2$

$h_c$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección,  $\frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot F}$

$T_f$  = Temperatura del fluido,  $^{\circ}F$

$T_s$  = Temperatura de la superficie,  $^{\circ}F$

### 3.2.1. Coeficiente de convección

Este coeficiente de transferencia de calor por convección es el que determina la influencia de las propiedades del fluido que limita con la superficie fija, y su valor

depende de las condiciones de capa límite del fluido, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y la viscosidad del fluido. Este coeficiente se determina al encontrar la cantidad de calor intercambiado entre el fluido y la superficie fija, cuando la diferencia de temperaturas sea de 1°F. El coeficiente de convección se representa con la letra ( $h_c$ ) y se expresa en  $(\frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot F})$ <sup>44</sup>.

### 3.2.2. Resistencia térmica a la convección

Se puede definir como una propiedad inversa al coeficiente de convección, la cual puede ser determinada fácilmente expresando el cociente entre la diferencia de temperatura del fluido y la superficie fija sobre la cantidad de calor transferido por convección<sup>45</sup>.

$$R_{conv} = \frac{(T_s - T_f)}{q_{conv}} \quad (4)$$

### 3.2.3. Convección Forzada

Se dice que la transferencia de calor es por convección forzada si el movimiento es ocasionado por un agente externo de tal forma que se impulse el fluido hacia la superficie sólida.

En casos de estudio donde la velocidad del viento se asuma diferente a cero se presentará transferencia de calor por convección forzada, por otro lado si la velocidad es cero, la transferencia de calor será por convección libre.

---

<sup>44</sup> GONZALEZ. Fernando. "Determinación Experimental del Coeficiente de Convección y el Factor de Fricción de un intercambiador de placas". Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2008.

<sup>45</sup> INCROPERA, Op. cit., p. 334.

Para  $1,0 < 8,8 \cdot \text{Diámetro de tubería} \cdot \text{Velocidad del viento} < 50,0$

$$h_{ce} = 19,3 C_{pa} \frac{(\rho_a V)^{0,6}}{D^{0,4}} \quad (5)$$

$8,8 \cdot \text{Diámetro de tubería} \cdot \text{Velocidad del viento} > 50,0$

$$h_{ce} = 8,0239 \frac{K_a (5,28 \rho_a V D)^{0,805}}{D \mu_a^{0,805}} \quad (6)$$

Donde

$$h_{ce} = \text{Convección forzada} \frac{BTU}{hr \cdot pie^2 \cdot F}$$

$$V = \text{Velocidad del aire,} \frac{millas}{hr}$$

$$\rho_a = \text{Densidad del aire,} \frac{lb}{pie^3}$$

$$C_{pa} = \text{Capacidad calorífica del aire a presión constante,} \frac{BTU}{lb \cdot F}$$

$$D = \text{Diámetro de la tubería,} \text{pie}$$

$$K_a = \text{Conductividad térmica del aire,} \frac{BTU}{hr \cdot pie \cdot F}$$

$$\mu_a = \text{Viscosidad dinámica del aire,} \frac{lb}{pie \cdot hr}$$

### 3.4. RADIACIÓN

Es la forma más generalizada de transferencia de calor a través del universo. Los cuerpos calientes emiten radiaciones de origen electromagnético y como tal, se transmiten a través del vacío. Cualquier sustancia que se interponga entre la fuente y el receptor, bloqueara total o parcialmente estas ondas, anulando o disminuyendo la transferencia de calor por radiación. En resumen, la radiación sólo es posible a través del vacío o a través de los gases debido a su baja

densidad, porque parte de las radiaciones pueden pasar a través de las moléculas sin ser absorbidas por éstas<sup>46</sup>.

Los modelos matemáticos que permiten describir los mecanismos y tasas de transferencia de calor, han sido obtenidos, en muchos casos, como resultado de experimentaciones que han predicho a la formulación teórica. La ecuación básica fue descubierta empíricamente por Stefan en 1879 y derivada teóricamente por Boltzmann en 1884, y viene dada por:

$$\frac{q_{rad}}{A} = \sigma \varepsilon (T_1^{*4} - T_2^{*4}) \quad (7)$$

Donde

$\frac{q_{rad}}{A}$  = Tasa de flujo de calor por radiación,  $\frac{BTU}{hr}$

$A$  = Área a través de la cual ocurre el flujo de calor,  $pie^2$

$T_1^*$  = Temperatura absoluta del cuerpo a mayor temperatura,  $R$

$T_2^*$  = Temperatura absoluta del cuerpo a menor temperatura,  $R$

$\varepsilon$  = Emisividad de la superficie

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman,  $\frac{BTU}{hr * pie^2 * F^4}$

$$\sigma = 0,1713 \frac{BTU}{hr * pie^2 * F^4} \text{ o } 1,355 * 10^{-12} \frac{cal}{seg * cm^2 * K^4}$$

### 3.4.1. Emisividad

La emisividad es una medida de la habilidad de una superficie de absorber radiación. Las emisividades son adimensionales e iguales o menores que la unidad, y dependen de la naturaleza de la superficie. En la Tabla 5 se muestran

<sup>46</sup> INCROPERA, Op. cit., p. 633.

las emisividades de algunos materiales utilizados en la fabricación de tuberías de superficie.

**Tabla 5.** Emisividades aproximadas de algunos metales.

METAL	TEMPERATURA (F)	EMISIVIDAD ( $\epsilon$ )
Aluminio oxidado	400 – 1.100	0,11 – 0,19
Aluminio no oxidado	400 – 1.100	0,04 – 0,08
Hierro, acero oxidado	400 – 1.100	0,75 – 0,95
Hierro, acero no oxidado	350 – 1.200	0,05 – 0,30
Acero inoxidable	75 – 210	0,07 – 0,30
Acero pulido	430 – 1600	0,05 – 0,06

Fuente: MARTELO S. MARIA; DELGADO A. GUSTAVO. Sistemas de completación en procesos térmicos en la faja petrolífera del Orinoco. Trabajo de grado. Universidad Central de Venezuela. 2006.

### 3.4.2. Resistencia térmica a la radiación

Es definida como la oposición a la transferencia de calor por radiación, y se determina de la misma forma que la resistencia general, aplicando el cociente entre la diferencia de temperatura que existe entre la superficie fija y el fluido que la rodea sobre la cantidad de calor transferido por radiación<sup>47</sup>.

$$R_{rad} = \frac{(T_1^* - T_2^*)}{q_{rad}} \quad (8)$$

Donde

$R_{rad}$  Resistencia Térmica a la Radiación

$q_{rad}$  Calor transferido por radiación,  $\frac{BTU}{hr}$

<sup>47</sup> INCROPERA, Op. cit., p. 584.

### 3.5. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL

Generalmente el proceso de transferencia de calor implica más de un mecanismo, varios medios transmisores, distintos cuerpos a la vez receptores y transmisores de calor. Debido a que sólo es de interés el comportamiento de temperatura de la fuente térmica y del receptor final, se empleará el concepto de coeficiente de transferencia de calor total<sup>48</sup>.

Durante el flujo radial de calor a lo largo de una tubería (Figura 21), las áreas a través de las cuales se lleva a cabo la transferencia de calor, mediante conducción, son variables. Por consiguiente, se emplea el concepto de área media logarítmica para la transferencia por conducción, definida como

$$A_{ml} = \frac{A_e - A_i}{\ln(A_e) - \ln(A_i)} \quad (9)$$

Donde

$A_{ml}$  Área media logarítmica

$A_e$  Área externa

$A_i$  Área interna

Simplificando y tomando un pie de longitud

$$A_{ml} = \frac{2\pi r_e - 2\pi r_i}{\ln(2\pi r_e) - \ln(2\pi r_i)} = \frac{2\pi(r_e - r_i)}{\ln(r_e/r_i)} \quad (10)$$

Donde

---

<sup>48</sup> GÓMEZ PRADA, LUIS GONZALO. Recuperación mejorada de hidrocarburos. Inyección cíclica y continua de vapor. Universidad Industrial de Santander. 1989, p. 74.

$r_e$  Radio externo

$r_i$  Radio interno

Entonces, la cantidad de calor que se transfiere por conducción, a través de una tubería con la unidad de longitud es:

$$q = \frac{2\pi K(T_i - T_e)}{\ln(r_e/r_i)} \quad (11)$$

Donde

$T_e$  Temperatura externa

$T_i$  Temperatura interna

$K$  Coeficiente de conductividad

Las unidades de  $q$ , dependerán de las unidades de  $K$ ,  $T$  y  $r$ .

El coeficiente de transferencia para el sistema de la Figura 21 se obtiene a partir de la siguiente manera; asumiendo un (1) pie de longitud.

Por convección del fluido caliente a la cara interna de la tubería:

$$T_f - T_1 = \frac{q_1}{2\pi r_i h_c} \quad (12)$$

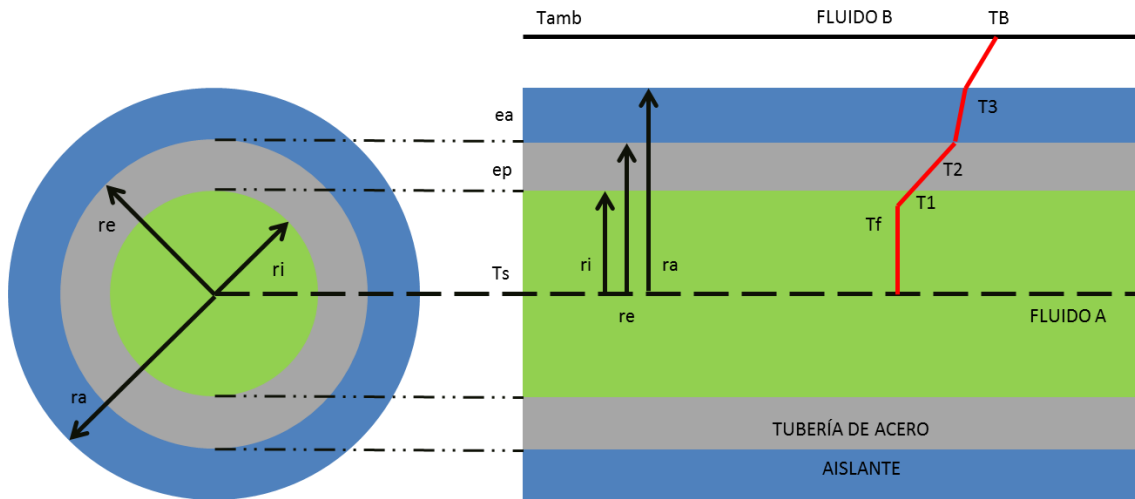
Por conducción a través de la tubería:

$$T_1 - T_2 = \frac{q_2 \ln(r_e/r_i)}{2\pi K_p} \quad (13)$$

Donde

$$K_p = \text{Coeficiente de conducción de la tubería, } \frac{BTU}{hr \cdot pie \cdot ^\circ F}$$

**Figura 21.** Tubería recubierta con aislante.



Fuente: GÓMEZ PRADA, LUIS GONZALO. Recuperación mejorada de hidrocarburos. Inyección cíclica y continua de vapor. Universidad Industrial de Santander. 1989.

Cuando hay aislante recubriendo la tubería, por conducción a través del aislante se tiene:

$$T_2 - T_3 = \frac{q_3 \ln(r_a/r_e)}{2\pi K_a} \quad (14)$$

Donde

$r_a$  = Radio del aislante, *pie*

$K_a$  = Coeficiente de conducción del aislante,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie \cdot ^\circ F}$

Por radiación y convección de la cara externa del aislante a la atmósfera:

$$T_3 - T_{amb} = \frac{q_4}{2\pi r_{ae}(h_{ca} + h_r)} \quad (15)$$

Donde

$T_{amb}$  = Temperatura del aire, °F

$h_{ca}$  = Coeficiente de convección del aire,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}$

$h_r$  = Coeficiente de radiación de la cara externa,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}$

Recordando que

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q \quad (16)$$

$$T_f - T_{amb} = (T_f - T_1) + (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + (T_3 - T_{amb}) \quad (17)$$

De acuerdo a la ecuación anterior se puede decir que:

$$T_f - T_{amb} = \frac{q}{2\pi} \left( \frac{1}{r_i h_{cf}} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{K_p} + \frac{\ln(r_a/r_e)}{K_a} + \frac{1}{r_a(h_{ca} + h_r)} \right) \quad (18)$$

Despejando q se tiene

$$q = 2\pi(T_f - T_{amb}) \left( \frac{1}{r_i h_{cf}} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{K_p} + \frac{\ln(r_a/r_e)}{K_a} + \frac{1}{r_a(h_{ca} + h_r)} \right)^{-1} \quad (19)$$

Entonces la cantidad de calor total entre el fluido caliente y la atmósfera se puede expresar mediante el coeficiente de transferencia de calor total denominado U. Se debe recordar, que las áreas a través de las cuales ocurre el proceso de transferencia de calor no son constantes, es necesario escoger una de referencia.

En este caso será el área interna de la tubería:

$$A_i = 2\pi r_i L_L \quad (20)$$

Donde

$L_L$  Longitud de la tubería

Definiendo a  $q$  por unidad de longitud se puede escribir entonces:

$$q = 2\pi r_i U (T_f - T_{amb}) \quad (21)$$

Sacando  $r_i$  como factor común de la ecuación 17 con la ecuación anterior

$$2\pi r_i U (T_f - T_{amb}) = 2\pi r_i (T_f - T_{amb}) \left( \frac{1}{h_c} + \frac{r_i \ln(r_e/r_i)}{K_p} + \frac{r_i \ln(r_a/r_e)}{K_a} + \frac{r_i}{r_a(h_{ca}+h_r)} \right)^{-1} \quad (22)$$

Por lo que se concluye que  $U$  es:

$$U = \left( \frac{1}{h_{cf}} + \frac{r_i \ln(r_e/r_i)}{K_p} + \frac{r_i \ln(r_a/r_e)}{K_a} + \frac{r_i}{r_a(h_{ca}+h_r)} \right)^{-1} \quad (23)$$

Cabe resaltar que los valores de  $h_{ca}$  y  $h_r$  deben calcularse a la temperatura promedio

$$\frac{T_3 + T_{amb}}{2} \quad (24)$$

#### 4. PÉRDIDAS DE CALOR EN LÍNEAS DE SUPERFICIE

Las pérdidas de calor en líneas de superficie ocurren a medida que el vapor se mueve desde el generador a través de la tubería, hasta la cabeza de pozo. Al analizar este tipo de pérdidas de calor se debe tener en cuenta que están incluidos los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación<sup>49</sup>.

En las tuberías de transporte de vapor, las pérdidas de calor dependen de la diferencia de temperatura entre el medio ambiente en el que se encuentra la tubería y la temperatura del fluido transportado a través de ella, además del espesor del aislante (si lo hay), el diámetro y la longitud de las líneas de superficie.<sup>50</sup> Todas estas condiciones afectan las pérdidas de calor y deben ser consideradas cuando se diseñan sistemas de inyección de vapor.

#### 4.1. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LÍNEAS DE SUPERFICIE

El cálculo de las pérdidas de calor que se presenta a continuación está basado en el método de Willhite.

$$q = 2\pi r_{ae} U (T_s - T_{amb}) L_L \quad (25)$$

Donde

$q$  Tasa de pérdidas de calor,  $\frac{BTU}{hr}$

$U$  Coeficiente de transferencia de calor total,  $\frac{BTU}{hr \cdot \pi e^2 \cdot ^\circ F}$

$T_s$  Temperatura del fluido fluyendo en la tubería,  $^\circ F$

$T_{amb}$  Temperatura del medio ambiente donde se encuentra la línea,  $^\circ F$

<sup>49</sup> PALMA, B. JORGE M. Apuntes de clase Métodos de Recobro. Universidad Industrial de Santander. 2012.

<sup>50</sup> GONZALEZ, RICARDO. PINILLA, JAIME, Op. cit., p. 10.

$$U = \left( \frac{1}{h_c} + \frac{r_i \ln(r_e/r_i)}{K_p} + \frac{r_i \ln(r_a/r_e)}{K_a} + \frac{r_i}{r_a(h_{ca}+h_r)} \right)^{-1} \quad (26)$$

Las propiedades físicas del aire, necesarias en las ecuaciones anteriores, se pueden calcular en función de la temperatura ambiente y de la presión atmosférica, mediante las siguientes aproximaciones propuestas por Keyes, Eckart y Drake.

$$K_a = 0,01328 + 2,471 * 10^{-5}T - 4,247 * 10^{-9}T^2 \quad (27)$$

$$\rho_a = 0,0771 - 8,848 * 10^{-5}T - 3,744 * 10^{-8}T^2 \quad (28)$$

$$\mu_a = 0,04 + 6,155 * 10^{-5}T - 1,22 * 10^{-8}T^2 \quad (29)$$

$$C_{pa} = 0,2382 + 1,39 * 10^{-5}T - 1,027 * 10^{-8}T^2 \quad (30)$$

$$B_a = 0,0024 - 0,757 * 10^{-5}T - 0,169 * 10^{-7}T^2 - 0,148 * 10^{-10}T^3 \quad (31)$$

Donde  $T$  es la temperatura promedio entre la superficie externa de la línea y la temperatura ambiente. Las ecuaciones anteriores son válidas en el rango de 0 a 1000°F, excepto para la ecuación del coeficiente de expansión volumétrica del aire,  $B_a$ , la cual sólo es válida de 0 a 500°F.

#### 4.2. CALIDAD DEL VAPOR EN CABEZA DE POZO

Generalmente los generadores de vapor son muy eficientes al producir vapor; sin embargo, entre la cabeza de pozo y el generador puede existir una longitud considerable de tubería, conexiones, loops, entre otros accesorios, que pueden degradar la calidad del vapor y de esta forma reducir la eficiencia del proceso. Por esto, es importante determinar la calidad del vapor en cabeza de pozo para considerar la necesidad de la implementación de aislante térmico en tubería de superficie.

#### 4.2.1. Cálculo de la calidad del vapor en la cabeza de pozo

El cálculo de la calidad en la cabeza del pozo, en el caso de la inyección de vapor, tiene en cuenta la suposición que las pérdidas por fricción, en las líneas de superficie, son despreciables. Es decir, que el proceso es isobárico y, por lo tanto, isotérmico. Sin embargo, esto no es absolutamente cierto y aplica sólo como criterio de diseño. Los valores verdaderos de calidad en el cabezal del pozo se deben determinar una vez hecha la instalación por medida directa a la entrada del vapor al pozo.

Para estimar con buena aproximación el valor de la calidad a la entrada del pozo se realiza el siguiente balance de calor:

$$(\text{Calor que sale del generador}) = (\text{Calor que llega al cabezal}) + (Q)$$

Es decir

$$q_g = q_c + Q \quad (32)$$

Donde

$q_g$  Calor que sale del generador,  $\frac{BTU}{hr}$

Este término calculado por la ecuación

$$q_g = w_v(h_w + x_g L_v) \quad (33)$$

Donde

$w_v$  Peso del vapor generado,  $\frac{lb}{hr}$

- $h_w$  Entalpía del agua saturada,  $\frac{BTU}{lb}$   
 $x_g$  Calidad a la salida del generador  
 $L_v$  Calor latente de vaporización del agua,  $\frac{BTU}{lb}$   
 $q_c$  Calor en el cabezal de pozo,  $\frac{BTU}{hr}$

Este último término es calculado por la ecuación

$$q_c = w_v(h_w + X_c L_v) \quad (34)$$

Donde

- $X_c$  Calidad en el cabezal de pozo  
 $Q$  Pérdida total de calor en la línea,  $\frac{BTU}{hr}$

$$Q = (q_t)(L_L) \quad (35)$$

Donde

- $q_t$  Tasa de pérdida de calor en la línea,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie}$

Si estos valores se reemplazan en la ecuación de balance, se obtiene:

$$w_v(h_w + x_g L_v) = w_v(h_w + X_c L_v) + (q_t)(L_L) \quad (36)$$

Entonces, despejando  $X_c$

$$X_c = X_{gen} - \frac{(q_t)(L_L)}{w_v L_v} \quad (37)$$

Como se observa en la ecuación anterior, la calidad del vapor en cabeza de pozo está directamente relacionada con las pérdidas de calor en la línea de superficie. En los casos donde las pérdidas de calor sean altas, podría emplearse un aislante térmico para reducir dichas pérdidas y permitir que la calidad del vapor sea adecuada para que el proceso tenga un buen desempeño.

## **5. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR CRÍTICO Y ESPESOR ÓPTIMO DE AISLAMIENTO TÉRMICO**

En los procesos de inyección de vapor es fundamental realizar la administración de la energía inyectada como vapor al yacimiento; anualmente se invierten millones de dólares para generar vapor en este tipo de proyectos, ocasionando un aumento en los costos de producción de hidrocarburos. A medida que transcurre el proceso de inyección de vapor, se requiere inyectar mayor cantidad del fluido caliente para mantener la tasa producción y la calidad del vapor. El aumento en el consumo de energía se puede presentar debido a que en el transporte del vapor de agua, a través de una tubería, se originan pérdidas de calor causando una caída en la temperatura del vapor y disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Por lo anterior, para mejorar las condiciones del proceso de recobro y reducir los costos, se debe procurar alcanzar la máxima eficiencia del proceso de inyección de vapor usando la energía racionalmente. La disminución del consumo de energía se puede lograr reduciendo las pérdidas de calor a través de las paredes de la tubería, mediante el recubrimiento de la tubería con un material de menor conductividad, denominado aislante térmico. Aunque, se desconoce el tipo y la cantidad de aislante que debe emplearse; esto puede resolverse teniendo en cuenta ciertos criterios como el radio crítico y radio óptimo del aislante brindando una solución técnica a los problemas de pérdidas de energía y una reducción de costos de generación de vapor de un determinado proyecto.

### **5.1. RADIO CRÍTICO DEL AISLANTE TÉRMICO**

El recubrimiento de una superficie plana con material aislante, disminuye la transferencia de calor. Adicionalmente, entre más grueso es el aislante más baja

es la velocidad de transferencia de calor, debido a que el área de la pared es constante y al aislarla aumenta la resistencia térmica sin aumentar la resistencia de la convección. Sin embargo, al recubrir una tubería con aislante térmico, el aislamiento adicional incrementa la resistencia a la conducción de la capa del aislamiento, pero disminuye la resistencia a la convección de la superficie debido al incremento en el área exterior. La transferencia de calor de la tubería puede aumentar o disminuir, dependiendo de cuál sea el efecto que domine.

El radio crítico del aislamiento en tuberías se define como el radio en el cual se presentarán las mayores pérdidas de calor por unidad de longitud y debe ser calculado para determinar si es posible o no la instalación de aislamiento en tuberías.

### 5.1.1. Determinación del radio crítico de aislante

Si se considera una tubería de radio  $r$ , cuya temperatura de la superficie exterior, es  $T$ , la cual se mantiene constante. Ahora se aísla la tubería con un material cuya conductividad térmica es  $k$  y se radio exterior es  $r_2$ . Se pierde calor de la tubería hacia el medio circundante que está a la temperatura  $T$ , con coeficiencia de transferencia de calor  $h$  por convección. La velocidad de la transferencia de calor del tubo aislado hacia el aire circundante se puede expresar como

$$q = \frac{T_1 - T_\infty}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} + \frac{1}{h(2\pi r_2 L)}} \quad (38)$$

Para calcular el radio crítico que proporciona el máximo valor de  $q$ , se impone que la primera derivada  $(\frac{\partial q}{\partial r_2})$  sea nula.

