

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA DETERMINACIÓN DE
LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LÍNEAS DE FLUJO DESDE SUPERFICIE A
FONDO DE POZO EN PROCESOS DE INYECCIÓN DE VAPOR**

**CARLOS ANDRÉS BERDUGO ARIAS
SANDRA JULIANA JARAMILLO MEDINA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA DETERMINACIÓN DE
LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LÍNEAS DE FLUJO DESDE SUPERFICIE A
FONDO DE POZO EN PROCESOS DE INYECCIÓN DE VAPOR**

**CARLOS ANDRÉS BERDUGO ARIAS
SANDRA JULIANA JARAMILLO MEDINA**

**Trabajo de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Directora
Astrid Xiomara Rodriguez Castelblanco
MSc. en Ingeniería de hidrocarburos**

**Codirector
Jaime José Martínez Vertel
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios por permitirme alcanzar este logro.

A mis padres por todo su apoyo, por su confianza y amor, sin ellos este logro no sería posible, gracias por ser mi ancla y ejemplo a seguir.

A mi hermana Paola por ser mi cómplice y consejera en todo momento. Por demostrarme que el amor va más allá de la distancia y la edad.

A mi mejor amiga Paula “Pe”, por sopórtame tantos años, por compartir tanto juntas, tantas risas, peleas y alegrías.

A Diego y Silvia por ser mi compañía y compañeros de batalla, las clases no hubieran sido lo mismo si no hubiéramos estado los 3 compartiendo mesa, hoy me siento muy agradecida de haberlos conocido y considerarlos unos de mis mejor amigos.

A Erika por demostrarme que el tiempo es mas allá que un número cuando se aprovecha al máximo, gracias por ser mi amiga y confidente incondicional.

A mi compañero Carlos sin el este logro no sería posible, gracias a el destino que nos unió y me permitió conocer el gran ser que eres sencillo e inteligente a la vez.

A mi familia SPE UIS: Victor, Jhon,, Fernando, Pablo ,Sergio y a los que me falta por nombrar por permitirme tener la dicha haber hecho parte de esta gran familia y demostrarme que la universidad va mucho más allá de lo académico.

Sandra Jaramillo M

DEDICATORIA

A mi madre, Leonor Arias, quien, con amor y comprensión infinita me acompañó en todo este proceso. Quien, moldeó en mi la persona y el profesional que soy.

A mi padre, Carlos Berdugo, quien me enseñó el valor del trabajo, el valor del compromiso y la responsabilidad. Quien me enseñó que, a pesar de todo, la familia siempre estará primero y quien, aunque limitado, con perseverancia, me ha enseñado el valor del crecimiento personal y a nunca rendirme. A mi padre, mi mayor admiración, mi modelo a seguir. A él, quien entregó todo a sus hijos

A mis abuelos, Verónica y Pablo, quienes han sido mi gran pilar.

A mis compañeros de SPE UIS Student Chapter: Victor, Jhon Enrique, Fernando, Henry, Eduardo, Pablo, Sergio, Genghini, Oscar, Valentina, Luis Felipe, Daniela, Paula, Camila, Danna, Stephanny. Con quienes tuve la oportunidad de aprender que la universidad es mucho más que una experiencia académica. Por haber encontrado en ellos una familia, mis amigos, e increíbles compañeros de trabajo.

A Sandra, la mejor compañera de tesis que pude tener, por su comprensión y paciencia, por ser una gran amiga y la mejor colega que pude desear.

A Maria Fernanda Espejo, gracias por estar allí. Gracias por su cariño y apoyo incondicional. Gracias por acompañarme siempre.

A aquellas personas que hicieron parte de este proceso: Laura Victoria, Viviana, Jessiel, Laura Olaya, Angie León, Laura González, Sonia, Felipe, Verónica. A todos ellos, gracias por creer en mí y gracias por lograr que yo también lo hiciera.

Carlos Andrés Berdugo

AGRADECIMIENTOS

A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** por formarnos de manera integral y permitirnos conocer el valor del esfuerzo en el desarrollo de todos nuestros proyectos. Además, por ser la plataforma para alcanzar nuestra meta.

Al **Grupo de investigación Recobro Mejorado** por creer en nosotros y darnos la oportunidad de crecer intelectualmente durante toda nuestra estadía. Por cada comentario y crítica constructiva que nos ayudó a mejorar como investigadores, gracias a la Ing Xiomara, al profe Samuel y todos los que integran este maravilloso y único equipo de trabajo.

A el **Ingeniero Jaime** por su tiempo, paciencia y guía durante el desarrollo del trabajo. Por sus consejos de incalculable valor para nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestra familia **SPE UIS STUDENTS CHAPTER** por permitirnos compartir tantos momentos juntos, por conocer diferentes personas y ayudarnos a ser unos profesionales integrarles, gracias por hacer de nuestro tiempo en la universidad algo inolvidable siempre estarán en nuestro corazón.