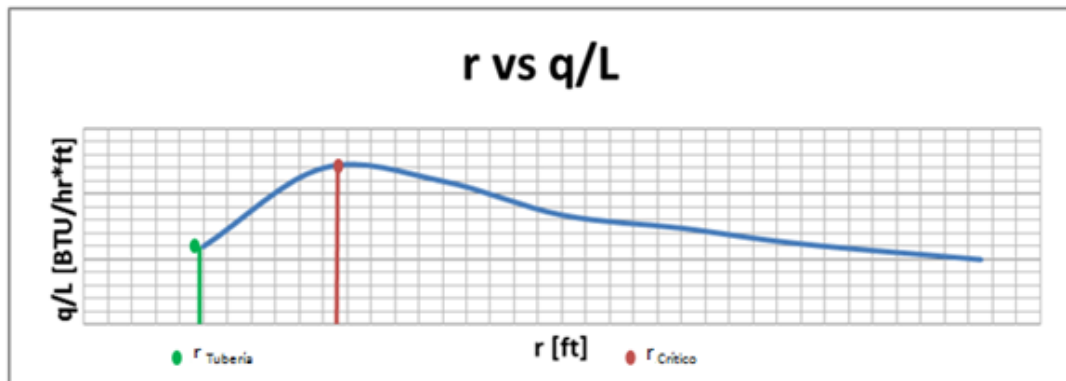
$$\left. \frac{\partial q}{\partial r} \right|_{r_c} = \frac{-(T-T_\infty) \left( \frac{-1}{hr_2^2} + \frac{1}{kr_2} \right)}{\frac{1}{2\pi hr_2 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k}} \quad (39)$$

Al despejar  $r_2$  se obtiene que el radio crítico de aislamiento térmico es:

$$r_{crit} = \frac{k}{h} \quad (40)$$

Donde el radio crítico depende directamente de la relación entre el coeficiente de conductividad térmica del material  $k$  y el coeficiente de convección del aire  $h$  al cual esta expuesta la tubería de conducción del fluido, en este caso vapor. A esta magnitud adimensional  $\frac{h}{k}$  se conoce como número de Biot. Para  $\frac{h}{k} < 1$ , que implica, la adición de aislamiento en tuberías de pequeño diámetro incrementa la cantidad de calor transferida al exterior (Figura 22). Para  $\frac{h}{k} > 1$ , que implica el aislamiento adicional a tuberías de gran diámetro, hará disminuir la transferencia de calor, lo que implica un mejor aislamiento<sup>51</sup> (Figura 23).

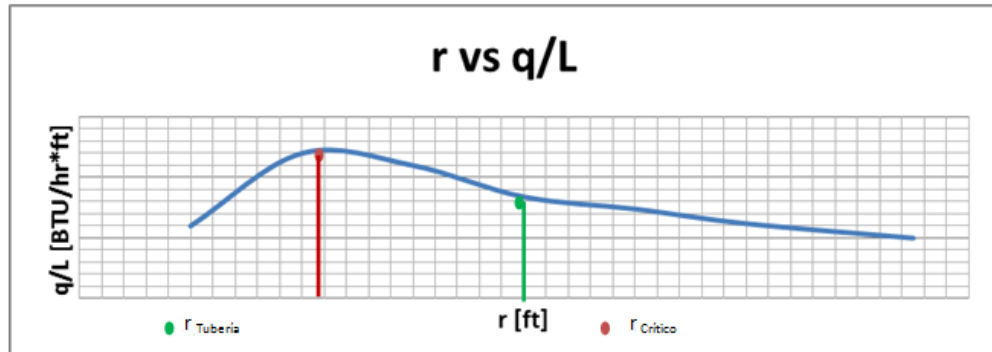
**Figura 22.** Comportamiento para  $r_{crit} < 1$ .



Fuente: ACEVEDO, JHON. Determinación Del Espesor Óptimo De Aislante Para Tuberías Que Conducen Vapor. Grupo de Recobro Mejorado. 2009

<sup>51</sup> GUALICHICO, FREDDY. "Diseño de Sólidos de Revolución mediante el método de elementos finitos". Trabajo de Grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2010, p. 75.

Figura 23. Comportamiento para  $r_{crit} > 1$ .



Fuente: ACEVEDO, JHON. Determinación Del Espesor Óptimo De Aislante Para Tuberías Que Conducen Vapor. Grupo de Recobro Mejorado. 2009

## 5.2. MÉTODO ASTM C680 PARA CALCULAR ESPESOR RECOMENDADO

La ley elemental del flujo de energía define que: el movimiento de energía estacionaria a través de un medio es directamente proporcional a la fuerza motriz que causa el flujo e inversamente proporcional a la resistencia.

Teniendo en cuenta que:

- El calor es una forma de energía en movimiento.
- La fuerza que ocasiona el flujo es la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos.
- La resistencia es la oposición que ofrece cualquier material al transporte de energía de un cuerpo a otro o entre dos puntos de un mismo cuerpo.

Matemáticamente y en forma simple lo anterior se puede representar como:

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (41)$$

El calor es transferido de un cuerpo a otro por radiación, convección y conducción. Las bases matemáticas de la transferencia de calor fueron estudiadas por Stefan-Boltzmann, Langmuir y Charles Fourier, mencionados anteriormente.

Una simplificación de las complejas ecuaciones de estos tres sistemas, para sistemas estacionarios aplicables a la mayoría de situaciones reales presentadas en los cálculos de transferencia de calor para los equipos y tuberías con y sin aislamiento térmico, son presentadas en “Handbook of Thermal Insulation Design Economics for Pipes and Equipment”<sup>52</sup>, para el cálculo de pérdidas o ganancia de calor, las cuales se relacionan a continuación para el sistema de unidades inglés y por unidad de área:

### 5.2.1. Estimación del Calor perdido

Para hallar el calor perdido total, es necesario calcular el calor perdido por cada mecanismo de transferencia de calor.

Por radiación:

$$q_{rad} = 0,174\varepsilon \left[ \left( \frac{T_s + 459,6}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{amb} + 459,6}{100} \right)^4 \right] \quad (42)$$

Por convección teniendo en cuenta el movimiento exterior del aire

$$q_{conv} = 0,296(T_s - T_{amb})^{5/4} \sqrt{\frac{V + 68,9}{68,9}} \quad (43)$$

Por conducción en superficies cilíndricas

---

<sup>52</sup> TURNEY., MALLOY., “Handbook of Thermal Insulation Design Economics for Pipes and Equipment”

$$q_{cond} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{K}} \quad (44)$$

### 5.2.2. Cálculo del Espesor Recomendado

Para determinar las pérdidas de calor, el espesor recomendado termodinámicamente y la temperatura superficial, se procede de siguiente forma:

Se calcula la temperatura media

$$T_m = \frac{T_p + T_{amb}}{2} \quad (45)$$

Donde

$T_m$  Temperatura media, °F

$T_p$  Temperatura de operación, °F

Se calcula la conductividad promedio ( $K_m$ ) del material aislante mediante la siguiente expresión, la cual aplica para todos los materiales de la base de datos ya que tienen conductividades similares

$$K_m = 4,986 * 10^{-7} T_m^2 + 0,0003048 T_m + 0,28 \quad (46)$$

Luego, se calcula la resistencia térmica

$$D_1 = \frac{D}{12} \quad (47)$$

Donde

$D_1$  Diámetro externo de la tubería, *pie*

$D$  Diámetro externo de la tubería, *pulg*

$$R_z = 0,270 \left( \frac{T_p - T_{amb}}{D_1} \right)^{0,25} + 1,54 * 10^{-9} [(T_p + 459,6) + (T_{amb} + 459,6)] [(T_p + 459,6)^2 + (T_{amb} + 459,6)^2] \quad (48)$$

Se calcula el factor  $F$  dependiendo de la temperatura de operación

$$T_p < 150 \text{ } ^\circ F \text{ entonces } F = 8$$

$$150 \text{ } ^\circ F < T_p < 500 \text{ } ^\circ F \text{ entonces}$$

$$F = \frac{1}{\tan \left[ -1,02 * 10^{-4} (T_p)^2 + 1,2225 * 10^{-1} (T_p) - \frac{9,06\pi}{180} \right]} \quad (49)$$

$$T_p > 500 \text{ } ^\circ F \text{ entonces}$$

$$F = -\frac{T_p}{300} + \frac{11}{3} \quad (50)$$

Con este factor calculado, se puede determinar el espesor recomendado de la siguiente forma:

$$F_A = \frac{F}{100} \quad (51)$$

$$F_1 = \frac{K_m}{(R_z * F_A * 12)} \quad (52)$$

$$R_A = \frac{2e + D}{24} \quad (53)$$

$$R_L = R_A \ln \left( \frac{2R_A}{D} \right) \quad (54)$$

El espesor recomendado resulta de hacer la siguiente iteración,  $(R_L - F_1) \geq 0$ , haciendo variar el espesor desde  $e = 0$  en incrementos de 0,5.

### 5.2.3. Cálculo de la Temperatura Superficial

La determinación de la temperatura superficial  $T_s$  se realiza de la siguiente forma, primero se determina el calor total que sale de la superficie:

$$Q_1 = 0,174\varepsilon \left[ \left( \frac{T_s + 459,6}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{amb} + 459,6}{100} \right)^4 \right] + 0,296(T_s - T_{amb})^{5/4} \sqrt{\frac{V + 68,9}{68,9}} \quad (55)$$

Luego se calcula  $Q_2$

$$Q_2 = \frac{(T_p - T_s)}{\frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{K_m} + R} \quad (56)$$

Dónde

$r_1$  Radio interior de la tubería, *pie*

$r_2$  Radio exterior del aislamiento, *pie*

$R$  Resistencia al flujo de calor,  $R = 0,68 \frac{hr * pie^2 * ^\circ F}{BTU}$

Al tener  $Q_1$  y  $Q_2$  se deben igualar la ecuaciones y poner  $T_s$  a iterar en forma ascendente desde  $T_{amb}$  hasta que  $Q_1 \cong Q_2$  ó  $|Q_1 - Q_2| - 0,01 \leq 0$ , donde 0,01 es un valor de tolerancia. Cuando se encuentra esta temperatura se puede determinar  $Q_2$  que es el calor disipado con el aislamiento.

$$Q_2 = \frac{(T_p - T_s)}{\frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{K_m} + R} \quad (57)$$

Para el valor de las pérdidas sin aislamiento, se debe tomar en la ecuación de  $Q_2$  a  $r_2 = 0$ .

En este punto se han determinado las pérdidas por área, en este caso por pie cuadrado por lo cual se hace necesario multiplicar este valor por un factor “A” que es el perímetro de la tubería para expresar las pérdidas por unidad de longitud

$$A = \frac{\pi r_2}{6} = \frac{\pi \left(\frac{D}{2} + e\right)}{6} \quad (58)$$

Donde

$e$  Espesor del aislante

$$Q_2 \left[ \frac{BTU}{hr.ft^2} \right] * A[ft] = Q_2 \left[ \frac{BTU}{hr.ft} \right] \quad (59)$$

### 5.3. ESPESOR ÓPTIMO DE AISLANTE TÉRMICO

Al aumentar el espesor del aislamiento se reducen las pérdidas de calor y de esta forma disminuyen los costos de operación. Sin embargo, los costos del aislamiento aumentan con el espesor de forma que existirá un espesor óptimo a partir del cual un aumento del mismo no ahorrará el calor suficiente para compensar su costo adicional. Este concepto considera la inversión necesaria para implementar el aislante y el costo de la energía perdida en todo el período de vida útil. Por lo tanto, este espesor será el que minimice el costo total del ciclo de vida del aislamiento (Figura 24).

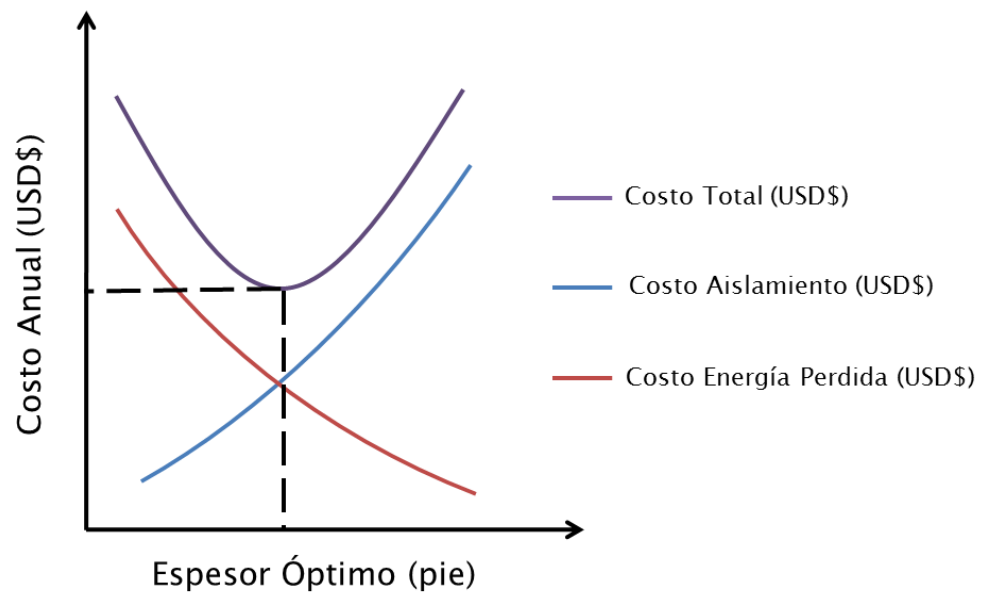
#### 5.3.1. Variables involucradas en la determinación del espesor óptimo del aislante.

Al estimar el espesor óptimo del aislante se presentan diversas variables externas, producto de las características técnicas, geográficas o económicas del área o región donde se desee aplicar el proyecto<sup>53</sup>.

---

<sup>53</sup> ACEVEDO, JHON. Determinación del Espesor Óptimo de Aislante para Tuberías que Conducen Vapor. Grupo de Recobro Mejorado. 2009.

**Figura 24.** Espesor óptimo de aislamiento



### 5.3.1.1. El costo del aislante en función de su conductividad y espesor

Cuando aumenta el espesor del aislante térmico y disminuye la conductividad de este, el precio del aislante tiende a aumentar considerablemente. Estas características se deben tener en cuenta a la hora de elegir los posibles aislantes candidatos a usarse en el proceso.

### 5.3.1.2. El costo del vapor generado en función del tiempo

El precio del vapor generado, varía de acuerdo al país o región donde se realice el aislamiento, y depende de otros parámetros como el tamaño de los generadores y la dificultad del acceso al terreno donde se realice el proyecto.

### 5.3.1.3. El número de años de funcionamiento del aislante

Es la cantidad de tiempo para la cual se calcula la vida del proyecto a realizar, y generalmente se expresa en años.

### 5.3.1.4. El costo del mantenimiento del aislante

El valor del mantenimiento del aislante, es un valor agregado a los costos de inversión durante la vida del proyecto.

## 5.3.2. Relación de inversión-Ahorro

El método más utilizado para describir la relación de inversión en relación con el ahorro de las pérdidas, es el que considera el Valor Presente Neto (VPN). Se determina, para cada inversión en aislamiento, el VPN de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que suponen la inversión<sup>54</sup>. Para determinar el VPN, se denomina el coeficiente *VPN*, o coeficiente multiplicador que actualiza los ahorros en el periodo total que se considere<sup>55</sup>.

$$VPN = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1} \quad (60)$$

Donde

$$t = \frac{1 + (0,01 * b)}{1 + (0,02 * r)} \quad (61)$$

---

<sup>54</sup> INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA. Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. Guía Técnica. Ministerio de Industria y Comercio. España, 2007, p. 25.

<sup>55</sup> ACEVEDO, Jhon. Determinación del Espesor Óptimo de Aislante para Tuberías que Conducen Vapor. Grupo de Recobro Mejorado. 2009.

$b$  = Aumento previsible del costo de la energía en porcentaje %

$r$  = Tasa de actualización neta en porcentaje %.

$n$  = Número de años para los que se efectúa el estudio.

Para un proyecto determinado, a cada espesor de aislamiento térmico " $e_i$ " le corresponderán unas pérdidas energéticas específicas y un costo de inversión asociado. A medida que aumenta el espesor, disminuyen las pérdidas, así que si consideramos dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas tendrá un valor económico que se actualiza por medio del coeficiente  $VPN$  para el periodo considerado. Y al mismo tiempo existirá una diferencia de inversión de aislamiento.

Esto permite plantear la comparación:

$$[\text{Incremento de ahorro}] * VPN \leq \text{ó} \geq [\text{Incremento de la inversión}] \quad (62)$$

Donde

$$\begin{aligned} \text{Incremento de ahorro} &= \text{Valor de las pérdidas económicas para "e}_i\text{"} - \\ &\text{Valor de las pérdidas económicas para "e}_{i+1}\text{"} \end{aligned} \quad (63)$$

$$\text{Incremento de la inversión} = \text{Inversión para "e}_{i+1}\text{"} - \text{Inversión para "e}_i\text{"} \quad (64)$$

Si el resultado obtenido de la inecuación 43 es que el primer término es superior al segundo, indica que el incremento de ahorro es mayor que la inversión necesaria para obtenerlo. Por el contrario, si la inecuación indica que el incremento del ahorro obtenido requiere una inversión superior (primer término menor que el segundo) esta inversión no es rentable y debe disminuirse, es decir reducir el espesor de aislamiento. De aquí se deduce que el espesor óptimo de aislamiento

es precisamente cuando el incremento del ahorro es igual al incremento de la inversión.

### 5.3.3. Determinación del Espesor Óptimo de Aislante Térmico

El procedimiento práctico para determinar el espesor óptimo del aislante para cualquier tubería que transporte vapor en su interior, se realiza de la siguiente manera<sup>56</sup>

1. Determinar los distintos espesores “e” del aislante seleccionado.
2. Determinar las pérdidas de calor de la tubería por unidad de superficie, a través de la ecuación de transferencia de calor total.
3. Determinar el costo de las pérdidas de calor dado en  $\frac{US\$}{pie \cdot año}$

$$costo\ pérdidas = q * E * Z \quad (65)$$

Donde

$$q = \text{pérdidas de calor, } \frac{BTU}{hr \cdot pie}$$

$$E = \text{precio de la energía, } \frac{US\$}{MBTU}$$

$$Z = \text{tiempo de funcionamiento, } \frac{hr}{año}$$

4. Determinar el valor actualizado de las pérdidas para todo el periodo dado en  $\frac{US\$}{pie}$

$$valor\ actualizado = costo\ pérdidas * VPN \quad (66)$$

---

<sup>56</sup> ACEVEDO, JHON. Determinación Del Espesor Óptimo De Aislante Para Tuberías Que Conducen Vapor. Grupo de Recobro Mejorado. 2009.

5. Incremento del ahorro entre espesores consecutivos.

$$\text{incremento ahorro} = \text{valor actualizado}|_{e_i} - \text{valor actualizado}|_{e_{i+1}} \quad (67)$$

6. Incremento de inversión del aislamiento entre dos espesores consecutivos dada en  $\frac{US\$}{pie}$ .

$$\text{Inversión}_{i+1} - \text{Inversión}_i \quad (68)$$

7. Establecer la diferencia entre (66) y (67), “el incremento del ahorro menos el incremento de la inversión”.
8. La diferencia entre (66) – (67), se calcula hasta que sea cero “0” o el valor a cero más cercano posible.

#### **5.4. CORRELACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL ESPESOR ECONÓMICO DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS (A. BAHADORI, H. VULTHALURU)**

Cuando se aísla una porción de tubería para lograr el mínimo costo total de aislamiento durante un período específico, el término apropiado para el espesor será espesor económico. El objetivo de este método es encontrar el espesor hasta el cual se justifica el ahorro económico durante un período determinado<sup>57</sup>. Aunque un incremento en la cantidad de aislante aplicado aumente costo, se reducirá la tasa de pérdidas de calor debido al aislamiento. Por esto es necesario reducir los costos totales durante un período determinado.

La correlación es una función del diámetro de la tubería de acero y de la conductividad térmica de aislante para temperaturas superficiales de 212°F, 572°F, 932°F y 1292°F. Para valores intermedios, puede calcularse mediante una

---

<sup>57</sup> BAHADORI, A.; VULTHALURU, B. “A Novel Correlation for Estimation of Economic Thickness of Insulation for Process Piping and Equipments”. SPE 124373. 2009, p. 1 - 7.

simple interpolación. Dicha correlación considera diámetros de tubería hasta de 1,64 ft. El porcentaje de desviación promedio de la correlación propuesta para estimar el espesor económico de aislante es de 2,12%.

La ecuación 70 representa la nueva ecuación en la cual los cuatro coeficientes son usados para correlacionar el espesor óptimo de aislamiento como función del diámetro externo y la conductividad térmica del aislante

$$\ln(\delta) = \alpha + \frac{\beta}{d} + \frac{\gamma}{d^2} + \frac{\theta}{d^3} \dots \quad (70)$$

Donde

$\delta$  Espesor óptimo económico de aislamiento,  $m$

$d$  Diámetro de la tubería de acero,  $m$

Los factores  $\alpha, \beta, \gamma$  y  $\theta$  tienen en cuenta la conductividad térmica del aislante “k” expresada en  $\frac{W}{m \cdot K}$

$$\alpha = A_1 + \frac{B_1}{k} + \frac{C_1}{k^2} + \frac{D_1}{k^3} \dots \quad (71)$$

$$\beta = A_2 + \frac{B_2}{k} + \frac{C_2}{k^2} + \frac{D_2}{k^3} \dots \quad (72)$$

$$\gamma = A_3 + \frac{B_3}{k} + \frac{C_3}{k^2} + \frac{D_3}{k^3} \dots \quad (73)$$

$$\theta = A_4 + \frac{B_4}{k} + \frac{C_4}{k^2} + \frac{D_4}{k^3} \dots \quad (74)$$

Los factores A, B, C y D corresponden según la conductividad térmica “ $\lambda$ ” y están reportados en la Tabla 6. En esta correlación se considera la temperatura ambiente de 68°F.