A todos aquellos que nos acompañaron durante este camino, aportando vivencias y enseñanzas que quedarán grabadas en nuestros corazones.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 20 |
| 1. CONCEPTOS TEÓRICOS..... | 21 |
| 1.1 INYECCIÓN DE VAPOR..... | 21 |
| 1.1.1 Propiedades de la roca y los fluidos | 23 |
| 1.1.2 Flujo de vapor en tuberías | 28 |
| 2. PERDIDAS TÉRMICAS Y MECÁNICAS | 33 |
| 2.2 PERDIDAS MECÁNICAS | 35 |
| 2.2.1 Beggs & Brill | 37 |
| 2.3 PERDIDAS TÉRMICAS | 43 |
| 2.3.1 Pérdidas en superficie..... | 44 |
| 2.3.2. Pérdidas de calor en el pozo..... | 47 |
| 3. PROGRAMA “LA CHALEUR” | 58 |
| 3.1 INTRODUCCIÓN | 58 |
| 3.2 VALIDACIÓN | 63 |
| 4. CONCLUSIONES | 74 |
| 5. RECOMENDACIONES..... | 76 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 77 |
| ANEXOS..... | 80 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Modelos representativos del flujo de fluidos en tuberías | 36 |
| Tabla 2. Patrones de flujo | 39 |
| Tabla 3. Términos adicionales holdup | 40 |
| Tabla 4. Términos factor de corrección..... | 40 |
| Tabla 5. Comparación de resultados..... | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Diagrama proceso general inyección de vapor | 22 |
| Figura 2. Línea de superficie | 30 |
| Figura 3. Flujo estratificado suave | 31 |
| Figura 4. Flujo estratificado Ondulado | 31 |
| Figura 5. Flujo tipo slug..... | 31 |
| Figura 6. Flujo tipo bache | 32 |
| Figura 7. Flujo Anular..... | 32 |
| Figura 8. Flujo tipo burbuja | 32 |
| Figura 9. Patrones de flujo Beggs y Brill | 38 |
| Figura 10. Sistema sección transversal | 45 |
| Figura 11. Flujo de calor en el pozo..... | 52 |
| Figura 12. Diagrama de flujo para la determinación de pérdidas de calor en superficie y fondo..... | 56 |
| Figura 13. Pantalla inicial..... | 58 |
| Figura 14. Creación de tramo de tubería en superficie..... | 59 |
| Figura 15. Creación de tramo de tubería en pozo..... | 60 |
| Figura 16. Creación de caso de simulación | 60 |
| Figura 17. Desarrollo de simulación..... | 61 |
| Figura 18. Generación de graficas..... | 62 |
| Figura 19. Creación tramo de tubería de superficie..... | 64 |
| Figura 20. Creación de caso de simulación..... | 64 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|-----------------------------------|-------------|
| Anexo A. Manual del usuario | 80 |

GLOSARIO

| | |
|-------------------------------------|--|
| α | Difusividad térmica, $\frac{ft^3}{hr}$ |
| β | Coeficiente de expansión térmica a presión constante, $\frac{1}{^{\circ}F}$ |
| B_a | Coeficiente de expansión volumétrica, $\frac{1}{^{\circ}F}$ |
| B_f | Coeficiente de expansión térmica del fluido en el espacio anular $\frac{\frac{vol}{^{\circ}F}}{^{\circ}F}$ |
| c | Coeficiente de expansión térmica a temperatura constante, $\frac{1}{psi}$ |
| C_f | Calor específico del fluido en el espacio anular, $\frac{Btu}{lb^{\circ}F}$ |
| C_L | Contenido del líquido, adimensional |
| C_p | Calor específico a presión constante $\frac{BTU}{lb^{\circ}F}$ |
| C_{pa} | Capacidad calorífica del aire, $\frac{BTU}{lb^{\circ}F}$ |
| C_v | Calor específico a volumen constante, $\frac{BTU}{lb^{\circ}F}$ |
| D | Diámetro interno de la tubería, ft |
| D | Difusividad térmica de la tierra |
| D_{ea} | Diámetro externo del aislante, ft |
| $\left(\frac{dP}{dZ}\right)_{Ele}$ | Diferencia en la presión hidrostática |
| $\left(\frac{dP}{dZ}\right)_{Fric}$ | Gradiente de presión debido a la fricción |
| E_{ae} | Emisividad del aislante, $\frac{Btu}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ |
| E_{ir} | Emisividad del cemento, $\frac{Btu}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ |
| E_K | Estima la pérdida de presión debido a la aceleración |

| | |
|---------------|---|
| $E_L(\theta)$ | Holdup del liquido |
| F_e | Factor de emisividad del arreglo |
| F_f | Factor de forma, en caso de los arreglos cilíndricos se ha determinado como la unidad |
| F_{NS} | Factor de fricción sin deslizamiento |
| F_{TP} | Factor de fricción de dos fases |
| Fr_m | Numero de Froude, adimensional |
| G | Aceleración de la gravedad = $4.17 \cdot 10^8$; $\frac{ft}{hr^2}$ |
| g | Aceleración de la gravedad |
| g_c | Constante gravitacional, $\frac{ft}{s^2}$ |
| $G.G$ | Gradiente geotérmico local en $\frac{^{\circ}F}{ft}$ |
| G_r | Números de Grapshop |
| h | Entalpia, $\frac{BTU}{lb}$ |
| h_i | Espesor total de la formación i en el pozo, ft |
| h_r | Coficiente de transferencia de calor para la radiación |
| ht | Espesor total entre la superficie y el tope de la formación, ft |
| K_a | Conductividad térmica del aire, $\frac{BTU}{hora \cdot pie \cdot ^{\circ}F}$ |
| K_{ais} | Conductividad térmica del aislante, $\frac{Btu}{ht \cdot ft \cdot ^{\circ}F}$ |
| K_f | Conductividad térmica del fluido en el espacio anular |
| K_i | Conductividad térmica de la formación i , $\frac{Btu}{ht \cdot ft \cdot ^{\circ}F}$ |
| K_t | Conductividad de la tierra, $\frac{Btu}{ht \cdot ft \cdot ^{\circ}F}$ |