**Tabla 6.** Coeficientes seleccionados por A. Bahadori y H. Vulthalu, usados en las ecuaciones 71, 72, 73 y 74.

Factor	T = 100°C	T = 300°C	T = 500°C	T = 700°C
<b>A<sub>1</sub></b>	-1,619063838	-1,4673416207	-1,3064287345	-1,5068329304
<b>B<sub>1</sub></b>	-6,0440641629*10 <sup>-2</sup>	-9,4579004057*10 <sup>-3</sup>	3,7689223988*10 <sup>-2</sup>	1,6368010607*10 <sup>-1</sup>
<b>C<sub>1</sub></b>	1,2992412636*10 <sup>-3</sup>	-9,0991682769*10 <sup>-4</sup>	-5,7653162538*10 <sup>-3</sup>	-1,9272634157*10 <sup>-2</sup>
<b>D<sub>1</sub></b>	-1,0480516067*10 <sup>-5</sup>	2,1036093111*10 <sup>-5</sup>	1,5920740612*10 <sup>-4</sup>	6,081932874*10 <sup>-4</sup>
<b>A<sub>2</sub></b>	-5,675424778*10 <sup>-2</sup>	5,6420129717*10 <sup>-3</sup>	2,3856855469*10 <sup>-2</sup>	2,1494907991*10 <sup>-1</sup>
<b>B<sub>2</sub></b>	1,1266206576*10 <sup>-3</sup>	-8,1324216389*10 <sup>-3</sup>	-1,7666292295*10 <sup>-2</sup>	-7,236908659*10 <sup>-2</sup>
<b>C<sub>2</sub></b>	-4,5476251244*10 <sup>-5</sup>	3,6013086233*10 <sup>-4</sup>	1,2527015231*10 <sup>-3</sup>	6,2521396767*10 <sup>-3</sup>
<b>D<sub>2</sub></b>	5,4011484658*10 <sup>-7</sup>	-5,0991959691*10 <sup>-6</sup>	-2,9095395202*10 <sup>-5</sup>	-1,7702985302*10 <sup>-4</sup>
<b>A<sub>3</sub></b>	1,287145175*10 <sup>-3</sup>	-1,0914548287*10 <sup>-3</sup>	-2,2442814135*10 <sup>-3</sup>	-1,2571952312*10 <sup>-2</sup>
<b>B<sub>3</sub></b>	-3,1321987972*10 <sup>-5</sup>	3,1336503528*10 <sup>-4</sup>	7,879778678*10 <sup>-4</sup>	3,6872340957*10 <sup>-3</sup>
<b>C<sub>3</sub></b>	1,3585299744*10 <sup>-6</sup>	-1,3704000608*10 <sup>-5</sup>	-5,6411819564*10 <sup>-5</sup>	-3,1830356934*10 <sup>-4</sup>
<b>D<sub>3</sub></b>	-1,6951529528*10 <sup>-8</sup>	1,9239332368*10 <sup>-7</sup>	1,3264010427*10 <sup>-6</sup>	9,0141402462*10 <sup>-6</sup>
<b>A<sub>4</sub></b>	-1,1238180847*10 <sup>-5</sup>	1,4969229576*10 <sup>-5</sup>	3,3668468005*10 <sup>-5</sup>	1,4981731667*10 <sup>-4</sup>
<b>B<sub>4</sub></b>	3,574027836*10 <sup>-7</sup>	-3,3674152566*10 <sup>-6</sup>	-9,9103300792*10 <sup>-6</sup>	-4,2562432156*10 <sup>-5</sup>
<b>C<sub>4</sub></b>	-1,5140460085*10 <sup>-8</sup>	1,4658761606*10 <sup>-7</sup>	7,1509244179*10 <sup>-7</sup>	3,6706099161*10 <sup>-6</sup>
<b>D<sub>4</sub></b>	1,8649575376*10 <sup>-10</sup>	-2,0517177043*10 <sup>-9</sup>	-1,6973934089*10 <sup>-8</sup>	-1,0392224103*10 <sup>-7</sup>

Fuente: BAHADORI, A.; VULTHALURU, B. "A Novel Correlation for Estimation of Economic Thickness of Insulation for Process Piping and Equipments". SPE 124373. 2009.

Los coeficientes han sido ajustados a partir de la siguiente metodología:

1. Seleccionar un tipo de aislamiento de la información reportada por A. Bahadori y H. B. Vulthalu.
2. Correlacionar el espesor óptimo económico de aislante " $\delta$ " como función de " $1/d$ " para la conductividad térmica del aislante seleccionado ( $k$ ).
3. Repetir el paso 2 para la información acerca de otros materiales aislantes y su conductividad térmica.

4. Correlacionar los correspondientes coeficientes polinomiales, los cuales son obtenidos a diferentes conductividades térmicas.
5. Calcular  $\alpha, \beta, \gamma$  y  $\theta$  con las ecuaciones 71, 72, 73 y 74.
6. Calcular el espesor óptimo económico de aislamiento “ $\delta$ ” como función “ $1/d$ ” con la ecuación 70.
7. Estos resultados pueden ser extendidos para un amplio rango de temperatura de superficie con una simple interpolación o extrapolación.

### 5.5. AHORRO APARENTE EN FUNCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR

La implementación de materiales aislantes además mejorar la eficiencia del proyecto, también favorece su economía. Esto se puede deducir, al realizar una comparación entre dos escenarios teóricos; el primero de éstos que considera la tubería sin aislamiento y el segundo escenario que considera la tubería aislada. Entonces, se procede a determinar el ahorro aparente en función de las pérdidas de calor, el cual evalúa la diferencia entre el costo de las pérdidas de energía para cada escenario.

La energía disipada en la tubería desnuda se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$E_d = Q_d * L_L * \text{Tiempo funcionamiento} \quad (75)$$

Donde

$E_d$  = Energía disipada al transportar vapor en tubería desnuda,  $\frac{BTU}{año}$

$Q_d$  = Pérdidas de calor en tubería desnuda,  $\frac{BTU}{hr * pie}$

Y el tiempo de funcionamiento se encuentra en  $\frac{hr}{año}$

Análogamente, se calcula la energía perdida con la tubería aislada:

$$E_a = Q_a * L_L * \textit{T tiempo funcionamiento} \quad (76)$$

Donde

$$E_a = \text{Energía disipada al transportar vapor en tubería aislada, } \frac{BTU}{\text{año}}$$

Asimismo, los costos de la generación de energía para ambos escenarios se determinan al multiplicar la energía disipada por el precio de la energía. Este valor es propio para cada proyecto, ya que depende entre otras cosas de la disponibilidad de recursos del campo.

$$\textit{Costo}_d = E_d * \textit{Precio Energía} \quad (77)$$

Donde

$$\textit{Costo}_d = \text{Costo de generación del vapor para transporte en tubería desnuda, } \frac{US\$}{\text{año}}$$

El precio de la energía se encuentra en  $\frac{US\$}{MMBTU}$

$$\textit{Costo}_a = E_a * \textit{Precio Energía} \quad (78)$$

Donde

$$\textit{Costo}_a = \text{Costo de generación del vapor para transporte en tubería aislada, } \frac{US\$}{\text{año}}$$

Entonces, el ahorro aparente será la diferencia entre los costos de generación para transporte de vapor en tubería desnuda y tubería aislada

$$Ahorro = Costo_d - Costo_a \quad (79)$$

## 5.6. COSTO TOTAL DEL PROYECTO

El costo total del proyecto de implementación de aislamiento térmico depende del valor del aislante a utilizar más el valor del material que lo protege, siendo este último un factor importante en el costo total, generalmente estos recubrimientos tienen un valor mayor al valor del aislante y sus dimensiones dependen del espesor seleccionado.

Para la determinación del costo del aislamiento se tiene en cuenta el área superficial de la tubería que se recubrirá con el material aislante, por medio de la siguiente expresión:

$$A_{TD} = \frac{\pi D}{12} * L_L \quad (80)$$

Donde

$A_{TD}$  = Área superficial de la tubería,  $pie^2$

En este punto se toma en cuenta un factor de seguridad del 10% extra para posibles eventualidades que se puedan presentar:

$$A_{TF} = 1,1 * A_{TD} \quad (81)$$

Donde

$A_{TF}$  = Área de la tubería con el factor de seguridad,  $pie^2$

Una vez determinada el área de tubería, se procede a calcular el costo del aislamiento, multiplicando dicha área por el precio del material según las dimensiones del espesor óptimo calculado anteriormente,

$$Costo_{Ais} = A_{TF} * Precio_{Ais} \quad (82)$$

Donde

$Costo_{Ais}$  Costo del material aislante a utilizar en el proyecto,  $US\$$

$Precio_{Ais}$  Valor del aislante para el espesor óptimo,  $US\$/pie^2$

Análogamente, se calcula el costo del material protector por medio de expresiones similares a las utilizadas en la determinación del costo del aislamiento.

$$A_{TA} = \frac{\pi(\frac{D}{2}+e)}{6} * L_L \quad (83)$$

$$A_{AF} = 1,1 * A_{TA} \quad (84)$$

$$Costo_{Jack} = A_{AF} * Precio_{jack} \quad (85)$$

Donde

$A_{TA}$  Área superficial de la tubería aislada,  $ft^2$

$A_{AF}$  Área de la tubería aislada con el factor de seguridad,  $ft^2$

$Costo_{Jack}$  Costo total del material que recubre el aislante,  $US\$$ .

$Precio_{jack}$  Precio del material protector seleccionado,  $USD/ft^2$

Finalmente se calcula el costo total del proyecto evaluado por medio de la siguiente expresión:

$$Costo_{Total} = Costo_{Ais} + Costo_{Jack} \quad (86)$$

## 5.7. CÁLCULO DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

Hoy en día las compañías tienen un notable interés en mantener y/o mejorar la calidad del medio ambiente. Por esto, otro beneficio que brindan los materiales aislantes es la disminución de las emisiones al medio ambiente. La metodología empleada para el cálculo de emisiones es la siguiente:

Se realiza la diferencia de pérdidas de calor entre el escenario con tubería desnuda y el escenario con tubería aislada.

$$Q_d - Q_a \quad (87)$$

Luego se calcula la energía disipada:

$$Energía = (Q_d - Q_a) * A * Horas\ de\ Trabajo * \frac{1Gcal}{3968320\ BTU} \quad (88)$$

Existe un factor de conversión para determinar los  $kgCO_2$  por combustible. Para los combustibles que se encuentran en la base de datos de OPTHICK, los factores de emisión de CO<sub>2</sub>: en  $kgCO_2/GCal$  combustible se muestran en la Tabla 7.

Entonces

$$KgCO_2 = Energía * Factor\ de\ conversión \quad (89)$$

Este resultado se presenta en toneladasCO<sub>2</sub>/año e indica las toneladas que se dejan de emitir a la atmósfera por el uso del aislamiento térmico.

**Tabla 7.** Factor de Conversión KgCO<sub>2</sub>/Gcal

<b>Combustible</b>	<b>KgCO<sub>2</sub>/Gcal</b>
<b>ACPM</b>	266
<b>KEROSENE</b>	266
<b>CRUDO</b>	291
<b>FUEL OIL</b>	266
<b>GAS PROPANO</b>	200
<b>CARBON</b>	367
<b>GAS NATURAL</b>	200
<b>ENERGIA ELECTRICA</b>	0

Fuente: Combusem, Software para Simulación de Emisiones de Combustión.

## 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan las consideraciones tomadas en cuenta para el diseño de la herramienta computacional *OPTHICK*, así como los casos de estudio desarrollados para la evaluación del software creado y el análisis de los resultados obtenidos con la aplicación.

### 6.1. CONSIDERACIONES HERRAMIENTA COMPUTACIONAL OPTHICK

Para el desarrollo de la herramienta *OPTHICK* se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El sistema es isobárico e isotérmico.
- El sistema es diseñado en estado estable por lo cual las pérdidas por fricción generadas en el estado transitorio son despreciables.
- La presión de salida del generador se mantiene constante en todo el sistema.
- Se asume que no existen reducciones en el diámetro de la tubería.
- Se asume una instalación adecuada del material aislante.
- Los loops de expansión están considerados dentro de la longitud de tubería a evaluar.
- Las tuberías empleadas para el transporte de vapor en superficie poseen un radio mayor al radio crítico de aislamiento.

### 6.2. CASO TEÓRICO

El primer caso de evaluación corresponde a un escenario teórico y todos los datos utilizados en él, pertenecen a los rangos de operación comunes que se pueden presentar en un proceso de esta índole.

Para este caso, se necesita evaluar la viabilidad de la implementación de aislante térmico en tuberías para transporte de vapor, con longitud de 2000 pies y diámetro de seis pulgadas en un campo colombiano de crudo pesado, donde se planea llevar a cabo un proceso de inyección continua de vapor por un tiempo estimado de diez años utilizando un equipo generador de vapor que usa como combustible gas natural y tiene una calidad de vapor a la salida del 80%. La Tabla 8 muestra las variables de entrada.

**Tabla 8.** Datos Caso de Aplicación

DATOS DE ENTRADA	VALOR	UNIDAD
<b>Diámetro de Tubería</b>	6	Pulgadas
<b>Presión Salida Generador</b>	800	PSI
<b>Temperatura Ambiente</b>	80	°F
<b>Emisividad</b>	0,3	Adimensional
<b>Velocidad del Viento</b>	0	Ft/seg
<b>Longitud de Tubería</b>	2000	Ft
<b>Horizonte Económico</b>	10	Años
<b>Tiempo de Funcionamiento</b>	8400	Horas/Año
<b>Precio de la Energía</b>	3	USD/MMBTU
<b>Tasa de Inflación Anual</b>	3	%
<b>Tasa Alimentación Generador</b>	1750	Gal H <sub>2</sub> O/hr
<b>Calidad Salida del Generador</b>	0,8	Fracción
<b>Dólar TRM</b>	1830	Pesos

### 6.2.1. Resultados OPTHICK

Una vez ingresados los datos de entrada en la herramienta computacional *OPTHICK* y seleccionados los aislantes que se pueden aplicar al proyecto se procede a ejecutar la herramienta. Los aislantes disponibles para este caso son:

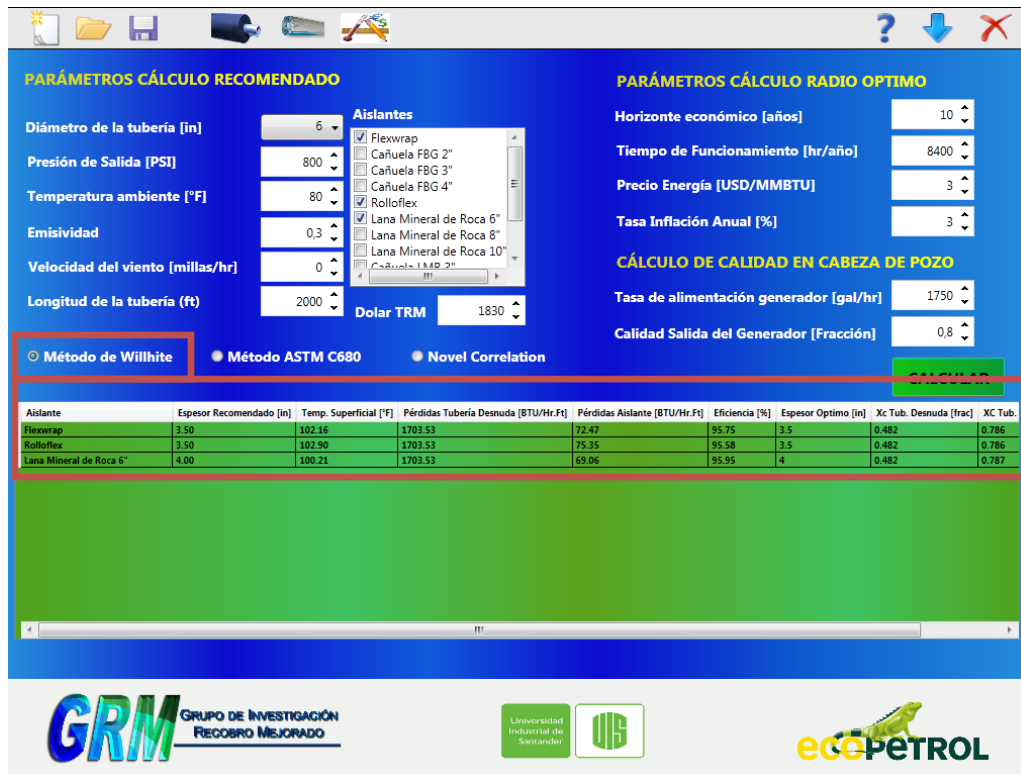
- ✓ Flexwrap
- ✓ Rolloflex
- ✓ Lana Mineral de Roca

A continuación en la Figura 25, Figura 26 y Figura 27 se presentan los resultados para cada uno de los métodos de evaluación y en la Tabla 9 se presenta un resumen de los tres métodos.

### 6.2.1.1. Método de Willhite

Este método es sencillo y preciso, la diferencia con el método ASTM C680 radica en la conductividad térmica del aislante, ya que este método funciona con la conductividad promedio del material aislante.

Figura 25. Resultados Método de Willhite



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

### 6.2.1.2. Método ASTM C680

Este método a diferencia del método de Willhite determina la conductividad promedio del material aislante a la temperatura de operación por medio de una expresión matemática. Sin embargo, como se puede apreciar en los resultados mostrados en la Figura 26, las variaciones entre un método y el otro son mínimas y por lo tanto ambos procesos son válidos para la determinación de las pérdidas de calor y los cálculos siguientes.

Figura 26. Resultados Método ASTM C680

**PARÁMETROS CÁLCULO RECOMENDADO**

Diámetro de la tubería [in]: 6  
 Presión de Salida [PSI]: 800  
 Temperatura ambiente [°F]: 80  
 Emisividad: 0.3  
 Velocidad del viento [millas/hr]: 0  
 Longitud de la tubería (ft): 2000

**Aislantes**

- Flexwrap
- Cañuela FBG 2"
- Cañuela FBG 3"
- Cañuela FBG 4"
- Rolloflex
- Lana Mineral de Roca 6"
- Lana Mineral de Roca 8"
- Lana Mineral de Roca 10"
- Cañuela LMP 2"

Dolar TRM: 1830

**PARÁMETROS CÁLCULO RADIO OPTIMO**

Horizonte económico [años]: 10  
 Tiempo de Funcionamiento [hr/año]: 8400  
 Precio Energía [USD/MMBTU]: 3  
 Tasa Inflación Anual [%]: 3

**CÁLCULO DE CALIDAD EN CABEZA DE POZO**

Tasa de alimentación generador [gal/hr]: 1750  
 Calidad Salida del Generador [Fracción]: 0.8

Método de Willhite  Método ASTM C680  Novel Correlation

**CALCULAR**

Aislante	Espesor Recomendado [in]	Temp. Superficial [°F]	Pérdidas Tubería Desnuda [BTU/Hr.Ft]	Pérdidas Aislante [BTU/Hr.Ft]	Eficiencia [%]	Espesor Optimo [in]	Xc Tub. Desnuda [frac]	XC Tub.
Flexwrap	3.5	106.75	1778.37	97.94	94.49	3.5	0.468	0.782
Rolloflex	3.5	106.75	1778.37	97.94	94.49	3.5	0.468	0.782
Lana Mineral de Roca 6"	4	103.58	1778.37	90.51	94.91	4	0.468	0.783

**GRM GRUPO DE INVESTIGACIÓN RECUBRO MEJORADO** | **Universidad Industrial de Santander** | **ecopetrol**

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

### 6.2.1.3. Método Novel Correlation

Este método únicamente proporciona los espesores recomendados y funciona para temperaturas de operación mayores a 212 °F (100°C) y menores a 1292°F (700°C). Este procedimiento se desarrolla por medio de coeficientes numéricos determinados para temperaturas superficiales basadas en una correlación realizada por Bahadori y Vutharulu. Como se puede observar en la Tabla 9 que relaciona los tres métodos, se aprecia que los resultados obtenidos por este método no son muy diferentes de los obtenidos por los otros dos y por lo tanto, esta metodología se convierte en una buena opción cuando la información es muy limitada.

Figura 27. Resultados Método Novel Correlation

The screenshot shows a software interface for insulation calculation. The interface is divided into several sections:

- PARÁMETROS CÁLCULO RECOMENDADO:** Includes input fields for pipe diameter (6 in), outlet pressure (800 PSI), ambient temperature (80 °F), emissivity (0.3), wind velocity (0 mph), and pipe length (2000 ft).
- PARÁMETROS CÁLCULO RADIO OPTIMO:** Includes input fields for economic horizon (10 years), operating time (8400 hr/year), energy price (3 USD/MMBTU), and annual inflation rate (3%).
- CÁLCULO DE CALIDAD EN CABEZA DE POZO:** Includes input fields for generator feed rate (1750 gal/hr) and generator output quality (0.8 fraction).
- Method Selection:** Three radio buttons are present: 'Método de Willhite', 'Método ASTM C680', and 'Novel Correlation' (which is selected).
- Results Table:** A table showing recommended insulation thicknesses for different materials. The table is highlighted with a red box.

Aislante	Esesor Recomendado [in]
Flexwrap	3.80
Rolloflex	3.80
Lana Mineral de Roca 6"	3.80

At the bottom of the interface, there are logos for GRM (Grupo de Investigación Recobro Mejorado), Universidad Industrial de Santander (UIS), and ecOPETROL.

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS

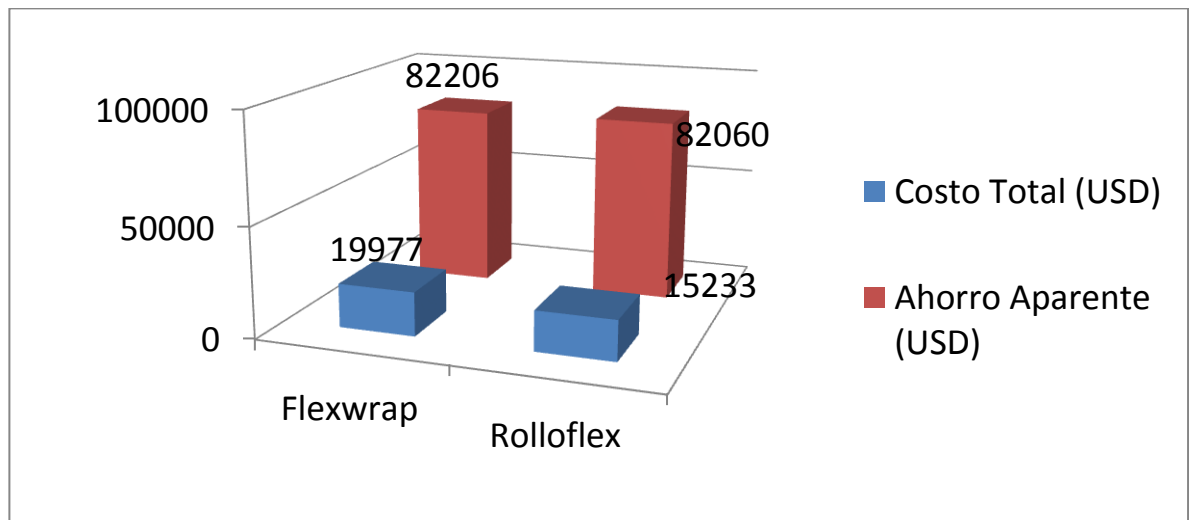
**Tabla 9.** Resumen de Resultados Caso Aplicación

Método	Aislante	Espesor Recomendado [in]	Temp. Superf [°F]	Q Tub. Desnuda [BTU/hr.ft]	Q Tub. Aislada [BTU/hr.ft]	Eficiencia [%]	Espesor Optimo [in]	Calidad Vapor Tub Desnuda [Fracción]	Calidad Vapor Tub Aislada [Fracción]
<b>Willhite</b>	Flexwrap	3,5	102,16	1703,53	72,47	95,75	3,5	0,482	0,786
	Rolloflex	3,5	102,90	1703,53	75,35	95,58	3,5	0,482	0,786
	L.M.R 6"	4	100,21	1703,53	69,06	95,95	4	0,482	0,787
<b>ASTM C680</b>	Flexwrap	3,5	106,75	1778,37	97,94	94,49	3,5	0,468	0,782
	Rolloflex	3,5	106,75	1778,37	97,94	94,49	3,5	0,468	0,782
	L.M.R 6"	4	103,58	1778,37	90,51	94,91	4	0,468	0,782
<b>Novel</b>	Flexwrap	3,86							
	Rolloflex	3,80							
	L.M.R 6"	3,80							

Se puede notar que los métodos de solución funcionan correctamente ya que convergen hacia un mismo valor de temperatura superficial y de pérdidas de calor, lo cual valida el buen funcionamiento de la herramienta OPTHICK. Al mismo tiempo se puede notar que el uso de material aislante contribuye notablemente a mantener la calidad del vapor medida en cabeza de pozo.