| | |
|-------------|--|
| k_t | Conductividad térmica, $\frac{BTU}{ft \cdot hr \cdot ^\circ F}$ |
| L | Longitud de la línea de inyección |
| L_v | Calor latente de vaporización, $\frac{Btu}{lb_m}$ |
| μ_a | Viscosidad del aire, cP |
| μ_f | Viscosidad del fluido en el espacio anular, cp |
| μ_{NS} | Viscosidad de la mezcla sin deslizamiento, $\frac{lb}{ft \cdot s}$ |
| P | Presión sistema, psi |
| ρ | Densidad, $\frac{lb}{ft^3}$ |
| ρ_a | Densidad del aire, $\frac{lb}{ft^3}$ |
| ρ_f | Densidad del fluido en el espacio anular, $\frac{lb}{ft^3}$ |
| ρ_g | Densidad del gas, $\frac{lb}{ft^3}$ |
| ρ_m | Densidad de la mezcla, $\frac{lb}{ft^3}$ |
| ρ_{NS} | Densidad sin deslizamiento |
| ρ_{NS} | Densidad de la mezcla sin deslizamiento, $\frac{lb}{ft^3}$ |
| P_r | Números de Prant |
| ρ_l | Densidad del líquido, $\frac{lb}{ft^3}$ |
| Q | Flujo de calor, $\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F}$ |
| q | Tasa instantánea de pérdida de calor $\frac{Btu}{hr \cdot ft}$ |
| q_g | Flujo volumétrico de gas, $\frac{ft^3}{dia}$ |
| q_L | Flujo volumétrico de gas, $\frac{ft^3}{dia}$ |
| r_{ea} | Radio externo del aislante, ft |

| | |
|--------------------|--|
| r_{ep} | Radio externo de la tubería, ft |
| r_{ir} | Radio interno del revestidor, ft |
| r_{re} | Radio exterior del revestidor, ft |
| σ | Tensión superficial, $\frac{lb}{ft}$ |
| θ | Ángulo de inclinación de la tubería horizontal, radianes |
| T | Temperatura, °F |
| t | Tiempo de inyección, hr |
| \bar{T}_{anular} | Temperatura promedio en el anular, °F |
| T_{amb} | Temperatura ambiente, °F |
| T_{er} | Temperatura externa del revestidor, °F |
| T_s | Temperatura de saturación del vapor, °F |
| T_s | Temperatura del vapor, °F |
| T_t | Temperatura de la tierra, °F |
| ∇T | Gradiente de temperatura, °F |
| U | Coefficiente total de transferencia de calor |
| u | Energía Interna, BTU |
| v | Volumen del sistema, ft |
| V_{aire} | Velocidad del aire, $\frac{millas}{hr}$ |
| V_{iscC} | Viscosidad cinemática del aire = $\frac{V_{iscA}}{\rho_a}$, $\frac{ft^2}{hr}$ |
| v_m | Velocidad de la mezcla, $\frac{ft}{s}$ |
| V_{sg} | Velocidad del gas sin deslizamiento, $\frac{ft}{s}$ |
| V_{sl} | Velocidad de líquido sin considerar el deslizamiento, $\frac{ft}{s}$ |

- w_V Flujo másico de vapor, $\frac{lb}{hr}$
- X_{gen} Calidad del vapor a la salida del generador, adimensional
- Z Profundidad a la cual se desea calcular T_t en ft

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LÍNEAS DE FLUJO DESDE SUPERFICIE A FONDO DE POZO EN PROCESOS DE INYECCIÓN DE VAPOR*

**AUTOR: SANDRA JULIANA JARAMILLO MEDINA
CARLOS ANDRÉS BERDUGO ARIAS****

PALABRAS CLAVES: Software, generador, vapor pérdida de energía, estimación, pozo, pérdidas de presión.

DESCRIPCIÓN:

La base de este trabajo es el desarrollo de un software que permite la estimación de las pérdidas de energía experimentadas por el vapor a medida que se transporta desde el generador ubicado en la superficie hasta el fondo de pozo. El análisis realizado por la herramienta permite incorporar las pérdidas de energía debido a los fenómenos de transferencia de calor (convección, radiación, conducción), además de las pérdidas de presión, ocasionadas por la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería. Con el fin de realizar un análisis más preciso, se propone una metodología basada en el análisis del tiempo y espacio del proceso. Discretizando por una parte la longitud de la tubería y por otra, el tiempo de inyección.

En la primera fase, se consideró un proceso isoentálpico, es decir, no hay cambios en la entalpía, solo en la presión. A partir de esto, se realizó la determinación del cambio de presión a partir del uso de correlaciones de flujo multifásico. Se recalculo las propiedades termodinámicas del vapor con la presión nueva, y se comenzó con la segunda fase de cálculo en la cual se consideró que el proceso fue isobárico, es decir, la presión en el tramo de análisis será constante. Utilizando los datos antes determinados, se realizarán los cálculos de caída de entalpía debido a pérdidas de calor. Finalmente, se determina la calidad final del vapor para esta sección. Una vez establecido el algoritmo, se realizó la programación e implementación en lenguaje C#. A partir de esto, se obtuvo un paquete de software integrado que permite el diseño de tuberías, de aislamiento, y finalmente, la estimación de pérdidas de energía y presión en la línea de flujo.

* Trabajo de grado

** Escuela de Ingeniería de Petróleos. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Directora: Astrid Xiomara Rodríguez Castelblanco, Msc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Jaime José Martínez Vertel, Ingeniero de Petróleos.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A SOFTWARE TOOL FOR THE DETERMINATION OF HEAT LOSSES IN LINES OF FLOW FROM SURFACE TO WELL BACKGROUND IN STEAM INJECTION PROCESSES*

**AUTHOR: SANDRA JULIANA JARAMILLO MEDINA
CARLOS ANDRÉS BERDUGO ARIAS****

KEYWORDS: Software, generator, steam, energy loss, estimation, well, pressure losses.