Los materiales Flexwrap y Rolloflex comercializados por la compañía Fiberglass S.A. presentan el mismo espesor óptimo; entonces para seleccionar el aislante adecuado para el proyecto, se recurre a calcular la diferencia entre los costos de cada uno de los aislantes y el ahorro aparente que éstos generan. Para este caso, el material Rolloflex, con una inversión menor al otro aislante, produce ahorro aparente similar, por lo cual se selecciona este material para el proyecto (Figura 28).

**Figura 28.** Diferencia Costo Total y Ahorro Aparente para el caso teórico



Los módulos adicionales de la herramienta se analizarán en el caso Campo Teca; este caso teórico también será usado para realizar la validación del software desarrollado con este trabajo, comparando los resultados obtenidos con las herramientas comerciales de las empresas Fiberglass S.A. y Calorcol S.A.

### **6.3. Validación de la herramienta computacional OPTHICK**

El análisis de las pérdidas de calor en superficies calientes es un tema que interesa a muchas empresas, especialmente a aquellas que fabrican y comercializan los aislantes. Esto ha llevado a la investigación y posterior desarrollo de herramientas para evaluar el espesor del aislamiento a partir de la determinación de pérdidas de calor en tuberías y espesor recomendado de aislante térmico.

Es necesario validar la herramienta desarrollada mediante la comparación de resultados con otros programas de cálculo comerciales, desarrollados por empresas colombianas fabricantes y comercializadoras de materiales aislantes como Fiberglass y CALORCOL S.A.

#### **6.4.1. ECOWIN GREEN**

El programa ECOWIN GREEN (Figura 29) es un trabajo especializado el cual utiliza las propiedades de la fibra de vidrio y procesa la información recibida de variables físicas y térmicas de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C680 para la determinación y cálculo de las pérdidas o ganancias de calor en sistemas de aislamiento.

El programa da como resultado:

- El espesor recomendado (Figura 30) para satisfacer el criterio de ahorro de energía hasta un porcentaje aceptable de pérdidas de calor.
- Calcula las pérdidas de calor, la temperatura de la superficie y la eficiencia del aislamiento.
- Proporciona información de los aislamientos Fiberglass Colombia S.A.



## 6.4.2. INSULAN

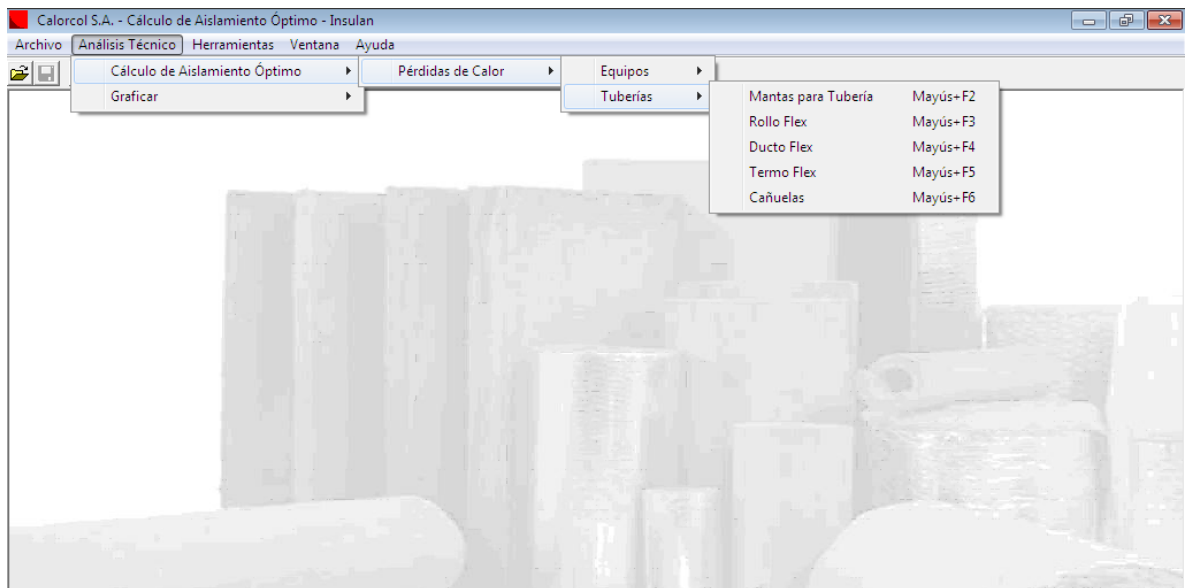
Este programa de cálculo fue desarrollado por la empresa colombiana CALORCOL S.A. (Figura 31) para determinar el espesor óptimo de aislamiento en tuberías, con productos de lana mineral de roca proporcionados por dicha empresa. Este programa recomienda el aislante más adecuado, en términos de costo/beneficio. Este software posee una interfaz amigable con el usuario. Ofrece la opción de calcular el espesor recomendado (Figura 32) y permite graficar Temperatura de superficie vs espesor y Pérdidas de Calor vs Espesor (Figura 33).

Figura 31. INSULAN



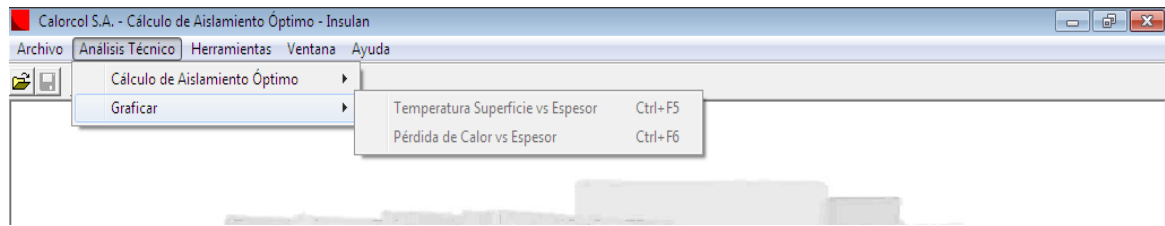
Fuente: INSULAN

Figura 32. Ventana Cálculo Pérdidas de Calor y Espesor Óptimo Insulan



Fuente: INSULAN

**Figura 33.** Opciones gráficas INSULAN



Fuente: INSULAN

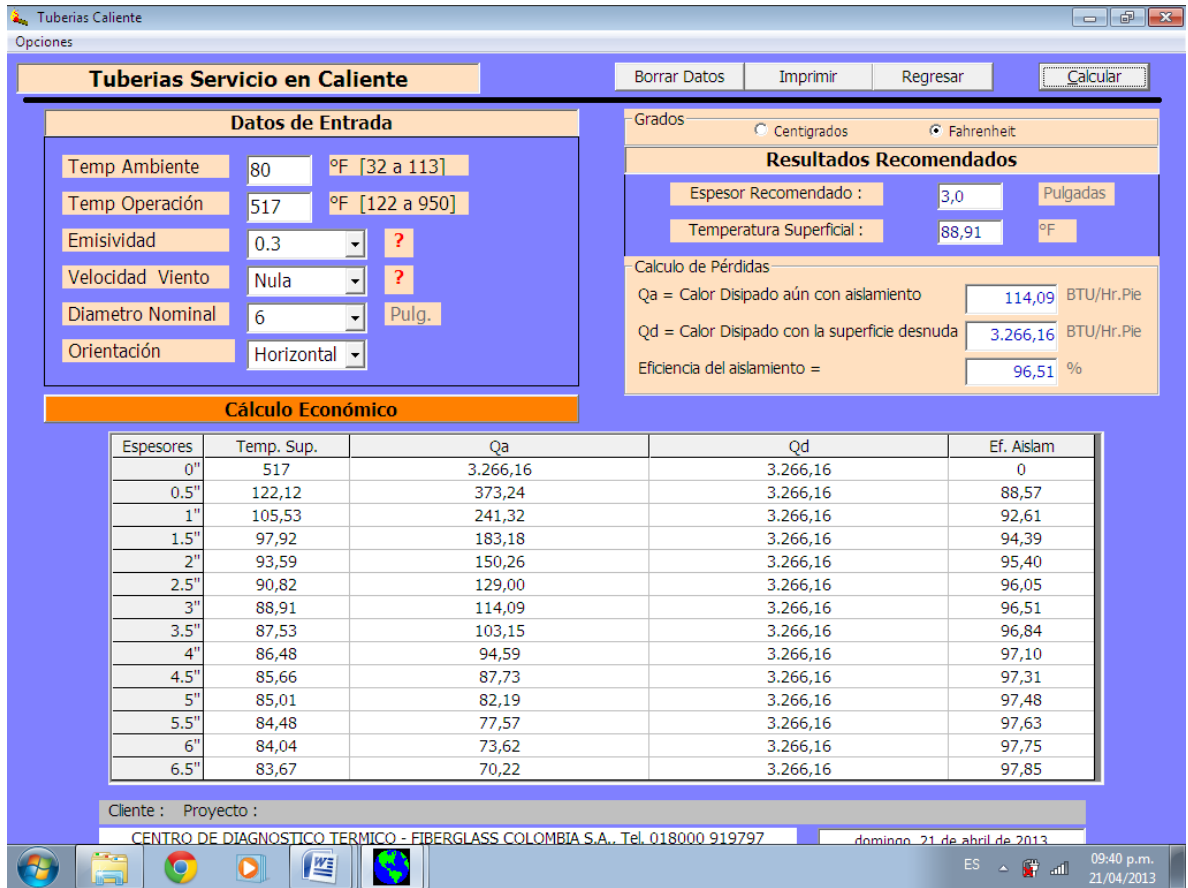
### 6.4.3. Comparación de Resultados

El caso teórico será la base para realizar la discusión y comparación de resultados obtenidos por las herramientas comerciales y los resultados obtenidos para este caso por la herramienta OPTHICK.

El software ECOWIN GREEN sólo realiza cálculos para fibra de vidrio porque es el material comercializado por la empresa Fiberglass Colombia S.A. Por este motivo, los datos de entrada no incluyen selección de aislante (Figura 34). Los resultados recomendados se encuentran en la parte superior derecha. En la parte inferior se encuentra una tabla resumen para cada uno de los espesores de aislamiento; es necesario tener en cuenta que el usuario debe seleccionar el material aislante de acuerdo al espesor recomendado ya que las dimensiones de los productos de fibra de vidrio varían según la presentación.

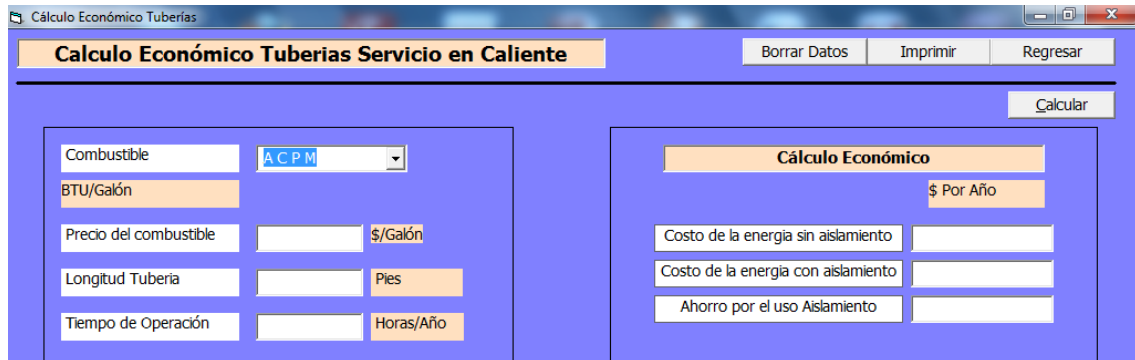
El módulo de cálculo económico consiste en determinar el ahorro en generación de energía gracias al uso del aislamiento. Infortunadamente no se pudo realizar la comparación de este resultado porque el software ECOWIN GREEN realiza el cálculo de ahorro en energía teniendo en cuenta únicamente el combustible que no se consume (Figura 35); mientras que la herramienta OPTHICK considera el precio de generación de vapor en campo.

**Figura 34.** Cálculo Espesor Recomendado ECOWIN GREEN para caso 1



Fuente: ECOWIN GREEN

**Figura 35.** Cálculo Económico ECOWIN GREEN para caso 1



Fuente: ECOWIN GREEN

De igual manera, el programa de cálculo INSULAN realiza cálculos exclusivamente para los productos comercializados por la empresa CALORCOL S.A. Aunque, a diferencia del software ECOWIN GREEN, INSULAN considera la implementación de la chaqueta que recubrirá el aislante para determinar el espesor recomendado (Figura 36). En la Figura 37 se observa los resultados obtenidos para espesor recomendado mediante INSULAN para el producto Manta para tubería equivalente a Lana Mineral de Roca 6” en la base de datos OPTHICK y en la Figura 54 los resultados correspondientes para el aislante RolloFle.x

Para realizar el análisis económico INSULAN requiere información adicional como la longitud de la tubería vertical, debido a que este programa de cálculo está diseñado para procesos industriales. Sin este dato, INSULAN no realizará el análisis económico (Figura 38). Este análisis consiste en determinar el ahorro en generación de energía a partir del combustible utilizado por el equipo, de manera similar al software ECOWIN GREEN. Por lo anterior, tampoco es posible realizar la comparación del costo total del proyecto de aislamiento entre OPTHICK e INSULAN.

**Figura 36.** Datos Entrada Caso 1 INSULAN

Datos de Entrada	
Temperatura Interior:	518 °F
Temperatura Superficie Aislamiento:	103 °F
Temperatura Ambiente:	80 °F
Velocidad del Aire:	0 mi/h
Diámetro de la tubería a aislar:	6 plg
Superficie Exterior Aislamiento:	6
Código Material:	
Emisividad:	0.1

Fuente: INSULAN

Figura 37. Resultados Manta para tubería de 6 pulgadas

TUBERIA HORIZONTAL CALCULOS PARA ESPESOR PRACTICO		
Temperatura Interior (TI)	°F	518.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°F	108.52
Temperatura Ambiente (TA)	°F	80.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	0.0
Diámetro de la tubería a aislar (D)	plg	6.0
Material Superficie Aislamiento		6
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.1
Temperatura Media (TM)	°F	313.26
Coefficiente de Conductividad Térmica (k)	BTU plg/pie² h °F	0.37
Conductancia de la película de aire (f)	BTU/pie² h °F	0.56
Espesor del Aislamiento recomendado (E)	plg	6.0
Pérdida de Calor por Radiación (Qr)	BTU/pie h	16.45
Pérdida de Calor por Convección (Qc)	BTU/pie h	61.17
Pérdida de Calor Total (Qt)	BTU/pie h	77.62
Pérdida de Calor Superficie Desnuda (Qdt)	BTU/pie h	3303.44
Eficiencia del aislamiento (Ef)	%	99.16

Fuente: INSULAN

Figura 38. Resultados Rolloflex

TUBERIA HORIZONTAL CALCULOS PARA ESPESOR PRACTICO		
Eficiencia del aislamiento (Ef)	%	99.16
Temperatura Interior (TI)	°F	518.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°F	108.92
Temperatura Ambiente (TA)	°F	80.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	0.0
Diámetro de la tubería a aislar (D)	plg	6.0
Material Superficie Aislamiento		6
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.1
Temperatura Media (TM)	°F	313.46
Coefficiente de Conductividad Térmica (k)	BTU plg/pie² h °F	0.42
Conductancia de la película de aire (f)	BTU/pie² h °F	0.56
Espesor del Aislamiento recomendado (E)	plg	6.5
Pérdida de Calor por Radiación (Qr)	BTU/pie h	17.6
Pérdida de Calor por Convección (Qc)	BTU/pie h	64.91
Pérdida de Calor Total (Qt)	BTU/pie h	82.51
Pérdida de Calor Superficie Desnuda (Qdt)	BTU/pie h	3303.44
Eficiencia del aislamiento (Ef)	%	99.16

Fuente: INSULAN

**Figura 39.** Análisis Económico INSULAN



Fuente: INSULAN

La comparación de los espesores recomendados para la Lana Mineral de Roca de 6 pulgadas se muestra en la Tabla 10 y para Rolloflex en la Tabla 11. Estos productos son fabricados y comercializados por la empresa CALORCOL S.A.

**Tabla 10.** Comparación Resultados para Lana Mineral de Roca 6”

	Método de Willhite	Método ASTM	Novel Correlation	INSULAN
<b>Temperatura Superficial (°F)</b>	100,21	103,58	NA	108,52
<b>Pérdidas Tubería Desnuda (BTU/hr*ft)</b>	1703,53	1778,37	NA	3303,44
<b>Pérdidas Tubería Aislada (BTU/hr*ft)</b>	69,06	90,51	NA	77,62
<b>Espesor Recomendado (in)</b>	4	4	3,8	6
<b>Eficiencia Aislamiento (%)</b>	95,97	94,91	NA	99,16

**Tabla 11.** Comparación de Resultados Rolloflex

	Método de Willhite	Método ASTM	Novel Correlation	INSULAN
<b>Temperatura Superficial</b>	102,90	106,75	NA	108,92
<b>Pérdidas Tubería Desnuda</b>	1703,53	1778,37	NA	3303,44
<b>Pérdidas Tubería Aislada (BTU/hr*ft)</b>	75,35	97,94	NA	82,51
<b>Espesor Recomendado (in)</b>	3,5	3,5	3,8	6,5
<b>Eficiencia Aislamiento (%)</b>	95,58	94,49	NA	99,16

En todos los métodos utilizados el parámetro de ajuste es la temperatura superficial, y como se puede notar en la tabla anterior, las temperaturas son similares indicando un funcionamiento adecuado de los métodos. Sin embargo, las pérdidas de calor en tubería desnuda con INSULAN son muy altas comparadas con las obtenidas por OPTHICK. Por este motivo, el espesor recomendado por INSULAN será mayor que el sugerido por OPTHICK.

La comparación de resultados para Flexwrap, fabricado y comercializado por FIBERGLASS COLOMBIA S.A, se muestra en la Tabla 12.

Como se evidencia en los resultados mostrados en la tabla, existe una leve diferencia entre los espesores recomendados. Sin embargo, las pérdidas en tubería desnuda obtenidas por INSULAN y ECOWIN GREEN son muy altas comparadas con las obtenidas por OPTHICK, esto puede deber a algún error en las herramientas comerciales. Cuando se realizó la revisión de ECOWIN GREEN se encontraron algunas fallas las cuales fueron reportadas a personal de la compañía FIBERGLASS COLOMBIA S.A. quienes informaron que ya sabían del problema y se encuentran modificando el software para solucionar los errores del

software. Probablemente el mismo error puede estar ocurriendo con el programa de cálculo INSULAN.

**Tabla 12.** Comparación de resultados Flexwrap

	Método Willhite	de	Método C680	ASTM	Novel Correlation	ECOWIN GREEN
<b>Temperatura Superficial</b>	102,16		106,75		NA	88,91
<b>Pérdidas Tubería Desnuda</b>	1703,53		1778,37		NA	3262,16
<b>Pérdidas Tubería Aislada (BTU/hr*ft)</b>	72,47		97,94		NA	114,09
<b>Espesor Recomendado (in)</b>	3,5		3,5		3,86	3
<b>Eficiencia Aislamiento (%)</b>	95,75		94,49		NA	96,51

## 6.4. CASO CAMPO TECA

### 6.4.1. Descripción del Campo

Campo Teca es un campo colombiano dentro de la cuenca Magdalena medio, ubicado a 160 kilómetros del noroccidente de Bogotá y posee una extensión de 2788 acres. La estratigrafía muestra un basamento de rocas ígneas y metamórficas de la edad cretácica, cubierta por una secuencia sedimentaria no consolidada de edad terciaria, compuesta por granos finos, conglomerados, arcillolitas, arenas fluviales, e intercalaciones de shales. La sección sedimentaria tiene un espesor que varía entre 2000 y 3000 pies.

El yacimiento cuenta con dos arenas productoras, la arena A que se ubica a una profundidad entre 1400 y 1800 pies, con un espesor bruto aproximado de 390 pies, además tiene una porosidad promedio de 29% y una permeabilidad máxima de 1080 mD y la arena B que se ubica en el intervalo de 1920 a 2050 pies, con un

espesor aproximado de 130 pies; tiene una porosidad promedio de 28% y una permeabilidad máxima de 780 mD.<sup>58</sup>

#### 6.4.2. Evaluación del Campo Teca

Para este caso se plantea evaluar el espesor del aislamiento en campo Teca (Figura 40), el cual es un campo de crudo pesado colombiano sometido a inyección cíclica de vapor desde hace más de 20 años. En este caso de aplicación se busca determinar el espesor oprimo a partir de las facilidades existentes como lo es el equipo de generación de vapor utilizado actualmente y las líneas de transporte de vapor en superficie.

**Figura 40.** Localización Campo Teca



Fuente: TRIGOS E., “Feasibility Study of Applying Steamflooding in a Reservoir With High Shale/Sand: Teca Field”. SPE 132775. 2010.

<sup>58</sup>URIBE C., “Evaluación Técnico-Financiera de un Proceso de Inyección Cíclica de Vapor usando Pozos Horizontales”. Universidad Industrial de Santander – UIS. Bucaramanga. 2012.

Los datos del campo son mostrados a continuación en la Tabla 13. Cabe aclarar que ante el desconocimiento de la longitud de la tubería a aislar se plantea realizar la evaluación tomando como base el valor de 1000 pies de tubería a aislar.

**Tabla 13.** Datos Caso de Aplicación

DATOS DE ENTRADA	VALOR	UNIDAD
<b>Diámetro Nominal de Tubería</b>	4	Pulgadas
<b>Presión Salida Generador</b>	1000	PSI
<b>Temperatura Ambiente</b>	80	°F
<b>Emisividad</b>	0,9	Adimensional
<b>Velocidad del Viento</b>	0	Ft/seg
<b>Longitud de Tubería</b>	1000	Ft
<b>Horizonte Económico</b>	1	Años
<b>Tiempo de Funcionamiento</b>	8712	Horas/Año
<b>Precio de la Energía</b>	7,9	USD/MMBTU
<b>Tasa de Inflación Anual</b>	4	%
<b>Tasa Alimentación Generador*</b>	4800	Gal H <sub>2</sub> O/hr
<b>Calidad Salida del Generador*</b>	0,8	Fracción
<b>Dólar TRM</b>	1840	Pesos

Fuente: Gerencia Estrategica de Desarrollo de Yacimientos. Ecopetrol.

\*OSPINA J., "Evaluación Técnica De Las Perdidas De Calor En Superficie En Los Pozos Sometidos A Inyección Cilica De Vapor Campo Teca". 2004.

#### 6.4.2.1. Consideraciones del Caso

Para la evaluación de este caso se tomaron en cuenta las siguientes recomendaciones de acuerdo a la información disponible sobre el proyecto.

- Los diámetros nominales utilizados actualmente en campo Teca son de 4 y 6 pulgadas, los cuales corresponden a diámetros externos reales de 4,5 (4 ½) y 6,625 (6 5/8) de pulgada respectivamente. Las especificaciones para estas tuberías son: 4 ½ SCH 80 y 6 5/8 SCH<sup>59</sup> 120. Para este caso se evaluarán únicamente el escenario con diámetro de tubería de 4 pulgadas.

<sup>59</sup> SCH: Schedule o cedula de la tubería.

- La presión de salida del generador para proyectos actuales oscila entre 900 y 1000 psi; y para proyectos futuros entre 1000 y 1300 psi. Por lo anterior, se decidió trabajar con una presión de salida de 1000 psi.
- La emisividad de la superficie corresponde a la tubería sin pintar y es un dato sin confirmar.
- No se conoce la longitud total de tubería a aislar, por lo tanto se tomó como base de cálculo una longitud de 1000 pies.
- La duración del proyecto a evaluar es de un año de acuerdo a la información suministrada.
- El generador opera anualmente 363 días al año, tiene algunas horas de mantenimientos preventivos que suman dos días. Asimismo, cada dos años tiene programado un mantenimiento preventivo mayor de aproximadamente un mes.
- El costo de generación de la energía es de 7,9 USD/MMBTU y contempla los costos de suministro y transporte, y la tasa de inflación para el proyecto será de 4%.
- Se conoce de antemano que debido a problemas de orden público, el material de la chaqueta protectora usado en campo Teca es poliéster reforzado con fibra de vidrio PRFV (Figura 41). Sin embargo, debido a que se desconoce el valor de este material se realizara la evaluación con chaqueta de aluminio de 1 mm de grosor.

**Figura 41.** Tubería Aislada con PRFV



Fuente: FiberGlass

#### **6.4.3. Resultados para un diámetro de Tubería de 4 Pulgadas**

Para este caso de evaluación, se pueden seleccionar los siguientes aislantes por sus características y aplicaciones, las cuales se encuentran detalladas en la base de datos del software.

- Flexwrap
- Cañuela para tubería de 4 pulgadas de FiberGlass (Cañuela FBG4”)
- Rolloflex
- Cañuela lana mineral de roca para tubería de 4 pulgadas (Cañuela LMR 4”).

Evaluando el proyecto con este diámetro de tubería por los tres métodos de solución se obtuvieron los resultados mostrados a continuación. En la Figura 42 se aprecian los datos de entrada y los resultados para el método de Willhite y en la Figura 43 y Figura 44 se aprecian las tablas de resultados para los métodos ASTM C680 y Novel Correlation. En la Tabla 14 se puede ver un resumen de los resultados de los tres métodos

Figura 42. Resultado Método de Willhite

**PARÁMETROS CÁLCULO RECOMENDADO**

Diámetro de la tubería [in]

Presión de Salida [PSI]

Temperatura ambiente [°F]

Emisividad

Velocidad del viento [millas/hr]

Longitud de la tubería (ft)

**PARÁMETROS CÁLCULO RADIO OPTIMO**

Horizonte económico [años]

Tiempo de Funcionamiento [hr/año]

Precio Energía [USD/MMBTU]

Tasa Inflación Anual [%]

**CÁLCULO DE CALIDAD EN CABEZA DE POZO**

Tasa de alimentación generador [gal/hr]

Calidad Salida del Generador [Fracción]

**Aislantes**

- Flexwrap
- Cañuela FBG 2"
- Cañuela FBG 3"
- Cañuela FBG 4"
- Rolloflex
- Lana Mineral de Roca 6"
- Lana Mineral de Roca 8"
- Lana Mineral de Roca 10"

Dolar TRM

Método de Willhite
 Método ASTM C680
 Novel Correlation

**CALCULAR**

Aislante	Esesor Recomendado [in]	Temp. Superficial [°F]	Pérdidas Tubería Desnuda [BTU/Hr.Ft]	Pérdidas Aislante [BTU/Hr.Ft]	Eficiencia [%]	Esesor Optimo [in]	Xc Tub. Desnuda [frac]	XC Tub. Aislada [frac]
Flexwrap	3.00	95.40	2463.75	66.62	97.30	3	0.714	0.798
Rolloflex	3.00	95.95	2463.75	69.31	97.19	3	0.714	0.798
Lana Mineral de Roca 6"	3.00	95.95	2463.75	69.31	97.19	2	0.714	0.798

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

Figura 43. Resultado Método ASTM C 680

Aislante	Esesor Recomendado [in]	Temp. Superficial [°F]	Pérdidas Tubería Desnuda [BTU/Hr.Ft]	Pérdidas Aislante [BTU/Hr.Ft]	Eficiencia [%]	Esesor Optimo [in]	Xc Tub. Desnuda [frac]	XC Tub. Aislada [frac]
Flexwrap	3	100.02	2471.77	91.71	96.29	3	0.714	0.797
Rolloflex	3	100.02	2471.77	91.71	96.29	3	0.714	0.797
Cañuela LMR 4"	3	100.02	2471.77	91.71	96.29	3	0.714	0.797

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

Figura 44. Resultado Novel Correlation

Aislante	Esesor Recomendado [in]
Flexwrap	3.12
Cañuela FBG 4"	3.12
Rolloflex	3.16
Cañuela LMR 4"	3.12

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

**Tabla 14.** Resumen de Resultados Caso Campo Teca tubería 4”

Método	Aislante	Espesor Recomendado [pulg]	Temp. Superf [°F]	Q Tub. Desnuda [BTU/hrpie ]	Q Tub. Aislada [BTU/hr.ft]	Eficiencia [%]	Espesor Optimo [in]	Calidad Vapor Tub Desnuda [Fracción]	Calidad Vapor Tub Aislada [Fracción]
<b>Willhite</b>	Flexwrap	3	95,4	2463,75	66,62	97,3	3	0,714	0,798
	Rolloflex	3	95,95	2463,75	69,31	97,19	3	0,714	0,798
	Cañuela L.M.R 4”	3	95,4	2463,75	66,62	97,3	3	0,714	0,798
<b>ASTM C680</b>	Flexwrap	3	100,02	2471,77	91,71	96,29	3	0,714	0,797
	Rolloflex	3	100,02	2471,77	91,71	96,29	3	0,714	0,797
	Cañuela L.M.R 4”	3	100,02	2471,77	91,71	96,29	3	0,714	0,797
<b>Novel</b>	Flexwrap	3,12							
	Rolloflex	3,16							
	Cañuela L.M.R 4”	3,12							

El aislante denominado Cañuela para tubería de 4 pulgadas, de la empresa FiberGlass, no se encuentra en la tabla de resultados pese a ser seleccionado para la evaluación; esto se debe a que el espesor óptimo es de 3 pulgadas y para dicho aislante no se comercializa este espesor, por esta razón, la herramienta OPTHICK excluye esta opción de la evaluación.

Como se ilustra en la tabla anterior, se obtiene un espesor óptimo de 3 pulgadas según los métodos de Willhite y ASTM, indicando que a pesar de las pequeñas variaciones entre estos, los dos procesos convergen hacia un mismo resultado, lo cual permite al usuario la libertad de selección del método de solución que más se ajuste a sus necesidades, sin ninguna diferencia en el resultado final. Además el método Novel Correlation ofrece un resultado similar a los otros, demostrando que este método es una buena opción ante la posible falta de información.

De acuerdo a los resultados obtenidos para este caso, el efecto del aislamiento en la calidad del vapor en cabeza no parece significativo, considerando la diferencia entre estos valores de calidad, obtenidos para tubería desnuda y para tubería aislada; sin embargo, el valor de calidad en cabeza para el caso de la tubería aislada (0,798), posee un valor similar al valor de la calidad del vapor a la salida del generador (0,8) indicando que la reducción significativa de las pérdidas de calor; dicha reducción causa un efecto positivo en el proceso de inyección de vapor, porque se entregará mayor cantidad de energía al yacimiento para disminuir efectivamente la viscosidad del crudo.

En la Tabla 15 se muestra la desviación relativa entre los parámetros calculados por medio de los métodos de Willhite y ASTM C680. Como ya se mencionó la diferencia entre estas metodologías consiste en la conductividad térmica usada para la evaluación, mientras en el primero se utiliza la conductividad promedio del material en el segundo se calcula a partir de la temperatura de operación.

La determinación del error porcentual se hizo mediante la ecuación 90, en ésta se toma como valor teórico el aportado por el método ASTM C680 ya que es una norma estandarizada.

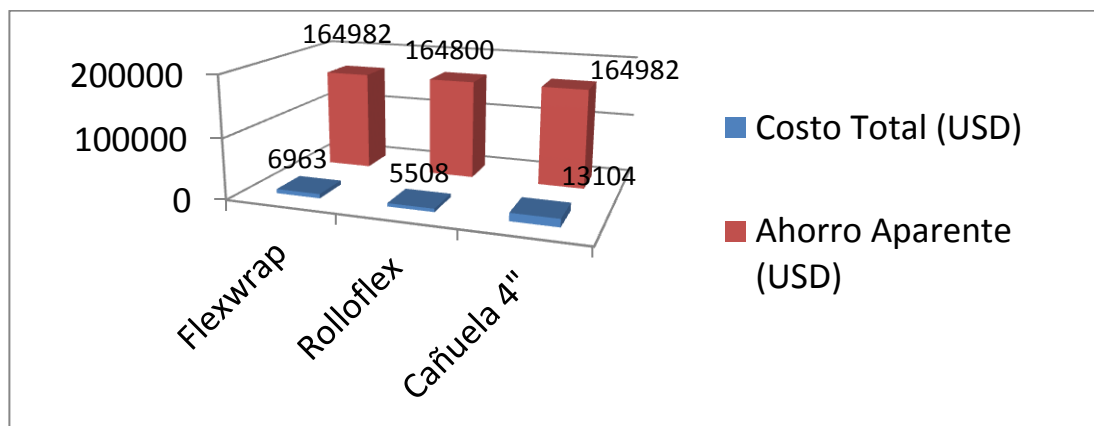
$$E_r = \left| \frac{\text{Valor Teorico} - \text{Valor Real}}{\text{Valor Teorico}} \right| * 100 \quad (90)$$

**Tabla 15.** Error Relativo

Parametro	Método Willhite	Método ASTM C680	Error Porcentual [%]
Temp. Superficial [°F]	95,4	100,02	4,61
Perdidas Tubería Desnuda [BTU/hr.ft]	2463,75	2471,77	0,32
Perdidas Tubería Aislada [BTU/hr.ft]	69,31	91,71	24,42

De nuevo, se obtiene el mismo valor de radio óptimo para los tres materiales adecuados para este caso; entonces, la selección del material aislante se basa en la diferencia entre el costo total del proyecto y el ahorro aparente para cada uno de los materiales (Figura 45). En este caso, la mayor diferencia es la obtenida por el material conocido como Rolloflex.

**Figura 45.** Costo Total del Aislamiento y Ahorro Aparente de Flexwrap y Rolloflex.



Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan los resultados de las demás secciones de la herramienta OPTHICK para el aislante Rolloflex, en base la solución generada por el método ASTM.

En la Figura 46, se muestra la sección “Otros” para el aislante Rolloflex. En la Tabla 16 se resume los resultados obtenidos en la sección “Otros” para los tres posibles aislantes y posteriormente hacer la selección del mejor aislante en función de los costos totales de operación.

**Figura 46.** Costos Proyecto con Rolloflex

The screenshot displays the 'Ahorro Aparente' (Apparent Savings) section with a checkmark icon. It lists the following values:

Costo Desnuda	170119.08	USD/Año
Costo Aislada	6311.92	USD/Año
Ahorro	163807.15	USD/Año

Below this is the 'Emisiones no generadas de CO2' (CO2 emissions not generated) section. It features a dropdown menu for 'Combustible' (Fuel) with the following options: CRUDO, FUEL OIL, GAS PROPANO, CARBON, GAS NATURAL, and ELECTRICIDAD. The selected value is 'ELECTRICIDAD', resulting in an 'Emisión CO2' of 854.4 TonCO2/año.

The 'Costo del Proyecto' (Project Cost) section shows a dropdown for 'Chaqueta' (Cladding) with options: ALUMINIO 0.4 mm, ALUMINIO 0.5 mm, ALUMINIO 0.7 mm, and ALUMINIO 1 mm. The 'ALUMINIO 1 mm' option is selected and highlighted in blue. The associated costs are:

Costo Aislante	1423.38	USD
Costo Chaqueta	4085.39	USD
Costo Total	5508.78	USD

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

**Tabla 16.** Costo total del proyecto

	Costos Generación Energía			Costos Proyecto			Costo Total	
	[USD/Año]			[USD]			[USD]	
<b>Aislante</b>	Tubería Desnuda	Tubería Aislada	Ahorro	Aislante	Chaqueta	Total	Aislante/ Energía	Ahorro
<b>Flexwrap</b>	170119,0 8	6311,9 2	163807,1 5	2877,7 6	4085,39	6963,15	13275,0 7	156844,0 1
<b>Rolloflex</b>	170119,0 8	6311,9 2	163807,1 5	1423,3 8	4085,39	5508,78	11820,7	158298,3 8
<b>Cañuela LMR 4"</b>	170119,0 8	6311,9 2	163807,1 5	9019,2 3	4085,39	13104,6 2	19416,5 4	150702,5 4

En base a esos resultados se puede determinar que el material seleccionado para el proyecto es el aislante denominado Rolloflex y el espesor óptimo es de 3 pulgadas. Es importante aclarar que el ahorro total se hace evaluando la diferencia entre los costos de la energía disipada con la tubería desnuda y el costo total del proyecto, el cual incluye la inversión del material aislante y el costo de la energía generada en este escenario.

A continuación se presentan los resultados detallados para este material aislante en la Tabla 17 y el análisis gráfico de los resultados.

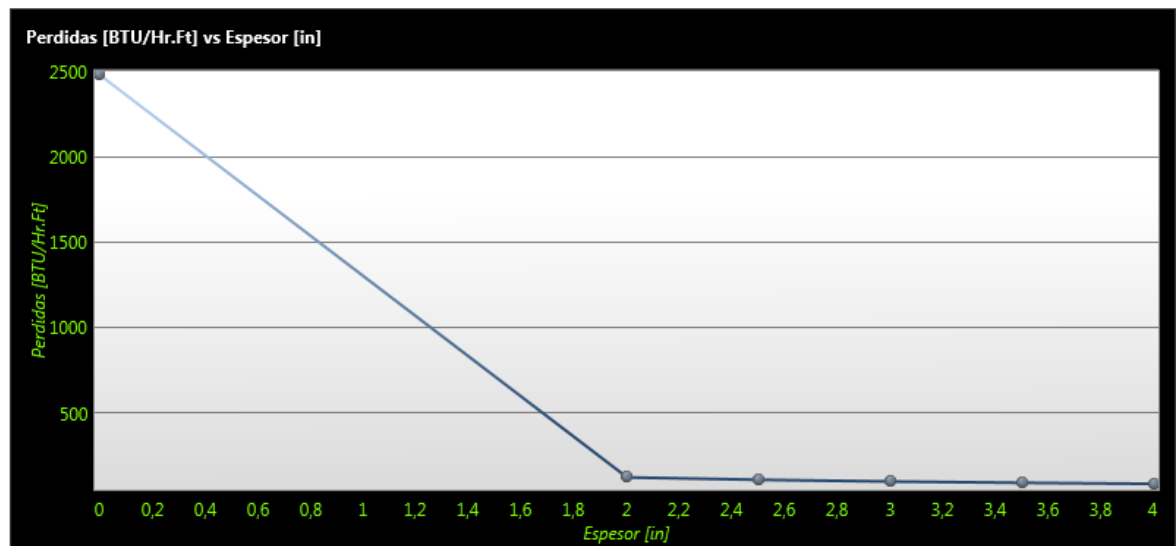
Como se observa en la Tabla 17, para este proyecto se puede pagar hasta el espesor de 4 pulgadas sin afectar la viabilidad económica. Sin embargo, se determinó que el espesor recomendado termodinámicamente es de 3 pulgadas, y que la diferencia entre las eficiencias de estos espesores son mínimas. Esto se puede apreciar de manera más clara en la gráfica Pérdidas vs Espesor (Figura 47) donde se observa el comportamiento asintótico de las pérdidas de calor en función del incremento del espesor del aislante.

**Tabla 17.** Resultados detallados

Espesor	Costo	Ts	Radio total	Q des	Q tub Aisl	Efi.	Calidad
0	0	544,6	2,25	2471,77	2471,77	0	0,714
2	0,85	104	4,25	2471,77	90,68	96,32	0,797
2,5	0,96	99,2	4,75	2471,77	78,02	96,83	0,797
3	1,1	96	5,25	2471,77	69,31	97,19	0,798
3,5	1,19	93,5	5,75	2471,77	62,92	97,45	0,798
4	1,29	91,7	6,25	2471,77	58,02	97,65	0,798

Espesor	Ahorro	Inversión	Diferencia
0	0	0	0
2	74,96	0,85	74,11
2,5	0,34	0,11	0,23
3	0,23	0,14	0,09
3,5	0,16	0,09	0,06
4	0,12	0,09	0,02

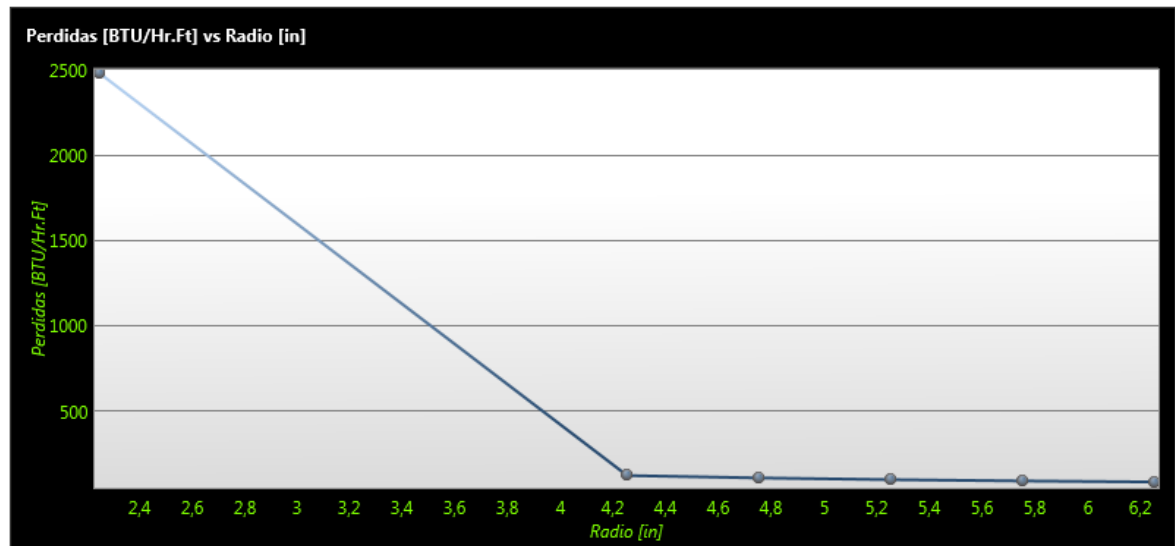
**Figura 47.** Pérdidas vs. Espesor



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

Análogamente, se presenta la misma tendencia en la gráfica pérdidas vs. Radio (Figura 48) ya que este radio es la suma del radio de la tubería más el espesor del aislante.

**Figura 48.** Pérdidas vs. Radio Total



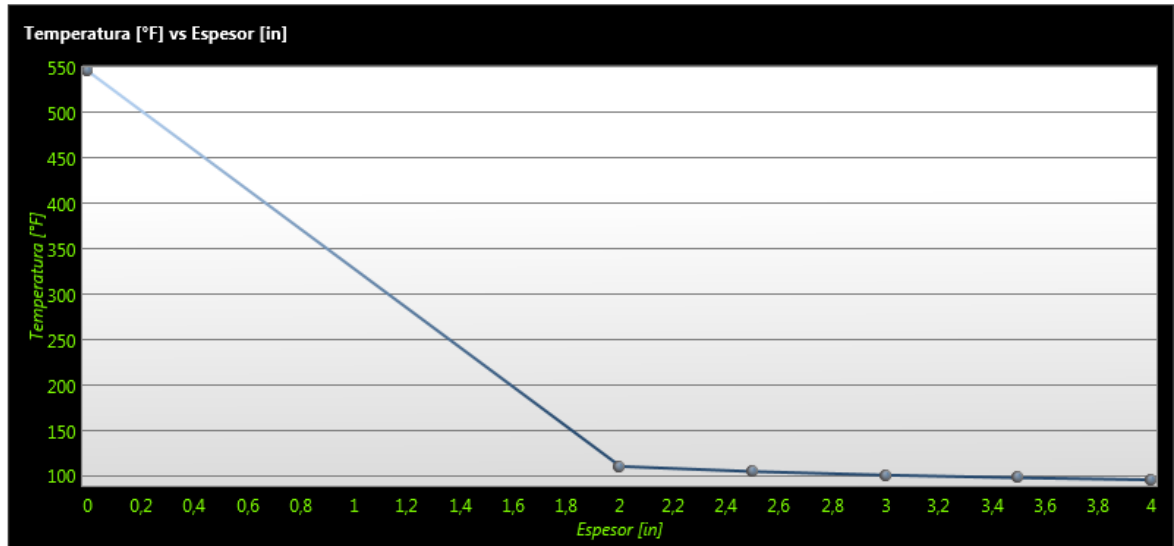
Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

El perfil de temperatura superficial mostrado en la gráfica temperatura vs. Espesor (Figura 49) muestra como disminuye la temperatura exterior a medida que aumenta el espesor del aislante

La grafica Calidad vs espesor (Figura 50) demuestra como la implementación del material aislante contribuye a disminuir la reducción en la calidad del vapor en cabeza de pozo logrando de esta manera una calidad mayor que beneficiará al proceso de inyección de vapor.