DESCRIPTION:

The basis of this work is the development of a software that allows the estimation of the energy savings experienced by the steam as it is transported from the generator located on the surface to the bottom of the well. The analysis carried out by the tool allows the incorporation of energy losses due to the phenomena of heat transfer (convection, radiation, conduction), in addition to pressure losses, caused by friction between the fluid and the walls of the pipeline. In order to carry out a more precise analysis, a methodology based on discretization in time and space of the process is developed. Discretizing on one hand the length of the pipe and on the other, the injection time.

In the first phase, we will consider that the process is isenthalpic, explicitly there are no changes in the enthalpy, only in the pressure. From this, the determination of the pressure drop is made from the use of multiphase flow correlations. The thermodynamic properties of the steam are recalculated with the new pressure, and the second calculation phase will begin in which the process will be considered isobaric, that is, the pressure in the analysis section will be constant. Using the previously determined data, the enthalpy fall calculations will be performed due to heat losses. Finally, the final steam quality is determined for this section. Once the algorithm was established, the programming and implementation was performed in C # language. From this, an integrated software package was obtained that allows the design of pipes, insulation, and finally, the estimation of energy losses and pressure in the flow lines.

* Bachelor Thesis

** School of Petroleum Engineering. Faculty of Physicochemical Engineering. Director: Astrid Xiomara Rodriguez Castelblanco, Msc. in Hydrocarbon Engineering. Co-director: Jaime José Martínez Vertel, Petroleum Engineer.

INTRODUCCIÓN

La inyección de vapor es el método de recobro térmico con mayor aplicación a lo largo del mundo ¹. A partir de la inyección de vapor saturado al yacimiento, es posible reducir la viscosidad del crudo y con esto, mejorar las condiciones de movilidad. En torno a este concepto, diferentes variaciones de la técnica se han presentado conservando la esencia del método, tales como el SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage), CSS (Cyclic Steam Stimulation), entre otras, han aparecido con el fin de mejorar la eficiencia de la técnica y ampliar su aplicabilidad. Sin embargo, la esencia en cuanto al transporte del vapor al yacimiento y la evaluación de las pérdidas de energía que se sufren se ha mantenido relativamente constante. El vapor se genera en superficie y a través de líneas de flujo se transporta a fondo de pozo donde finalmente, es inyectado según parámetros operacionales. Se ha observado que las pérdidas de calor del vapor debido a la transferencia de este hacia su entorno son la principal fuente de la reducción de energía durante el proceso. Esto se debe a que estas pueden afectar directamente la entalpía del vapor, reduciendo su calidad. La magnitud de este efecto puede variar dependiendo de las condiciones de transporte o de la presencia o ausencia de un aislamiento térmico en la tubería. La transferencia de calor debido a la radiación, los efectos de la transferencia de calor por contacto y la transferencia de calor por convección pueden reducir en gran medida la energía del vapor. Sin embargo, las pérdidas de energía debidas a la fricción del fluido con las paredes de la tubería no deben ignorarse. Como la calidad del vapor se reduce como consecuencia de cambios de entalpía en la transferencia de calor, las caídas de presión darán lugar a cambios de temperatura y a incrementos de calidad. Por esta razón en este trabajo de grado se desarrolló una metodología que tiene en cuenta tanto las pérdidas por presión como por calor que sufre el vapor en su transporte con el objetivo de poder determinar sus propiedades finales como la calidad, la presión, entre otras.

¹ ZERKALOV, Georgy. Steam Injection for Enhanced Oil Recovery. [On line]. California: Stanford University. December 07 of 2015. Available in: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/zerkalov2/>

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1 INYECCIÓN DE VAPOR

El petróleo pesado en la actualidad es de gran interés para la industria petrolera, debido a la necesidad que se tiene por aumentar las reservas y así poder satisfacer la demanda energética que el mundo requiere; este petróleo se encuentra entre 10 y 20 °API y su viscosidad puede variar hasta los 10.000 cP en yacimiento a condiciones iniciales ². En consecuencia, sería difícil y poco rentable producirlo si no se toman algunas medidas para reducir la viscosidad para mejorar su movilidad.

Una de las propiedades más importantes que poseen estos hidrocarburos es que su viscosidad disminuye rápidamente con la temperatura, mejorando así su movilidad y en consecuencia aumentando su producción. En la actualidad, existen varias formas de lograr este objetivo, de las cuales se destaca la inyección de fluidos calientes, como agua caliente, vapor húmedo, vapor sobrecalentado, entre otros.

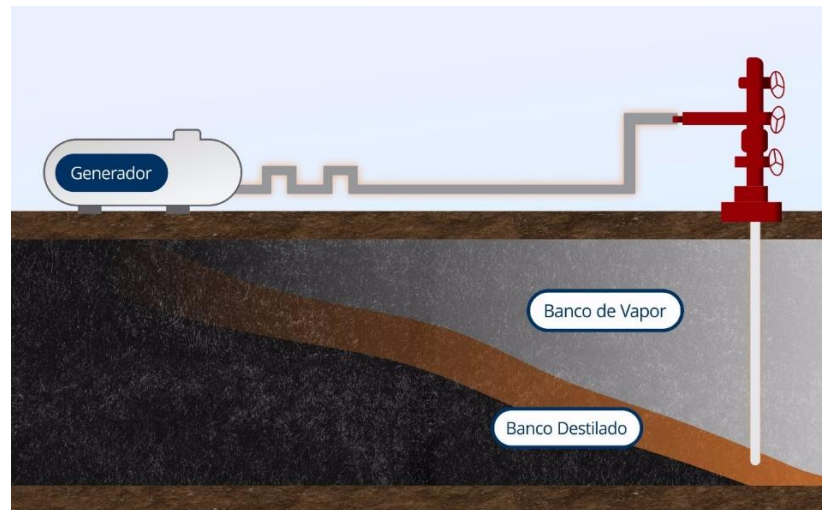
El método más utilizado en los últimos años es la inyección de vapor³ aunque esto no quiere decir que sea un proceso simple en absoluto. Para empezar, se genera vapor de altas presiones en los generadores de vapor, mientras tanto, se consume agua y combustible. Luego, el vapor se transporta a diferentes pozos de inyección con la ayuda de un complejo sistema de tuberías de superficie, es decir, el sistema de distribución de vapor y finalmente, durante el flujo de vapor desde la boca del pozo al fondo, una parte del calor se pierde desde el fluido hacia la formación circundante a través de la pared interior de la tubería, materiales aislantes, pared