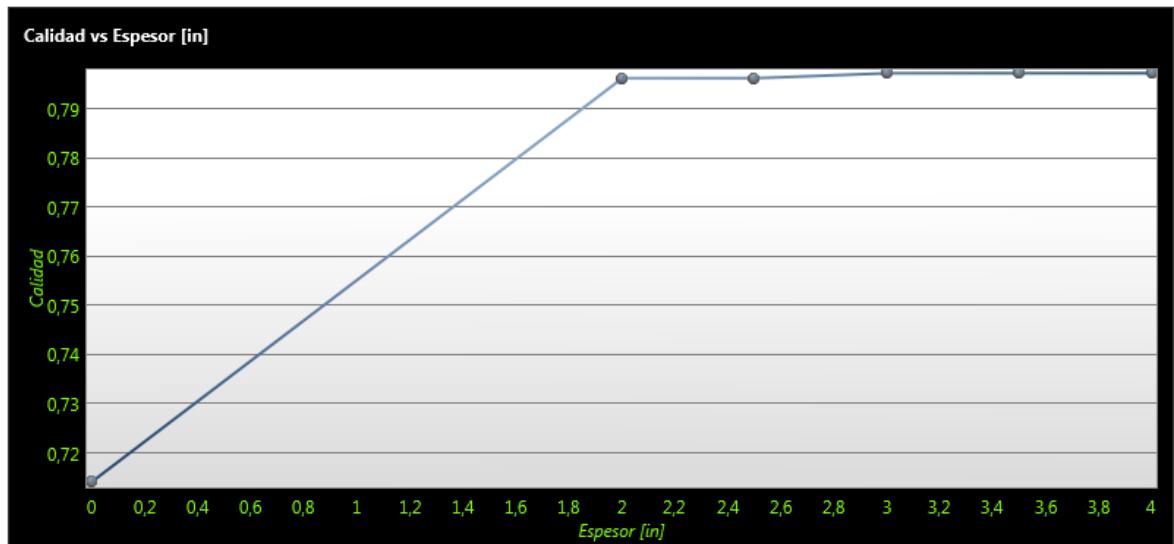
Por último en la gráfica Costo vs espesor (Figura 51) se observa como a medida que aumenta el espesor del aislamiento también aumenta el costo de éste y de esta forma aumenta la inversión.

**Figura 49.** Temperatura superficial vs Espesor



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

**Figura 50.** Calidad vs. Espesor



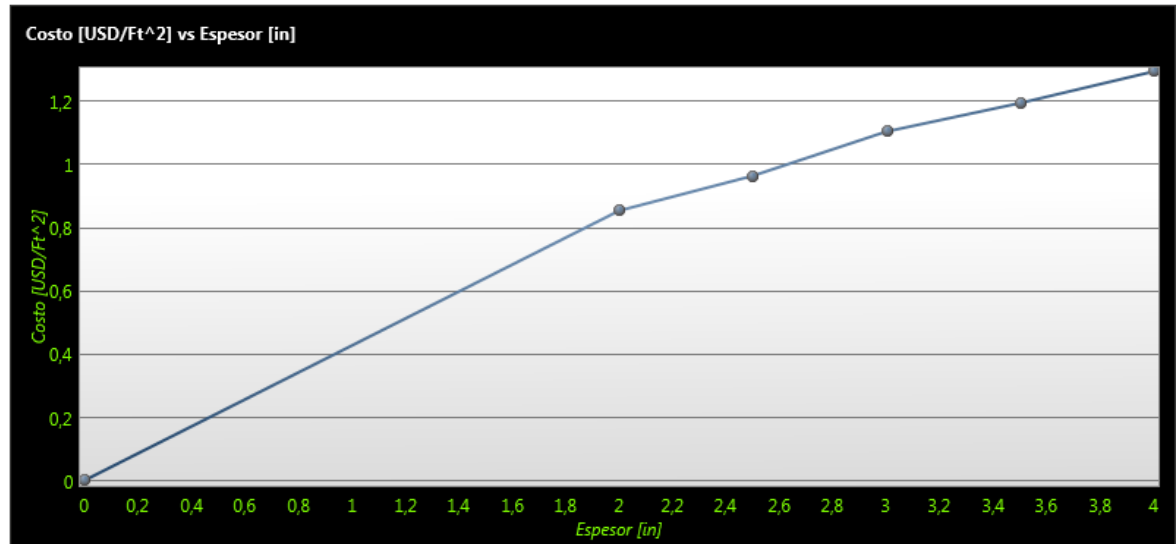
Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

## 6.5. CASO APLICACIÓN PARA DETERMINAR AHORRO DE COMBUSTIBLE

La reducción de las pérdidas de energía por medio de la implementación de aislamiento puede disminuir la duración del período de inyección de un proceso de

inyección cíclica de cíclica con vapor; debido a que se va a requerir una menor cantidad de tiempo para que llegue la misma energía al yacimiento o a la cara de la formación, disminuyendo así, el consumo de combustible.

**Figura 51.** Costo vs. Espesor



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

Para corroborar lo anteriormente dicho, se analizó un campo colombiano de crudo pesado que es sometido a un proceso de inyección cíclica de vapor en cuatro pozos horizontales con inyección intercalada. Se busca determinar la duración del período de inyección teniendo en cuenta que se planea inyectar al yacimiento 8000 MMBTU por ciclo. Los datos utilizados se muestran en la tabla 18.

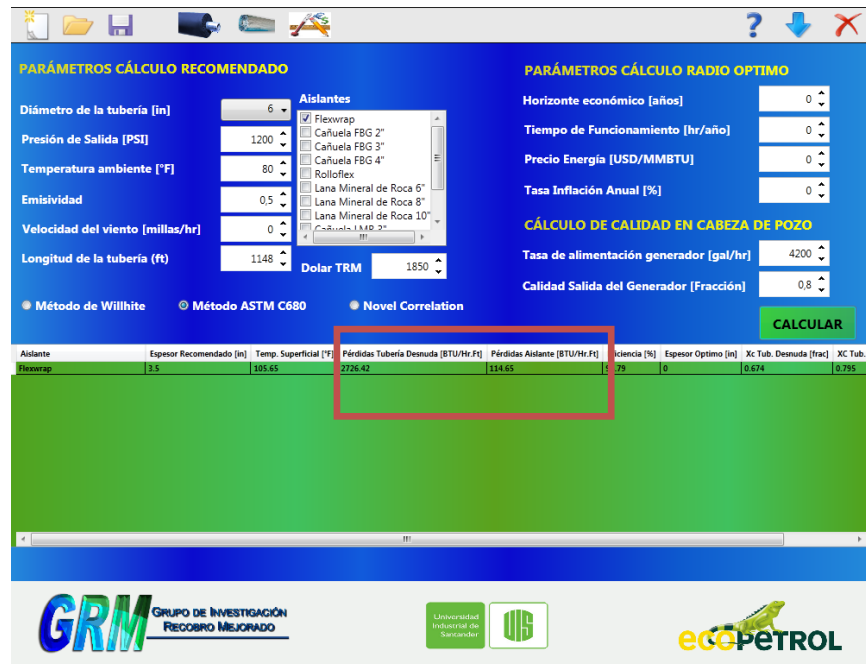
Para este caso se realizó la evaluación con el aislante Flexwrap y el método de solución ASTM C680, como se muestra en la Figura 53.

Como se puede observar en la Figura 53, no se introdujeron los datos para calcular el radio óptimo, ya que la finalidad del ejercicio es determinar el tiempo de inyección. La herramienta OPTHICK fue utilizada en este caso, para determinar las pérdidas de calor en tubería desnuda y en tubería aislada.

Tabla 18. Datos de entrada ejemplo

DATOS DE ENTRADA	VALOR	UNIDAD
Diámetro Nominal de Tubería	6	Pulgadas
Presión Salida Generador	1200	PSI
Temperatura Ambiente	80	°F
Emisividad	0,5	Adimensional
Velocidad del Viento	0	Pies/seg
Longitud de Tubería	1000	Pies
Tasa Alimentación Generador	4800	Gal H <sub>2</sub> O/hr
Calidad Salida del Generador	0,8	Fracción
Capacidad Calorífica Gas Natural	960	BTU/pie <sup>3</sup>
Eficiencia Térmica del Generador	0,85	Fracción

Figura 52. Cálculo de pérdidas de calor para el ejemplo



A continuación se detalla el procedimiento empleado para determinar el tiempo del período de inyección.

1. Determinar la tasa de flujo de vapor a la salida del generador en [MMBTU/D]

$$h_v = h_w + X_{gen}L_v \quad (90)$$

Donde

$h_v$  Entalpía del vapor,  $\frac{BTU}{lb_m}$

$h_w$  Entalpía del agua,  $\frac{BTU}{lb_m}$

$$h_v = 571,9 + 0,8(613)$$

$$h_v = 1062,3 \left[ \frac{BTU}{lb_m} \right]$$

Entonces,

$$T_{va} = h_v * T_{alimentación} * \rho_w \quad (91)$$

Donde

$T_{va}$  Tasa de flujo de vapor,  $\frac{MMBTU}{día}$

$T_{alimentación}$  Tasa de alimentación de agua,  $\frac{Bbl}{día}$

$\rho_w$  Densidad del agua,  $\frac{lb}{Bbl}$

$$T_{va} = 1062,3 * 2400 * 350$$

$$T_{va} = 892,33 \frac{MMBTU}{día}$$

2. Determinar las pérdidas de calor en tubería desnuda y aislada en [MMBTU/día]

Los resultados obtenidos por la herramienta OPTHICK fueron:

$$Q_d = 2726,42 \frac{BTU}{hr \cdot pie}$$

$$Q_a = 114,65 \frac{BTU}{hr \cdot pie}$$

Donde

$Q_d$  Pérdidas en tubería desnuda,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie}$

$Q_a$  Pérdidas en tubería aislada,  $\frac{BTU}{hr \cdot pie}$

$$Q_d = 2726,42 * 1148 * 24 = 75,12 \frac{MMBTU}{día}$$

$$Q_a = 114,65 * 1148 * 24 = 3,16 \frac{MMBTU}{día}$$

3. Determinar el tiempo de inyección para cada caso en días.

$$t_{iny} = \frac{E_c}{\%Q_w(T_{va}-Q)} \quad (92)$$

Donde

$t_{iny}$  Tiempo de inyección, días

$E_c$  Energía a inyectar por ciclo, MMBTU

$\%Q_w$  Fracción de la energía que llega al yacimiento debido a las pérdidas de cabeza de pozo a yacimiento<sup>60</sup>

Para el caso Tubería Desnuda

$$t_{iny} = \frac{8000}{0,8(892,33 - 75,12)} = 12,23 \approx 13 \text{ días}$$

Para el caso Tubería Aislada

$$t_{iny} = \frac{8000}{0,8(892,33 - 3,16)} = 11,24 \approx 12 \text{ días}$$

Conociendo la eficiencia térmica del generador se puede determinar la cantidad de combustible que se consume por día.

$$\Delta h = h_v - h_w \quad (94)$$

Donde

$\Delta h$  Delta de entalpías,  $\frac{BTU}{lb_m}$

$h_v$  Entalpía del vapor,  $\frac{BTU}{lb_m}$

$h_w$  Entalpía del agua de alimentación,  $\frac{BTU}{lb_m}$

$$h_w = 1,0 \frac{BTU}{lb_m \cdot ^\circ F} * (80 - 32)^\circ F$$

$$h_w = 48 \frac{BTU}{lb_m}$$

---

<sup>60</sup> Se supone que las pérdidas desde cabeza hasta la cara del pozo son del 20%

$$\Delta h = 1062,3 - 48 = 1014,3 \frac{BTU}{lb_m}$$

El calor ganado por el vapor se determina a partir de la siguiente expresión.

$$Q_{ganado} = T_{alimentación} * \rho * \Delta h \quad (95)$$

$$Q_{ganado} = 2400 * 350 * 1014,3$$

$$Q_{ganado} = 852 \text{ MMBTU}$$

Por medio del concepto de eficiencia térmica del generador se puede determinar el calor total liberado

$$Eficiencia = 1 - \left[ \frac{Calor_{Total} - Calor_{ganado}}{Calor_{Total}} \right] \quad (96)$$

$$0,85 = 1 - \left[ \frac{Calor_{Total} - 852}{Calor_{Total}} \right]$$

Despejando se obtiene

$$Calor_{Total} = 1002,35 \text{ MMBTU}$$

Dividiendo el calor total por la capacidad calorífica del combustible se determina el volumen de combustible que se consume en un día.

$$V_{comb} = \frac{Calor_{Total}}{C_{gas}} \quad (97)$$

$$V_{comb} = \frac{1002,35 \text{ MMBTU}}{960 \frac{\text{BTU}}{\text{Pie}^3}}$$

$$V_{comb} = 1,04 \text{ MMPCN}$$

De acuerdo a los resultados anteriores, se concluye que para este caso, la implementación del material aislante reduce en el periodo de inyección, lo cual se puede traducir en ahorro de combustible.

## CONCLUSIONES

La herramienta OPTHICK desarrollada en este trabajo permitió optimizar el espesor del aislamiento térmico en tubería de superficie para transporte de vapor mediante el cálculo del espesor óptimo en función de las menores pérdidas de energía a bajos costos.

La determinación del espesor óptimo requiere integrar el cálculo de la energía perdida en la tubería de transporte de vapor, a partir de diferentes métodos como el método de Willhite o el procedimiento descrito en la norma ASTM C680, junto con el concepto de Valor Presente Neto. Aunque la correlación desarrollada por Bahadori y Vulthuru no permita determinar dicho espesor, estima un espesor recomendado a falta de información.

En los procesos de inyección de vapor, la reducción en las pérdidas de energía mediante el aislamiento térmico permite obtener una mayor calidad del vapor en cabeza de pozo; de esta manera se puede suministrar mayor energía al yacimiento para obtener una mejor respuesta de este o disminuir el tiempo de inyección para generar un ahorro de combustible.

OPTHICK es una herramienta desarrollada exclusivamente para procesos de inyección de vapor, por lo tanto, es la más adecuada para realizar el diseño y análisis del sistema de aislamiento en este tipo de procesos.

## RECOMENDACIONES

La herramienta OPTHICK asume que el flujo de vapor se encuentra en estado estable, por lo cual se desprecian las pérdidas por fricción; sin embargo, la herramienta debería evaluar tanto las pérdidas por energía térmica como por fricción para estimar la viabilidad económica del uso de aislante con mayor exactitud.

Es importante observar el sistema de distribución de vapor e identificar los puntos donde se pueden presentar mayores pérdidas. Sería favorable integrar a la herramienta computacional un entorno gráfico que permita diseñar la distribución de las facilidades, tuberías, accesorios y pozos de inyección de vapor contemplados en el proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, JHON. “Determinación Del Espesor Óptimo De Aislante Para Tuberías Que Conducen Vapor”. Grupo de Recobro Mejorado. 2009.

ASTM C680. “Estimate of the Heat Gain or Loss and the Surface Temperatures of Insulated Flat, Cylindrical and Spherical Systems by Use of Computer Programs”.

BAHADORI, A.; VULTHALURU, B. “A Novel Correlation for Estimation of Economic Thickness of Insulation for Process Piping and Equipments”. Artículo SPE 124373. 2009.

BARILLAS, J. L.; DUTRA JR., T. V.; MATA, W. “Improved Oil Recovery Process for Heavy Oil: A Review”. Artículo Brazilian Journal of Petroleum and Gas. 2008.

BERGER, E. L.; KOLTHOFF, K. W.; SCHRODT, J. L.; LONG, L. PAULEY, C. “The SlipTigator: A Device for the Mitigation of Phase Splitting”. Artículo SPE 37516. 1997.

BLACKER, H.F., BELLACI, I.J. “Injector steam quality and rate from orifice data”. Artículo SPE 27868. 1994.

CALORCOL S.A. “Lista de Precios LP 2-2011” Unidad de Ingeniería Térmica.

CALORCOL S.A. “Catálogo General de Productos”. 2013.

CHAN M. Y S and SARIOGLU, G. “Numerical Modeling of Cyclically Steamed and Fractured Oil-sands Reservoirs”. Artículo SPE 22369.

CRAIG, J. WHEELER, M. SCHRODT. "The Splitigator: Enhancing the Value of Steamflooding" Texaco Exploration and Production Technology Department. USA.

FIBERGLASS COLOMBIA S.A. "Manual de "Procedimiento ECOWIN Green"

FIDAN, Silcuk. "Wellbore Heat Loss Calculation during Steam Injection in Onshore&Offshore Environments". Thesis. Stanford University. 2011

GODZE, S. CHINA, H. "An Analytic Cyclic Reservoir". Artículo SPE 18807.

GÓMEZ PRADA, LUIS GONZALO. "Recuperación mejorada de hidrocarburos. Inyección cíclica y continua de vapor". Universidad Industrial de Santander. 1989.

GONZALEZ, RICARDO. PINILLA, JAIME. "Evaluación de Procesos de Inyección Continua de Vapor en Yacimientos Estratificados mediante el Análisis de la Eficiencia Térmica. Aplicación Campo Teca. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2009.

GONZALEZ. Fernando. "Determinación Experimental del Coeficiente de Convección y el Factor de Fricción de un intercambiador de placas". Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2008.

GOU, Bouyun. DUAN, Shengkai. Ghalambor, Ali. "A Simple Model for Predicting Heat Loss and Temperature profile in Insulated Pipelines". University of Louisiana at Lafayette. SPE Production & Operations. 2006.

GREASER, G.; ORTIZ, R. "New Thermal Recovery Technology and Technology Transfer for Successful Heavy Oil Development". Artículo SPE 69731. 2001.

GRISTON, S. "Steam Distribution and Metering". Short Course, Integrated Sciences Group. 2011.

GRISTON, S. "Practical Aspects of Heat Management". Integrated Sciences Group. 2011.

GRISTON, S.; CHOI JAI. "Two Phase Flow Splitting at Side-branching Tees". Artículo SPE 46237. 1998.

GUALLICHICO, FREDDY. "Diseño de Sólidos de Revolución mediante el método de elementos finitos". Trabajo de Grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2010

HONG K.C. "Steamflood Reservoir Management". Thermal Enhanced Oil Recovery. PennWell Books. Tulsa.1994.

HONG, K. C. "Recent Advances in Steamflood Technology" Artículo SPE 54078. 1999.

HONG, K.; GRISTON, S. "Best Practices for Distribution and Metering of Two-Phase Steam". Artículo SPE 35422. 1997.

INCROPERA. F. P. DE WITT, D. P. "Fundamentos de transferencia de calor". Cuarta Edición. Prentice Hall. México, 1999.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA. "Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos". Guía Técnica. Ministerio de Industria y Comercio. España, 2007.

ISOVER. SAINT-GOBAIN. "Manual de Aislamiento en la Industria". Documentación ISOVER. 2013.

JONES, J. E. "Care and Feeding of Steam-Injection EOR Projects" Artículo Technology Series Today.

JONES, J. WILLIAMS R.L. "A Two-Phase Flow Splitting Device that Works". Artículo SPE PRODUCTION & FACILITIES, August, 1993.

KERR, R. "How to Measure Downhole Steam Quality Using a Thermocouple and a Non-condensable Gas" Artículo PETSOC-99-04-02. April 1999.

KREITH, F.; MANGLIK. R.; BOHN, M. "Principles of Heat Transfer" Seventh Edition. Cengage Learning. 2011.

MANNUCI, J. E. "Recobro Adicional de Petróleo por Métodos no Convencionales". 1990.

MARIANI, N. J.; MARTINEZ, O. M. "Aislación Térmica". Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata.

MARTELO, M. DELGADO G. "Sistemas de completación en procesos térmicos en la faja petrolífera del Orinoco". Trabajo Especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

NORTH AMERICAN INSULATION MANUFACTURERS ASOCIATION. "Insulation Thickness Computer Program 3E PLUS". User Guide. Version 4.1.

RECTOR, B. "Steam Separating Solves Phase Splitting Problems in Wet Steam Distribution Systems". Artículo SPE 21560. 1990.

RODRIGUEZ, E; BARRIOS W.; SANTOS N. "Numerical Simulation for Cyclic Steam Injection at Santa Claro Field". CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol 3. Núm. 4. 2008.

TRIGOS E., "Feasibility Study of Applying Steamflooding in a Reservoir With High Shale/Sand: Teca Field". SPE 132775. 2010.

SANDOVAL M., J. E. "A simulation study of Steam and Steam-Propane Injection Using a Novel Smart Horizontal Producer to Enhance Oil Production". Tesis de Maestría. Texas, United States, 2004.

SERTH R. W."Process Heat Transfer". Principles and Applications. First Edition. Academic Press. 2007.

SINCLAIR, J. W.; STARTZMAN. "Steam Quality Measurement in Flow Lines". Artículo SPE 13634. 1985.

STROME. R. K. "Continuous Steam Quality Measurement in a Steam Distribution System Quality Measurement". SPE 16348. 1987.

URIBE, CARLOS. "Evaluación Técnico-Financiera de un Proceso de Inyección de Cíclica de Vapor usando Pozos Horizontales. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2012.

WOICESHYN, G. E. YUEN, P. S. JHIN, H. MANZANO, J.J. "Measurement of Steam Quality, Mass Flow Rate, and Enthalpy Delivery Rate Using Combined Neutron Densitometer and Nozzle. SPE/DOE 14907. 1986.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. DIAGRAMAS DE FLUJO**

Para desarrollar la herramienta computacional es necesario realizar los diagramas de flujo de las operaciones para crear posteriormente el algoritmo en el lenguaje de programación.

#### **1. DIAGRAMA DE FLUJO PÉRDIDAS DE CALOR EN TUBERÍA DESNUDA**

Este procedimiento está basado en el método de Willhite para cálculo de pérdidas de calor. Ver Figura A-1.

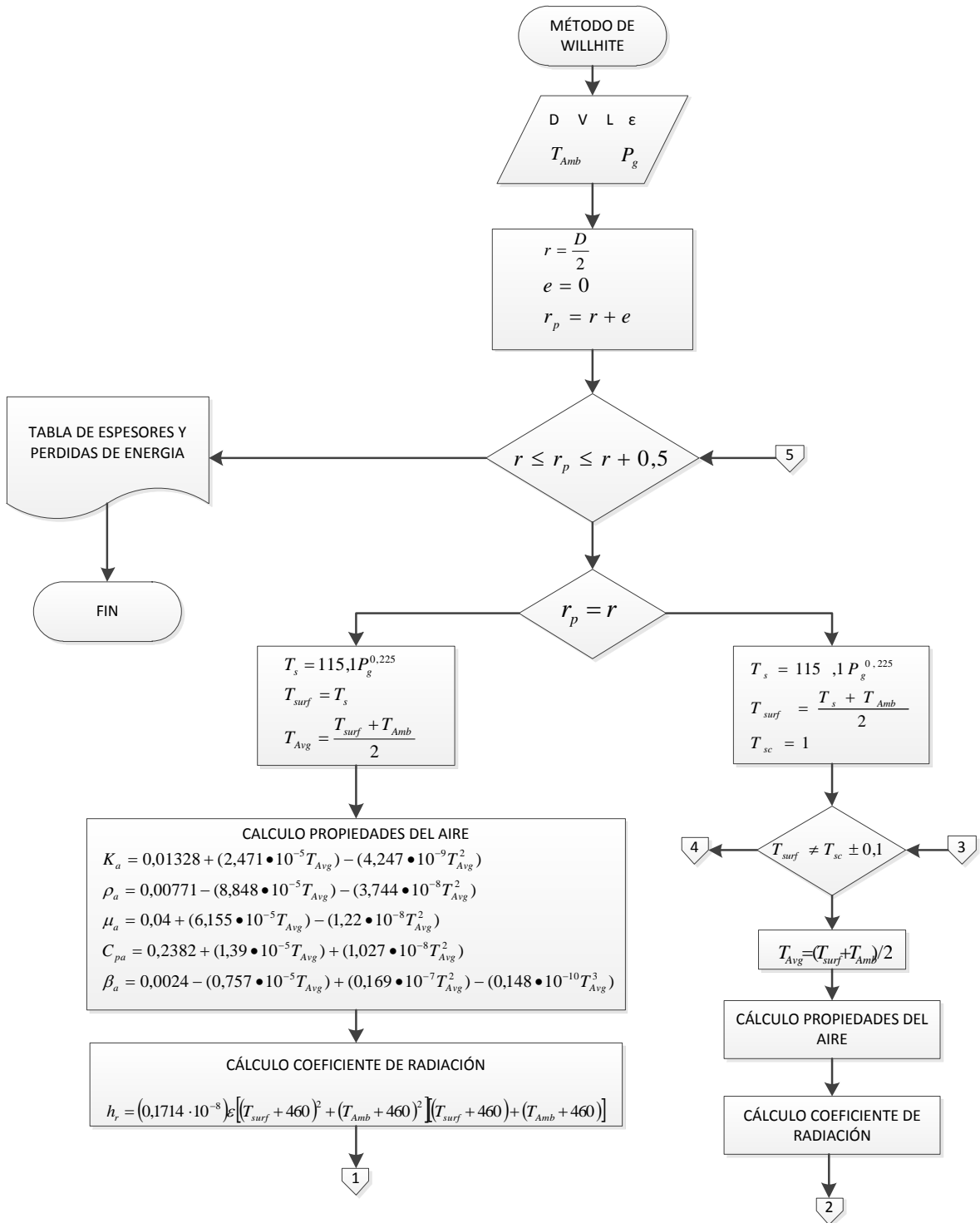
#### **2. DIAGRAMA DE FLUJO PARA CALCULAR EL ESPESOR ÓPTIMO DE AISLANTE TÉRMICO USANDO VPN.**

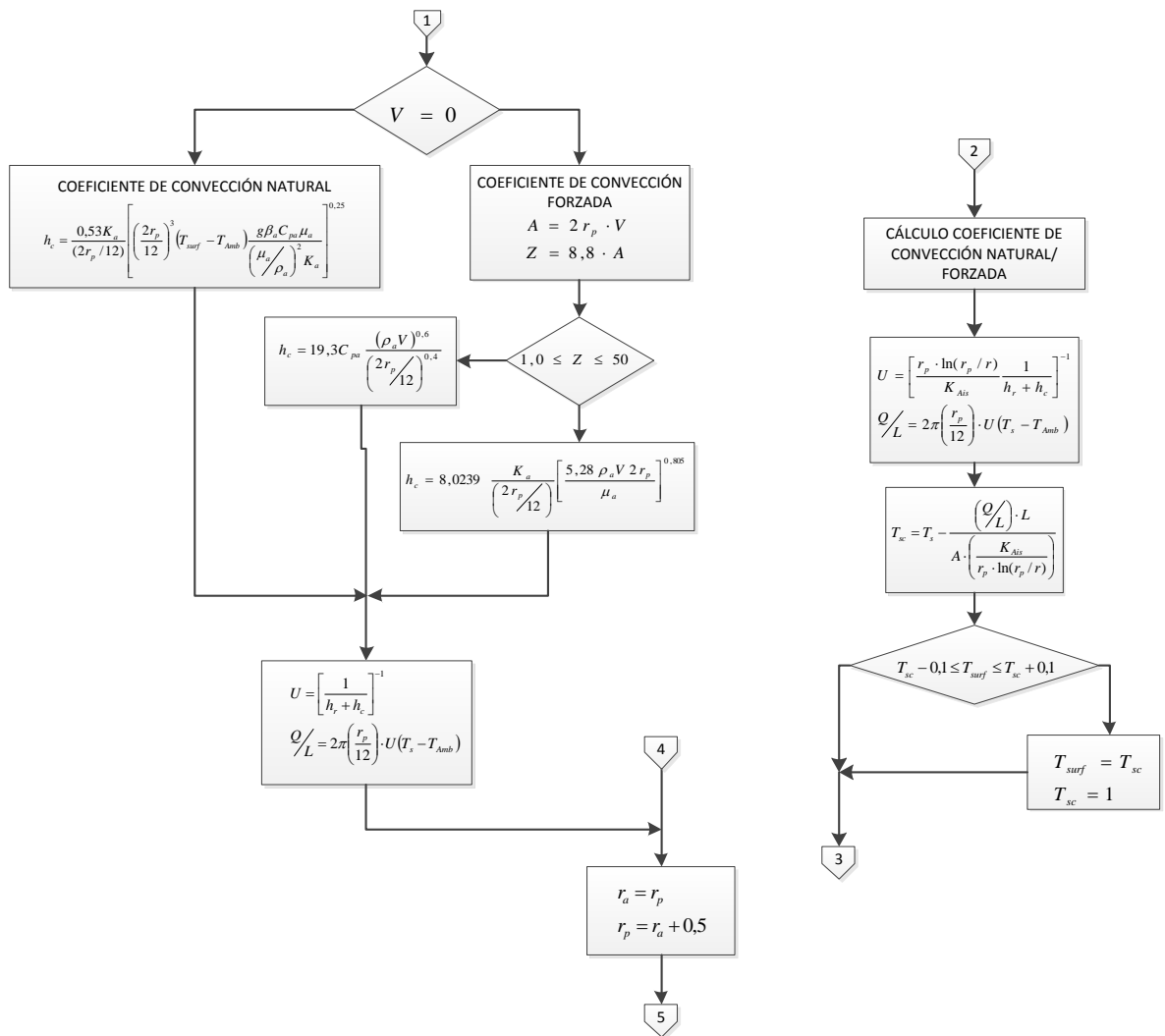
Este diagrama se basa en el concepto de Valor Presente Neto (VPN) el cual es usado para evaluar proyectos de inversión a largo plazo. Ver figura A-2.

#### **3. DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR EL ESPESOR ECONÓMICO DE AISLANTE MEDIANTE LA CORRELACIÓN.**

La correlación de Bahadori y Vulthaluru es un método muy sencillo, porque relaciona temperatura y diámetro externo de la tubería con unos coeficientes determinados experimentalmente por los autores de la correlación. Ver figura A-3.

Figura A-1. Diagrama de Flujo para determinar pérdidas de calor





**Figura A-2.** Método para determinar Radio óptimo a partir de VPN

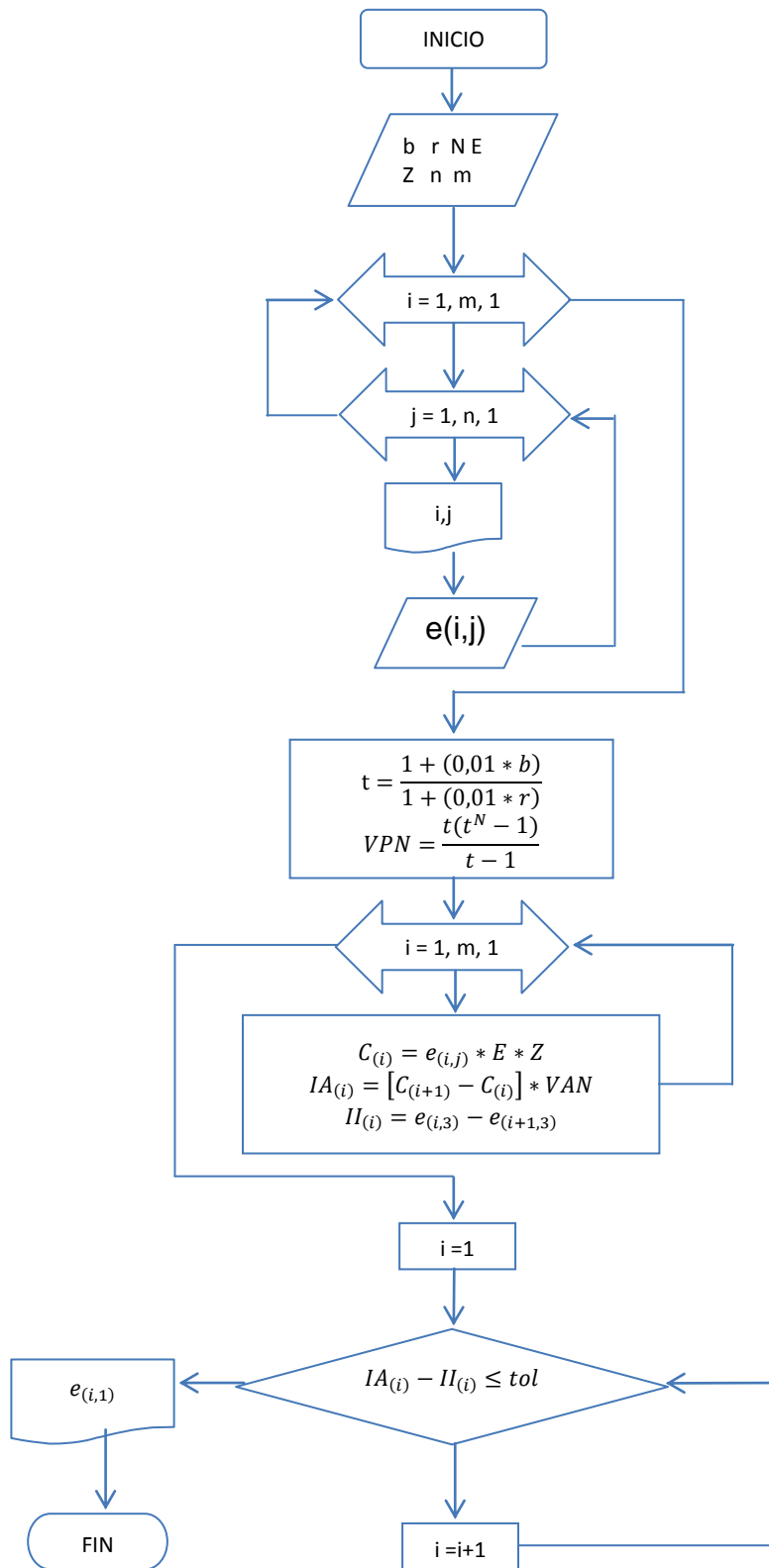
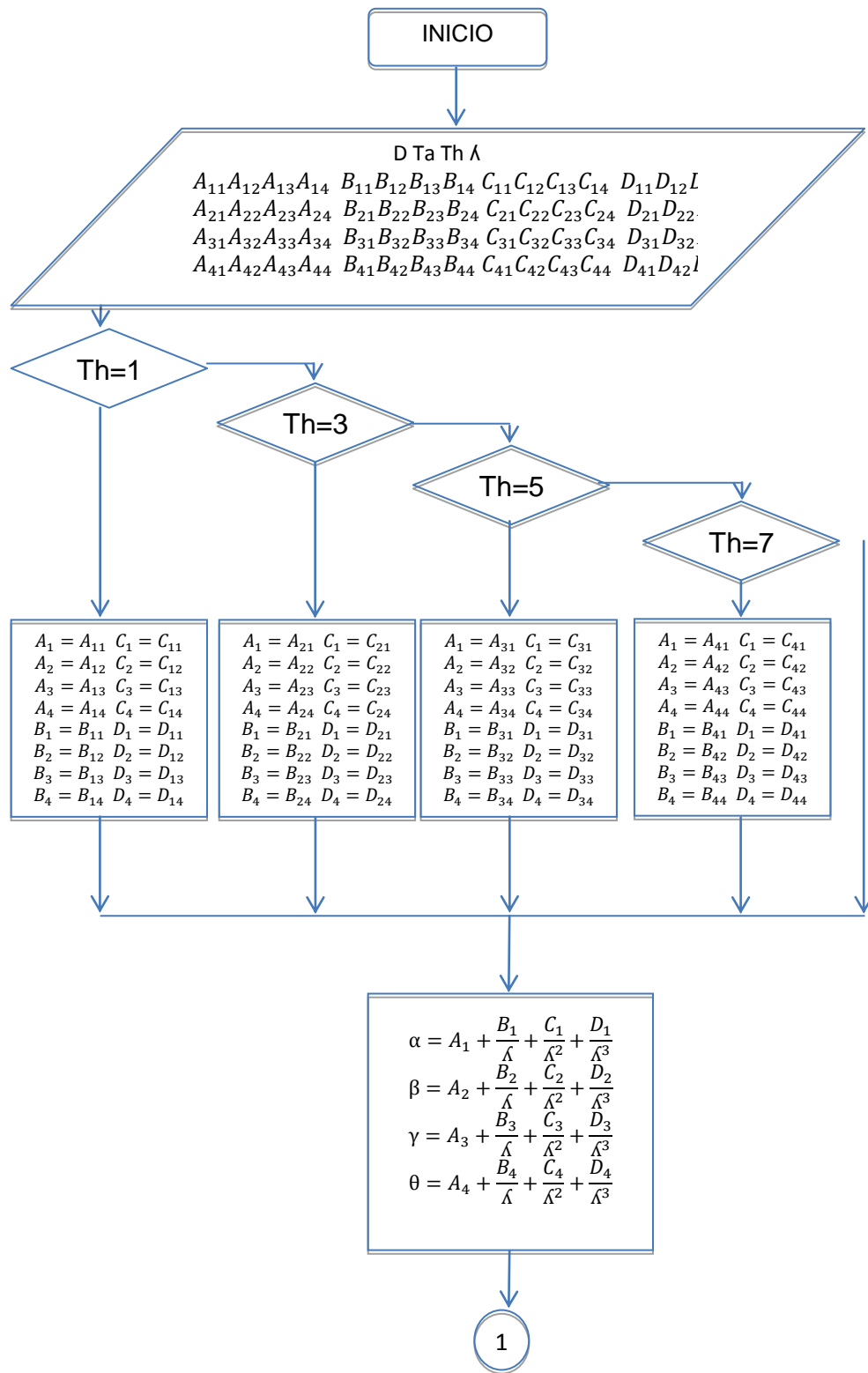
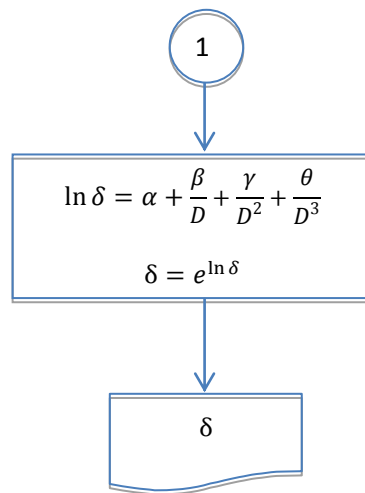


Figura A-3. Diagrama de Flujo Correlación para determinar espesor económico.





## ANEXO B. MANUAL DE USUARIO OPTHICK 1.0

### 1. ¿QUÉ ES OPTHICK?

La herramienta computacional OPTHICK desarrollada por el Grupo de Investigación Recobro Mejorado, es un programa que permite determinar el espesor óptimo de aislamiento térmico en tuberías de superficie a ser utilizado en procesos de inyección de vapor mediante un análisis especializado de las propiedades de los diferentes aislantes y un procesamiento de la información recibida de variables físicas y térmicas de acuerdo a los diferentes métodos utilizados para el cálculo de las pérdidas de calor en sistemas de aislamiento.

OPTHICK permite calcular las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se dejan de emitir al ambiente gracias al uso del aislamiento y estima el ahorro logrado en la generación del vapor.

### 2. MARCO DE TRABAJO PRINCIPAL

Cuando se inicia el programa se presenta una pantalla de bienvenida como la que se muestra en la figura B-1.

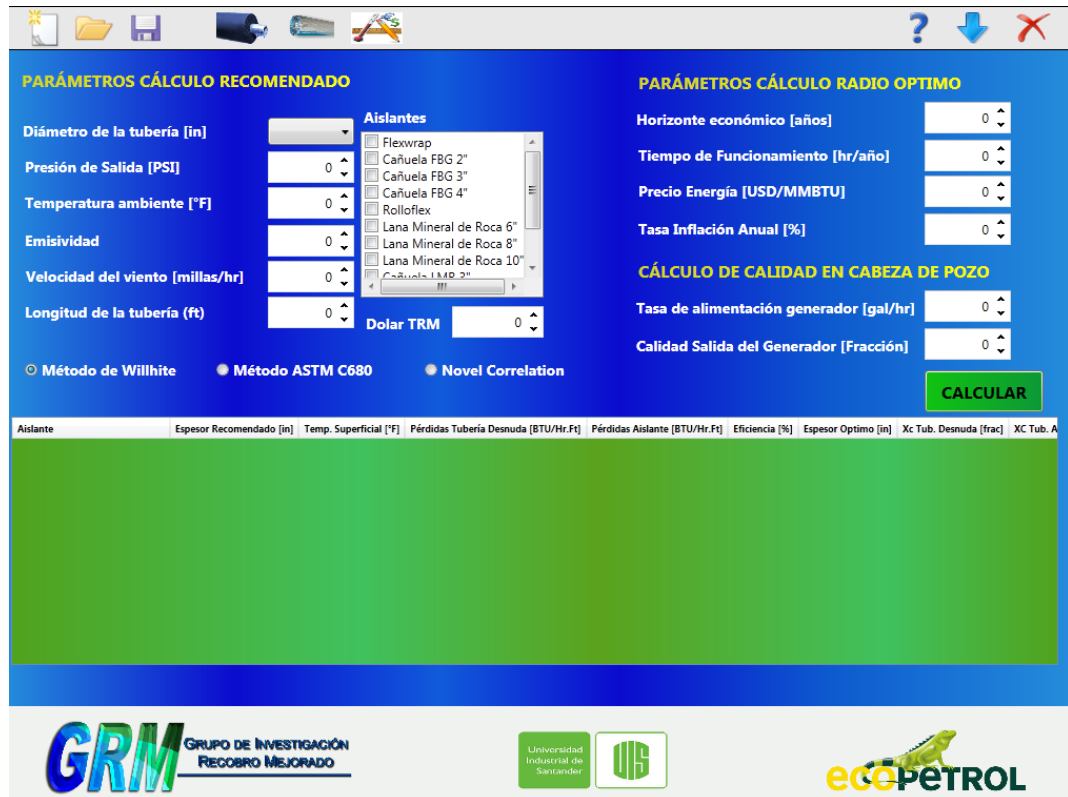
**Figura B-1.** Pantalla de presentación OPTHICK



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

El marco de trabajo general está constituido por un menú superior, el módulo de entrada de datos para el cálculo del espesor recomendado, el panel de selección de aislantes, el modulo para el cálculo del espesor optimo, el módulo de selección de método de solución y una tabla resumen donde se agrupan los resultados para cada uno de los diferentes aislantes evaluados, como se muestra en la figura B-2.

Figura B-2. Marco de trabajo General



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

### 3. MENU SUPERIOR

En el menú superior se encuentran las siguientes opciones:

- ❖ **Nueva Evaluación:** al seleccionar esta opción se eliminan todos los datos de la ventana principal y la herramienta esta lista para iniciar una nueva evaluación.

- ❖ **Abrir Evaluación:** esta opción permite abrir una evaluación realizada anteriormente, carga todos los datos de entrada de los diferentes módulos de la ventana principal para su posterior análisis.
- ❖ **Guardar Evaluación Actual:** permite guardar los datos de entrada de los diferentes módulos de caculo de espesores en un archivo para ser utilizados en evaluaciones posteriores.
- ❖ **Editor de Aislantes:** esta opción permite acceder a la base de datos de aislantes, donde el usuario podrá observar los diferentes aislantes utilizados y sus propiedades, como se observa en la figura B-3.

Figura B-3. Base de Datos de Aislantes

AISLANTE	KA	DESCRIPCIÓN
Flexwrap	0.24	Aislamiento térmico de lana de vidrio, flexible, resistente, aglomerado
Cañuela FBG 2"	0.24	Lana de vidrio rígida, preformada en forma de medias cañas para aisl
Cañuela FBG 3"	0.24	Lana de vidrio rígida, preformada en forma de medias cañas para aisl
Cañuela FBG 4"	0.24	Lana de vidrio rígida, preformada en forma de medias cañas para aisl
Rolloflex	0.25	En la industria el RolloFlex es recomendado para aislar térmica y acúsi
Lana Mineral de Roca 6"	0.25	Las mantas aislantes de CALORCOL S.A. hechas de lana mineral de ro
Lana Mineral de Roca 8"	0.25	Las mantas aislantes de CALORCOL S.A. hechas de lana mineral de ro
Lana Mineral de Roca 10"	0.25	Las mantas aislantes de CALORCOL S.A. hechas de lana mineral de ro
Cañuela LMR 3"	0.24	Las cañuelas de lana mineral de roca CALORCOL S.A. consisten en aisl
Cañuela LMR 4"	0.24	Las cañuelas de lana mineral de roca CALORCOL S.A. consisten en aisl

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

Del mismo modo, haciendo doble clic sobre cada uno de los aislantes se accede a una nueva ventana ilustrada en la figura B-4 donde se puede

apreciar una breve descripción, su conductividad y los diferentes espesores disponibles en el mercado, así como su precio por pie cuadrado.

**Figura B-4.** Descripción Aislantes

Nombre  
Flexwrap

Proveedor  
Fiberglass

Descripción  
Aislamiento térmico de lana de vidrio, flexible, resistente, aglomerado con resina termo-resistente, de textura uniforme, presentado en rollos.  
Usado generalmente para equipos con superficies irregulares, ductos de circulación de gases, estufas, hornos y calentadores

Dimensiones  
30'x4'

Conductividad térmica (ka)  
0,24

Temperatura de Operación  
850

Espesores

ESPESOR [in]	COSTO [COP/ft^2]
1.5	2847
2	3570
2.5	3829
3	4086

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

Asimismo, se pueden incluir nuevos materiales aislantes a la base de datos con simplemente dar clic sobre el icono ilustrado en la parte inferior de la figura C-3. Al hacer esto se desplegará una ventana similar a la mostrada en la figura C-4 donde se deberá suministrar la información requerida en esta nueva ventana y que ya fue mencionada anteriormente. Una vez cargada la información del nuevo aislante se cierra esta ventana y la información quedará guardada automáticamente.

- ❖ **Editar Chaquetas:** las chaquetas comprenden materiales de mayor resistencia mecánica que el material aislante y su función es brindar protección contra agentes externos. Estos agentes pueden ser: condiciones

climáticas o interferencia por terceros. Entre los materiales más comunes para las chaquetas se encuentran: acero inoxidable, acero galvanizado, aluminio y poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Cabe mencionar que el material comúnmente utilizado en los procesos de inyección de vapor en campos petroleros es el aluminio. No obstante en lugares donde el robo del aluminio se ha vuelto recurrente se emplea el PRFV como por ejemplo algunos campos del Magdalena Medio.

En el editor de chaquetas de la herramienta *OPTHICK* se presentan las opciones más comunes de chaquetas de aluminio y su costo [COP/Ft<sup>2</sup>]<sup>61</sup>. Además el editor permite ingresar nuevas opciones de chaquetas donde únicamente es necesario suministrar el nombre del material y su precio por pie cuadrado, tal como se muestra en la figura B-5.