² GREEN, Don & WILLHITE, Paul. Enhanced Oil Recovery. University of Kansas. Richardson, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 1998. ISBN: 978-1-61399-494-8

³ ZERKALOV, Georgy. Óp cit.

exterior del tubo, anillo de revestimiento, pared de revestimiento y cubierta de cemento, para que el resto del calor transportado por la mezcla vapor / agua llegue al fondo del pozo y luego ingrese al yacimiento para cumplir con su objetivo de calentar los fluidos y reducir su viscosidad, como se evidencia en la *figura 1*.

Figura 1. Diagrama proceso general inyección de vapor



Fuente: MANRIQUE ROJAS, Miguel Antonio. Estudio y modelado del flujo de vapor en líneas de transporte para procesos de recobro térmico. Tesis de Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2012.

En la inyección de vapor se evidencian factores que influyen en la calidad de energía que es suministrada al yacimiento, que será menor a la energía del vapor a la salida del generador. Dentro de los factores que influyen⁴ en la pérdida de energía del vapor se encuentra:

- Disposición de la tubería (enterrada, aérea)
- Accesorios en la línea (válvulas, tees, codos)
- Topografía del terreno
- Longitud de las líneas

⁴ MANRIQUE ROJAS, Miguel Antonio. Estudio y modelado del flujo de vapor en líneas de transporte para procesos de recobro térmico. Tesis de Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2012.

- Espesor y tipo de aislante (si lo tiene o no)
- Calidad del vapor (presión, temperatura)
- Tasa de inyección

Las pérdidas de energía del vapor están asociadas principalmente a la caída de presión al interior de la línea y la transferencia de calor del vapor con el medio que rodea la tubería. La reducción en la cantidad de energía que entrega el vapor debido a la caída de presión se ven relacionadas por la restricción del flujo con la fricción que genera el vapor con el interior de la línea, los cambios de dirección, el flujo másico inyectado y la transferencia de calor con el medio, la cual se ve afectada por la selección del aislamiento y la presencia o ausencia del mismo.

Los cálculos de caídas de presión y pérdidas de calor en las líneas de vapor y en el pozo, se hacen importantes debido que permiten seleccionar los diámetros adecuados de tuberías para inyectar el vapor en el yacimiento y diseñar los equipos de superficie y de subsuelo, de tal forma que los esfuerzos originados por la expansión térmica sean mínimos y que, al mismo tiempo, las pérdidas de calor se reduzcan. Con el fin de estimar estas pérdidas y lograr definir el uso de aislantes o implementar métodos que permitan reducirlas, es necesario conocer las propiedades de flujo y termodinámicas del vapor. A continuación, se ilustrarán algunas correlaciones empíricas desarrolladas para evaluar las propiedades físicas del vapor, agua y aire que se utilizaran en el desarrollo del programa; se debe tener presente el rango para el cual son propuestas para evitar errores elevados y, por consiguiente, poca precisión en los cálculos.

1.1.1 Propiedades de la roca y los fluidos. En el proceso de generación, transporte e inyección del vapor al yacimiento se ven involucradas diferentes variables que deben ser tenidas en cuenta en el diseño del transporte de vapor. Estas propiedades no solo abarcan las características del estado termodinámico del vapor, también incluyen características del generador, del medio ambiente, del

medio de transporte, así como variables operacionales. A continuación, se enuncian algunas de estas propiedades⁵.

- ***Calor Sensible***

Es la cantidad de calor que puede recibir un cuerpo y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular, ni su fase. La constante de proporcionalidad que representa la relación entre la masa, y el cambio de temperatura es denominada calor específico.

- ***Calor Latente***

Es la cantidad de calor necesario para realizar un cambio de fase. Se diferencian dos tipos de magnitudes según el cambio de fase. El calor latente de vaporización corresponderá a la cantidad de calor necesaria para convertir una masa de líquido a vapor completamente.

Por otra parte, el calor latente de fusión corresponderá a la cantidad de calor necesaria para convertir una masa de sólido completamente a líquido.

- ***Presión de Saturación***

También denominada presión de vapor corresponde a la presión a la cual, para determinada temperatura comenzará el cambio de fase de líquido a vapor. Hace referencia al valor de presión en el cual ambas fases (líquido y vapor) coexisten.

- ***Temperatura de Saturación***

Pertenece al valor de temperatura en el cual para una presión dada ambas fases (líquido y vapor) coexisten. La correlación propuesta por Farouq Ali ⁶

⁵ CENGEL, Yunus. Termodinámica. México: Editorial McGraw Hill, 2012. ISBN 9786071507433

⁶ FAROUQ, Ali. Current Status of Steam Injection as a Heavy Oil Recovery Methods. Petroleum Society of Canada. Vol 13. No. 01, 1974. p.1-15. Doi:10.2118/74-01-06.

$$T_s = 115.1P^{0,225} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Esta correlación es aplicada para rangos de presiones entre 10 y 3000 psi con un error de aproximación de menos del 2%.

- **Calidad del Vapor**

Corresponde a la relación másica de vapor con respecto a la cantidad total de fluido presente en la mezcla. Esto proporciona una medida de la cantidad de energía contenida en esta porción. Para procesos de inyección, se espera que la calidad del vapor no supere valores del 90%. De esta forma, se logra una mayor eficiencia energética y un mejor cuidado de los equipos.