**Figura B-5.** Descripción Aislantes

CHAQUETAS	
CHAQUETA	COSTO [COP/ft <sup>2</sup> ]
ALUMINIO 0.4 mm	994
ALUMINIO 0.5 mm	1243
ALUMINIO 0.7 mm	1740
ALUMINIO 1 mm	2486

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

- ❖ **Menú de Conversión de Unidades:** esta práctica opción permite llevar a cabo la conversión de unidades necesarias para el funcionamiento de la herramienta de manera sencilla, al introducir un valor en cualquiera de las

<sup>61</sup> COP: Pesos Colombianos. Los costos suministrados por las empresas ingresados en la herramienta *OPTHICK* se encuentra en pesos colombianos debido a que estas empresas son colombianas, razón por la cual se debe especificar la tasa representativa del mercado TRM.

casillas de un sistema de medición en particular, automáticamente se calcularán las unidades equivalentes en lo demás sistemas de medición disponibles en el conversor. Es necesario aclarar que la herramienta *OPTHICK* está programada en unidades de campo y todos los datos deben ser introducidos en estas unidades para un correcto funcionamiento de la herramienta. El conversor de unidades se muestra en la figura B-6.

**Figura B-6.** Conversión de Unidades

Temperatura	
Centigrados	100
Fahrenheit	212

Longitud		
Pies	20	
Metros	6,096	
Pulgadas	240	

Conductividad térmica	
BTU/hr.ft	1000
W/m	960,384

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

- ❖ **Minimizar/Cerrar:** estas opciones permiten minimizar o cerrar la aplicación.

#### 4. MÓDULO DE CÁLCULO DEL ESPESOR RECOMENDADO

En esta sección de la herramienta (figura B-7), ubicada en el marco de trabajo principal se suministra la información necesaria para el cálculo de las pérdidas de calor y la determinación del espesor recomendado termodinámicamente de acuerdo al método de solución seleccionado (el concepto de espesor recomendado y los métodos de solución son descritos más adelante). La información suministrada en este punto comprende:

- ❖ **Diámetro de la tubería:** diámetro exterior de la tubería analizada en pulgadas. La tabla B-1 relaciona el diámetro nominal con el diámetro real de la tubería.

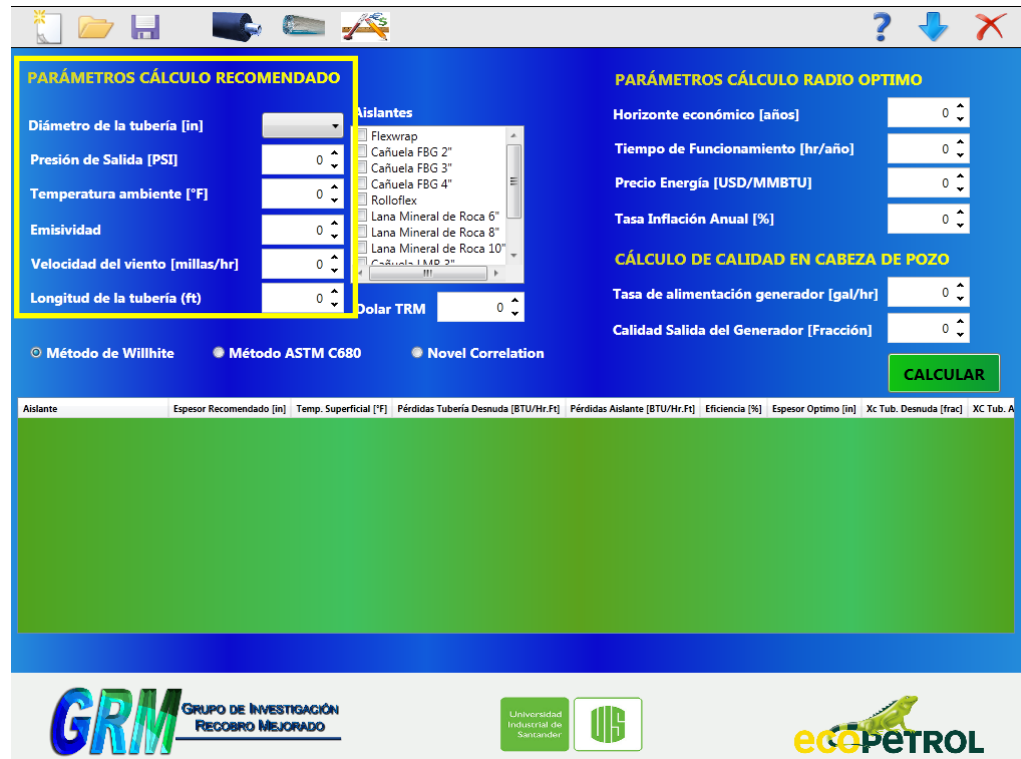
**Tabla B-1.** Diámetros Reales de Tubería

Diámetro Nominal [pulg]	Diámetro Real [pulg]
¼	0,84
¾	1,05
1	1,315
1 ¼	1,66
1 ½	1,9
2	2,375
2 ½	2,875
3	3,5
4	4,5
5	5,563
6	6,625
8	8,625
10	10,750
12	12,750
14	14
16	16
18	18
20	20
24	24

- ❖ **Presión de Salida:** la presión de salida del generador de vapor es utilizada para calcular la temperatura del vapor o temperatura de operación y debe ser ingresada en libras por pulgada cuadrada (psi).
- ❖ **Temperatura Ambiente:** Temperatura del ambiente circundante a la tubería analizada. Sus unidades son grados Fahrenheit (°F).
- ❖ **Emisividad:** medida de la habilidad de la superficie de la tubería de absorber y emitir radiación. La emisividad es adimensional y es igual o menor a la unidad. Depende de la naturaleza de la superficie

- ❖ **Velocidad del Viento:** este parámetro es necesario para determinar el tipo de convección presente y el coeficiente total de transferencia de calor. La velocidad debe ser ingresada en pies por segundo (ft/s).
- ❖ **Longitud de la tubería:** es la longitud de la tubería evaluada en pies.

Figura B-7. Modulo Calculo Espesor Recomendado



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

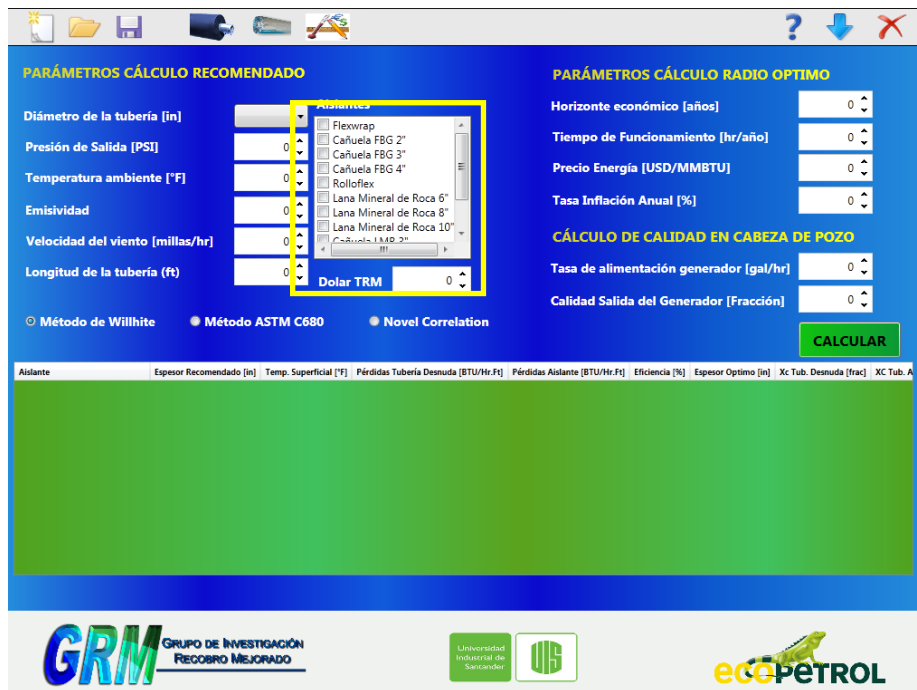
## 5. PANEL DE SELECCIÓN DE AISLANTES

El panel de selección de aislantes contiene los diferentes aislantes de la base de datos y permite seleccionar los materiales aislantes a analizar con la herramienta en cada proyecto. Es importante mencionar que algunos de estos se encuentran repetidos y es debido a las presentaciones de los materiales ya que la filosofía de las diferentes empresas fabricantes de dichos materiales es fabricar presentaciones en las cuales el ancho del material coincide con el perímetro de la

tubería y de ese modo no tener material sobrante o simplemente materiales preformados que sólo son fabricados para diámetros específicos de tubería (Figura B-8).

Para seleccionar los aislantes a evaluar, basta con hacer clic sobre cada uno de estos en el panel de selección.

Figura B-8. Panel de Selección de Aislantes



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

## 6. MÓDULO DE CALCULO DEL ESPESOR ÓPTIMO

En este módulo de la ventana principal se suministra la información necesaria para la determinación del espesor óptimo, dicho cálculo es realizado mediante la optimización del espesor recomendado a los requerimientos financieros del proyecto mediante el método del valor presente neto descrito anteriormente. La información requerida en esta parte se puede observar en la figura B-9 y es descrita a continuación:

**Figura B-9.** Parámetros Cálculo Radio Óptimo

The screenshot shows a software application window with a blue header and a white background. The interface is organized into several sections:

- PARÁMETROS CÁLCULO RECOMENDADO:** Contains input fields for pipe diameter, outlet pressure, ambient temperature, emissivity, wind velocity, and pipe length. It also includes a list of insulation materials (Flexwrap, Cañuela FBG 2", 3", 4", Rolloflex, Lana Mineral de Roca 6", 8", 10") and a selection of calculation methods (Willhite, ASTM C680, Novel Correlation).
- PARÁMETROS CÁLCULO RADIO OPTIMO:** Highlighted with a yellow box, it includes input fields for economic horizon, operating time, energy price, and annual inflation rate.
- CÁLCULO DE CALIDAD EN CABEZA DE POZO:** Includes input fields for generator feed rate and generator output quality.
- Buttons:** A green 'CALCULAR' button is located at the bottom right of the input sections.
- Results Table:** A table with columns for insulation type, recommended thickness, surface temperature, bare pipe losses, insulation losses, efficiency, optimal thickness, and tube dimensions.
- Logos:** GRM (Grupo de Investigación Recobro Mejorado), Universidad Industrial de Santander, and ecOPETROL are displayed at the bottom.

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

- ❖ **Horizonte Económico:** Duración del proyecto de inyección de vapor en años.
- ❖ **Tiempo de Funcionamiento:** Duración total de la inyección de vapor en horas al año.
- ❖ **Precio de la Energía:** Costo de la generación de la Energía en forma de vapor en el campo donde se va a implementar el proyecto. Por ejemplo, el costo de generación de la energía en *Campo Teca* es de 3,2 [USD/MMBTU]<sup>62</sup>.

<sup>62</sup> OSPINA J. Tesis de grado

- ❖ **Tasa de Inflación Anual:** Esta variable suministra el cambio porcentual anual de los precios al consumidor comparado con los precios al consumidor del año anterior.

## 7. MÓDULO DE CALCULO DE CALIDAD DEL VAPOR EN CABEZA DE POZO

En esta sección se proporcionan los datos necesarios para determinar la calidad del vapor en cabeza de pozo tanto para el caso de la tubería desnuda como para el caso con la tubería aislada. La información necesaria se detalla a continuación y se puede apreciar su ubicación en el marco principal de trabajo en la figura B-10.

Figura B-10. Panel de Selección de Aislantes

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

- ❖ **Tasa de Alimentación del Generador:** Caudal de agua en galones por hora suministrado al generador para convertirlo en vapor.

- ❖ **Calidad a la Salida del Generador:** es la fracción en peso del vapor seco contenido en una libra de vapor húmedo medido a la salida del equipo de generación de vapor. Por lo general la calidad del vapor en este punto del sistema oscila entre el 75% -80%.

## **8. BOTÓN CALCULAR**

Una vez ingresada toda la información, basta dar un simple clic sobre el botón calcular para que sean llevados a cabo todos los cálculos y se muestren los resultados en la resultados ubicada en la parte inferior del marco principal de trabajo.

Es importante mencionar que la herramienta está compuesta por un módulo principal, el módulo de cálculo del espesor recomendado y los demás módulos son complementarios y el desconocimiento de información sobre estos no afecta del desarrollo de la ejecución del objetivo principal de la herramienta. Es decir, si no se conocen los datos para el cálculo del espesor óptimo esto no es impedimento para que la herramienta pueda calcular el espesor recomendado termodinámicamente y los únicos resultados que no se podrán apreciar son los asociados directamente a este módulo.

## **9. TABLA DE RESULTADOS**

Es una tabla resumen donde se pueden apreciar los resultados óptimos para cada uno de los aislantes seleccionados en la evaluación del proyecto realizada, en otras palabras para los aislantes que se puedan aplicar en cada caso, esta tabla muestra los resultados para el espesor óptimo de dicho aislante. La tabla de resultados se puede apreciar en la figura B-11 y contiene la siguiente información:

Figura B-11. Tabla de Resultados

The screenshot shows a software application window with a blue header and a white background. The interface is organized into several sections:

- PARÁMETROS CÁLCULO RECOMENDADO:** This section contains several input fields with up/down arrows:
  - Diámetro de la tubería [in]: 0
  - Presión de Salida [PSI]: 0
  - Temperatura ambiente [°F]: 0
  - Emisividad: 0
  - Velocidad del viento [millas/hr]: 0
  - Longitud de la tubería (ft): 0
- Aislantes:** A dropdown menu showing various insulation materials:
  - Flexwrap
  - Cañuela FBG 2"
  - Cañuela FBG 3"
  - Cañuela FBG 4"
  - Rolloflex
  - Lana Mineral de Roca 6"
  - Lana Mineral de Roca 8"
  - Lana Mineral de Roca 10"
- PARÁMETROS CÁLCULO RADIO OPTIMO:** This section contains input fields for:
  - Horizonte económico [años]: 0
  - Tiempo de Funcionamiento [hr/año]: 0
  - Precio Energía [USD/MMBTU]: 0
  - Tasa Inflación Anual [%]: 0
- CÁLCULO DE CALIDAD EN CABEZA DE POZO:** This section contains input fields for:
  - Tasa de alimentación generador [gal/hr]: 0
  - Calidad Salida del Generador [Fracción]: 0
- Method Selection:** Three radio buttons are present:
  - Método de Willhite
  - Método ASTM C680 (selected)
  - Novel Correlation
- Buttons:** A green 'CALCULAR' button is located at the bottom right of the input area.
- Table Header:** Below the input fields, a table header is visible with columns: Aislante, Espesor Recomendado [in], Temp. Superficial [°F], Pérdidas Tubería Desnuda [BTU/Hr.Ft], Pérdidas Aislante [BTU/Hr.Ft], Eficiencia [%], Espesor Optimo [in], Xc Tub. Desnuda [frac], Xc Tub. A...
- Logos:** At the bottom of the window, there are logos for GRM (Grupo de Investigación Recobro Mejorador), Universidad Industrial de Santander, and ecopETROL.

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorador. UIS.

- ❖ **Aislante:** Nombre del material aislante evaluado.
- ❖ **Espesor Recomendado:** Espesor recomendado termodinámicamente en pulgadas. Este se puede definir como el menor espesor al cual se obtiene la mayor eficiencia de aislamiento, debido a que los incrementos subsecuentes a este espesor brindan una eficiencia mayor pero debido al comportamiento asintótico obtenido en la gráfica Perdidas vs. Espesor se puede observar que las eficiencias de estos espesores no justifican el incremento del espesor.
- ❖ **Temperatura Superficial:** Temperatura obtenida en la cara exterior del aislamiento en grados Fahrenheit. La temperatura superficial debe estar en unos rangos determinados para protección personal como se puede observar en la tabla B-2.

**Tabla B-2.** Intervalos de Temperatura para protección personal

GRADO DE DOLOR	TEMPERATURA [°F]
Sin sensación	82 – 93
Tibio o caliente	93 – 113
Comienzo de dolor	113
Incremento de dolor	113 – 126
Dolor severo	126 – 133
Dolor intolerable	133 – 140
Entumecimiento	>140

Fuente: McChesney and McChesney – Fuel Save Association. USA


- ❖ **Pérdidas Tubería Desnuda/Aislada:** Pérdidas de energía obtenidas en la tubería sin aislamiento y tubería aislada respectivamente, expresadas en [BTU/hr.ft].
- ❖ **Eficiencia del Aislamiento:** Es la relación entre las pérdidas en la tubería desnuda y las pérdidas en la tubería aislada, la cual permite conocer la fracción del calor ahorrado por efectos del aislamiento.
- ❖ **Espesor Óptimo:** Espesor de aislante recomendado a partir de la optimización financiera del proceso evaluado. Se expresa en pulgadas.
- ❖ **Calidad del Vapor en cabeza de pozo en tubería desnuda/aislada  $X_c$ :** la calidad del vapor es la fracción en peso del vapor seco contenido en una libra de vapor húmedo. Una calidad de 0,8 significa que en una libra de vapor húmedo hay 0,8 libras de vapor seco y 0,2 libras de agua. Este factor es muy importante ya que sirve para calcular la cantidad de calor en una libra de vapor húmedo. La calidad se estima en diferentes puntos del sistema como los son

la salida del generador de vapor, cabeza y fondo de pozo y es un factor crítico en la eficiencia del proceso de inyección de vapor.

❖ **Otros:** al dar doble clic sobre esta celda de la tabla de resumen se accede a otra ventana donde se pueden evaluar otros aspectos del proyecto de inyección de vapor como se puede apreciar en la figura B-12. Estos aspectos comprenden:

- ✓ *Ahorro aparente:* en esta sección de la herramienta se permite calcular el costo de las pérdidas de calor en el proyecto comparando los casos de tener la tubería desnuda y la tubería aislada y calcular el ahorro aparente obtenido por medio de la implementación del aislamiento. Estos costos se expresan en dólares por año.

**Figura B-12.** Costos del Proyecto

Ahorro Aparente 		
Costo Desnuda	85857.91	USD/Año
Costo Aislada	3652.49	USD/Año
Ahorro	82205.42	USD/Año
Emisiones no generadas de CO2		
Combustible		
<ul style="list-style-type: none"> <li>CRUDO</li> <li>FUEL OIL</li> <li>GAS PROPANO</li> <li>CARBON</li> <li>GAS NATURAL</li> <li>ELECTRICIDAD</li> </ul>		
Emisión CO2	1130.0	TonCO2/año
Costo del Proyecto		
Chaqueta		
<ul style="list-style-type: none"> <li>ALUMINIO 0.4 mm</li> <li>ALUMINIO 0.5 mm</li> <li>ALUMINIO 0.7 mm</li> <li style="background-color: #007bff; color: white;">ALUMINIO 1 mm</li> </ul>		
Costo Aislante	9316.21	USD
Costo Chaqueta	10660.51	USD
Costo Total	19976.72	USD

Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.

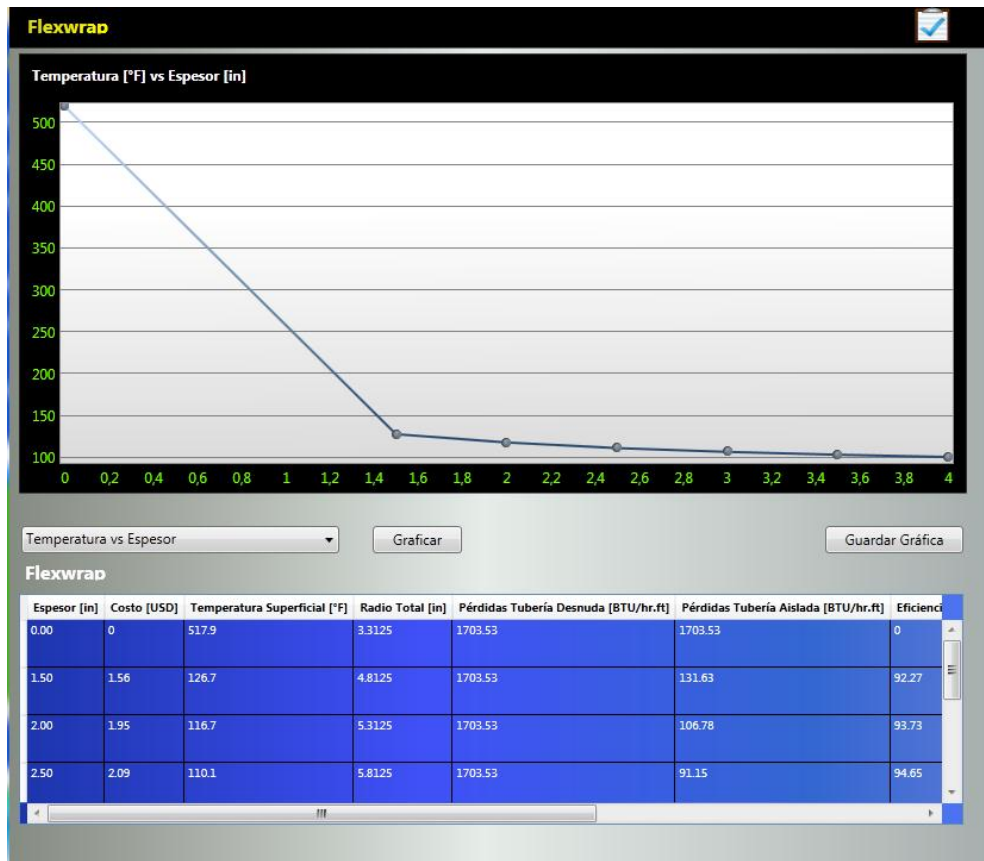
- ✓ *Emisiones no generadas de Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub>*: con la implementación del aislamiento se logra disminuir las pérdidas de energía, esto se traduce en ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera. Para calcular las toneladas de CO<sub>2</sub> que se dejan de emitir por año basta con seleccionar el tipo de combustible utilizado por el generador de vapor.
- ✓ *Costos del proyecto*: Los equipos que están siendo calentados, simultáneamente están perdiendo parte de ese calor que se les suministra, cediéndolo al medio ambiente que los rodea y que está a una temperatura inferior. Por medio de los aislamientos, las pérdidas de calor

por unidad de tiempo serán mucho menores y por lo tanto necesitará quemar menos combustible para producirlo y esto significa menor gasto de operación por hora, entonces el aislamiento representa una verdadera economía y se paga solo. Esta opción permite determinar el costo de implementación del material aislante incluyendo el valor de la chaqueta protectora y teniendo en cuenta un factor de seguridad de 10% extra para posibles eventualidades.

Asimismo, la tabla de resultados permite visualizar detalladamente los resultados para cada uno de los aislantes. Para hacerlo es necesario dar doble clic sobre el nombre del aislante sobre el cual se requieren más detalles. Una vez se ha hecho esto se accede a una nueva ventana mostrada en la figura B-13 donde se pueden observar los mismos resultados de tabla de resultados para cada uno de los espesores disponibles en el mercado para el aislante en estudio. Además permite observar estos resultados por medio de las siguientes opciones de graficas:

- ✓ Temperatura vs. Espesor
- ✓ Costo del Aislante vs. Espesor
- ✓ Calidad del vapor en cabeza de pozo vs. Espesor
- ✓ Perdidas de Energía vs. Espesor
- ✓ Perdidas de Energía vs. Radio Total

**FiguraBC-13.** Resultados por aislante



Fuente: OPTHICK. Grupo Recobro Mejorado. UIS.