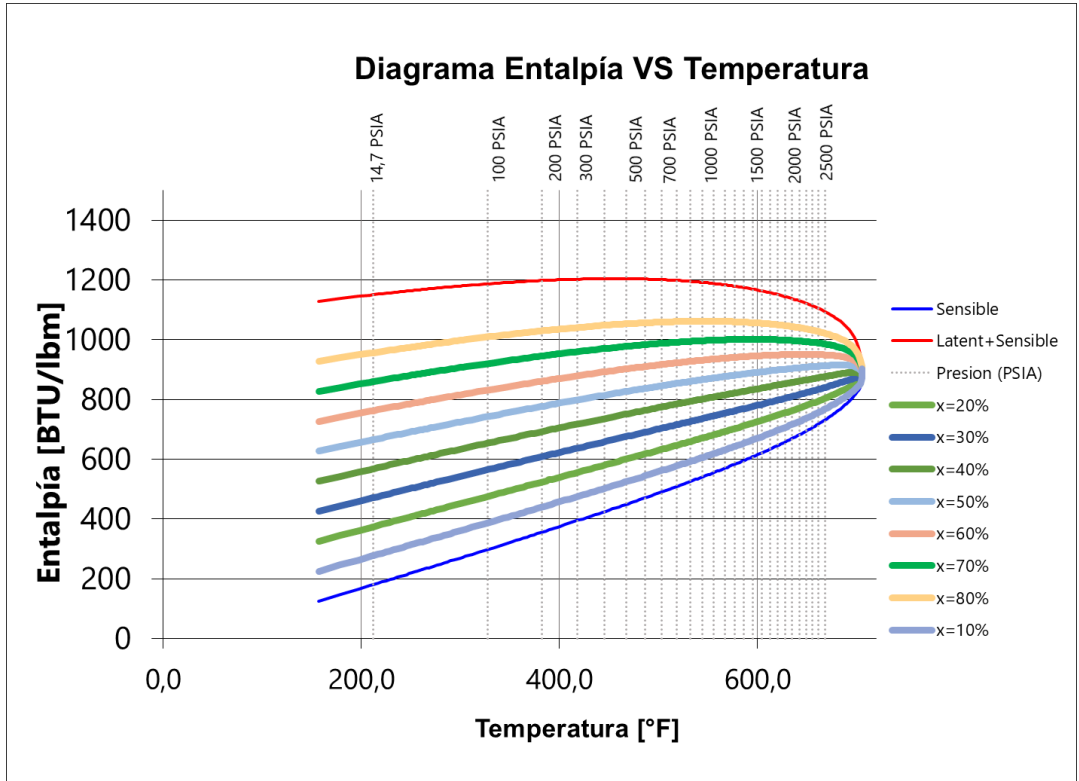
- **Entalpía**

Es la cantidad de energía térmica contenida en un material en una unidad de masa dada a una presión y temperatura de referencia.

$$h = e + pv \quad (\text{Ecuación 2})$$

Debido a que el vapor se encuentra en estado de saturación, sus propiedades estarán definidas a partir de un estado termodinámico gobernado por una de tres variables: temperatura, presión o volumen específico. En el caso del proceso de inyección de vapor, se tendrá control sobre la variable de presión, y esta determinará el valor de todas las otras propiedades termodinámicas. Una de estas propiedades será el calor sensible y calor latente del fluido. Si bien durante la mitad del proceso de análisis se considera que la cantidad de calor total es constante (Proceso isoentálpico), las proporciones entre calor latente y calor sensible no lo serán si la presión está cambiando (ver figura 2). De esta forma, aumentos en la presión ocasionarán una disminución en el calor latente, y un aumento en el calor sensible, en casos de caída de presión, ocurrirá el proceso contrario.

Figura 2. Grafica entalpia del vapor saturado



Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica. México: Editorial McGraw Hill, 2012.

- **Coefficiente de Expansión Térmica**

Consiste en la variación del volumen como resultado de un cambio en la temperatura a medida que la presión se mantiene constante. Se representa como:

$$\beta = \left(\frac{1}{V}\right) \left(\frac{\delta V}{\delta T}\right)_p \quad (\text{Ecuación 3})$$

De forma análoga al coeficiente de expansión térmica, se puede definir el coeficiente de expansión isotérmica en el cual, el fluido es sometido a cambios de presión mientras la temperatura se mantiene constante. Es decir:

$$c = -\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\delta V}{\delta P}\right)_T \quad (\text{Ecuación 4})$$

- **Capacidad Calorífica**

Se define como la energía necesaria para incrementar la temperatura de una unidad de masa de cierta sustancia un grado de la escala térmica. También se denomina calor específico. Tiene incidencia directa sobre la entalpía. Se diferencian dos tipos de magnitudes diferentes:

La primera de ellas es el calor específico a presión constante. Esta es una cantidad directamente relacionada con la entalpía.

$$C_p = \left(\frac{\delta h}{\delta T}\right)_P \quad (\text{Ecuación 5})$$

La segunda, corresponde al calor específico a volumen constante. Esta es una cantidad directamente relacionada con la energía interna.

$$C_v = \left(\frac{\delta e}{\delta T}\right)_V \quad (\text{Ecuación 6})$$

Según la sustancia puede tener una alta dependencia de la temperatura. Para el caso de vapor de agua, el valor se mantiene casi constante en un rango de 1 a 1.1 BTU/lbm hasta temperaturas de 400°F. A partir de esta temperatura, el valor crece de manera exponencial, alcanzando valores de 1.6 a temperaturas de 700°F.

- **Conductividad Térmica**

Es una constante proporcional que se relaciona con la cantidad de calor transferido a través de un área dada perpendicular al gradiente de temperatura bajo estado estacionario y en ausencia del movimiento de fluido o de partículas. Esta conductividad puede variar con la presión y la temperatura.

$$Q = -k_t \nabla T \quad (\text{Ecuación 7})$$

A partir de la definición de la conductividad térmica, es posible definir la difusividad térmica como la relación entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica.

$$\alpha = \frac{k_t}{\rho C_p} \quad (\text{Ecuación 8})$$

- **Viscosidad**

Corresponde a la resistencia de un fluido a la deformación debido a esfuerzos cortantes. En otras palabras, consiste en la resistencia de un fluido a fluir. En el caso de los fluidos en estado gaseoso como el vapor, esta resistencia tiende a ser bastante baja. No obstante, en fluidos en fase líquida tiene una alta incidencia en la energía requerida para transportar el fluido.

1.1.2 Flujo de vapor en tuberías. Una vez el vapor sea generado en superficie es necesario transportarlo hasta fondo de pozo a través de tuberías. El uso de vapor saturado permite una mayor facilidad de flujo que los casos en los que se hiciera uso de vapor sobrecalentado. Además, el uso de este reduce la incidencia de problemas operacionales asociados a la precipitación de sales y erosión de las paredes de la tubería. Por otra parte, en caso de usar vapor sobrecalentado la eficiencia energética del proceso se vería afectada drásticamente dado que la

entalpía de este depende altamente de la presión y temperatura y el consumo energético para aumentar esta propiedad es alto.⁷

El vapor inyectado a alta temperatura causa un incremento rápido y elevado de la temperatura tanto en los equipos del subsuelo como de superficie, originando elongaciones térmicas que causan cambios considerables en los esfuerzos uniformes del sistema; es por esto que las líneas de superficie y los dispositivos de control de flujo, se diseñan para entregar el vapor al yacimiento con base en las siguientes condiciones:

- Una tasa esperada en cada pozo inyector.
- Una presión esperada de operación del sistema.
- La calidad de vapor deseada para cada pozo inyector.

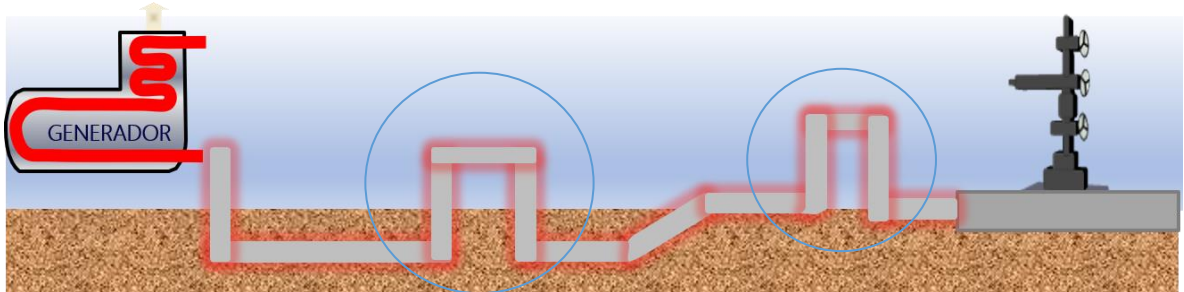
Al planear el diseño de las líneas, siempre deben tenerse en cuenta las posibles dilataciones térmicas, por esto, para conducir el vapor desde la superficie hasta la zona de inyección se utiliza una sarta de tubería de producción instalada en el pozo. Debido a que en la mayoría de los casos la tubería de revestimiento no es libre de elongación, es decir que no poseen ningún medio o dispositivo que le permita expandirse de acuerdo al incremento de temperatura, y la tendencia a elongarse es reemplazada por la creación de esfuerzos de compresión, en yacimientos en los cuales se requiere inyectar a alta presión, para prevenir fallas del revestidor originadas por esfuerzos térmicos y reducir al mínimo las pérdidas de calor, se utilizan sartas recubiertas con un aislante de silicato de calcio, el cual se protege con una camisa de acero.

En cuanto a las líneas de flujo, estas se utilizan para transportar el vapor desde la planta hasta el cabezal del pozo y deben diseñarse para soportar presiones y tasas altas de flujo con una gran variación de temperatura. Se

⁷ ALVARADO, Douglas & BANZÉR, Carlos. Recuperación térmica del petróleo. Caracas, 2002

coloca un lazo de expansión en la línea⁸ (ver figura 3), con el fin de reducir los esfuerzos causados por la expansión térmica. Además, las líneas se recubren con aislantes térmicos de silicato de calcio, magnesio, entre otros, con el fin de reducir al mínimo las pérdidas de calor.

Figura 3. Línea de superficie



Tomado: MANRIQUE ROJAS, Miguel Antonio. Estudio y modelado del flujo de vapor en líneas de transporte para procesos de recobro térmico. Tesis de Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2012.

- **Regímenes de flujo de vapor**

Según la dirección de flujo y la relación volumétrica entre la cantidad de líquido y gas presente en la corriente, pueden darse diferentes organizaciones para el flujo del vapor en la tubería. Según la existencia de cada uno de estos regímenes de flujo, la forma como la presión se verá reducida será diferente, afectando directamente las pérdidas de presión debido a la fricción, aceleración y altura. Estas pérdidas de presión tendrán una incidencia directa sobre las propiedades termodinámicas del vapor, reduciendo la temperatura y aumentando la calidad del mismo. Según la clasificación dada por Taitel & Duckler⁹ para un sistema de flujo de dos fases es posible identificar los siguientes regímenes:

⁸ MANRIQUE ROJAS, Miguel Antonio. Óp. cit.

⁹ TAITEL, Yehuda, BORNEA, Dvora & DUKLER: Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. AIChE Journal 26. N.º 6. May 1980. pp.345-354. Doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690260304>

- **Flujo Estratificado Suave**

Este flujo se dará principalmente a bajos caudales. La fase líquida fluirá en la parte baja de la tubería mientras la fase gaseosa se ubicará en la zona superior. La interfase ente los dos fluidos será homogénea.

Figura 4. Flujo estratificado suave



- **Flujo Estratificado Ondulado**

Con un mayor caudal, el flujo comenzará a tener picos y la interfaz de los fluidos se hará más inestable.

Figura 5. Flujo estratificado Ondulado



- **Flujo Intermitente**

Según la predominancia de la fase líquida o la fase gaseosa, el flujo puede ser de tipo bache o de tipo slug. El primero de los casos se dará con mayores concentraciones de líquido, y el segundo, bajo condiciones de mayor concentración de gas.

Figura 6. Flujo tipo slug



Figura 7. Flujo tipo bache



| | |
|--|--------------|
| | Fase líquida |
| | Fase gaseosa |

- **Flujo Anular**

También conocido como flujo anular/niebla, corresponde a una configuración en la cual la fase líquida forma una película alrededor de las paredes de la tubería y un centro gaseoso atraviesa la tubería a altas velocidades.

Figura 8. Flujo Anular

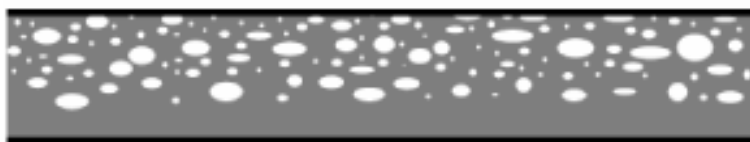


| | |
|--|--------------|
| | Fase líquida |
| | Fase gaseosa |

- **Flujo tipo Burbuja**

Con bajas concentraciones de gas y bajas presiones se formarán burbujas de gas que viajarán en el líquido como fase continua.

Figura 9. Flujo tipo burbuja



| | |
|--|--------------|
| | Fase líquida |
| | Fase gaseosa |

2. PÉRDIDAS TÉRMICAS Y MECÁNICAS

Numerosos avances se han presentado en el desarrollo de modelos que predigan la transferencia de calor y el cambio en la presión en procesos de inyección de vapor, uno de los pioneros en estudiar la transmisión de calor en el pozo fue Ramey¹⁰ en 1962 quien elaboró ecuaciones para estimar el perfil de temperatura en función de la profundidad y el tiempo para el flujo monofásico. Satter¹¹ en 1965 mejoró el enfoque de Ramey al considerar los efectos de la calidad, el coeficiente global de transferencia de calor y los cambios en las propiedades de los fluidos con la profundidad. Satter presentó ecuaciones para predecir el porcentaje de pérdida de calor para vapor sobrecalentado, vapor saturado o sub-saturado, descubrió que los principales factores que afectan la pérdida de calor son el tiempo de inyección, la velocidad, la presión y la profundidad. Para ilustrar estos efectos, Satter realizó una serie de estudios paramétricos. Se discutió la ventaja de usar vapor saturado sobre vapor sobrecalentado y se demostró el beneficio de usar un aislante para reducir la pérdida de calor.

Hoist & Flock¹² en 1966 mejoraron aún más el enfoque de Ramey y Satter al incluir la pérdida por fricción y los efectos de energía cinética. Hoist & Flock observaron que los perfiles de calidad y temperatura se alteraron significativamente por la inclusión de pérdidas por fricción.

Willhite¹³ en 1967 presentó un método iterativo para predecir el coeficiente global de transferencia de calor. Mostró que al considerar el mecanismo de transferencia

¹⁰ RAMEY. Wellbore Heat Transmission. Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. Vol. 14, No. 4. April 1962, pp. 427-435. Doi: <https://doi.org/10.2118/96-PA>

¹¹ SATTER, Abdus, Heat Losses During Flow of Steam Down a Wellbore. Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. Vol. 17, No. 7. July 1965, pp. 845-851. Doi: <https://doi.org/10.2118/66-04-05>

¹² HOIST & FLOCK. Wellbore Behavior During Saturated Steam Injection. Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 5, No. 4. Oct.-Dec. 1966, pp. 184-193. Doi: <https://doi.org/10.2118/66-04-05>

¹³ WILLHITE, Paul. Overall Heat Transfer Coefficients in Steam and Hot Water Injection Wells. Journal of Petroleum Technology, Vol. 19, No. 5. May 1967. pp. 607-615. Ponca City, Okla

de calor para la inyección de vapor en el pozo entre el fluido que fluye y la interfaz de formación de cemento, podría determinarse el coeficiente global de transferencia de calor. Willhite también presentó un método para calcular el coeficiente de transferencia de calor para la radiación a través del anular (h_r) y el coeficiente de transferencia de calor para la convección natural y la conducción en el anular (h_c)

Earlougher¹⁴ en 1969 aplicó una técnica similar a la de Satter para calcular las pérdidas de calor y las condiciones de fondo de pozo. Amplió el enfoque de Satter al incluir los efectos de los cambios de presión en la tubería de inyección y el efecto del tipo de cemento en el revestimiento en la transferencia de calor. Earlougher estudió los efectos de varios esquemas de finalización de pozos. Pudo demostrar la importancia de incluir el término de presión estática en el cambio de presión. También mostró que, al usar tubería aislada, la pérdida de calor podría reducirse significativamente. Earlougher concluyó que las propiedades de fondo del vapor son una función de las condiciones de inyección y terminación del pozo, y también enfatizó que el cambio de presión no puede ser descuidado en el cálculo de transferencia de calor de la inyección de vapor.

Pacheco & Farouq Ali¹⁵ en 1972 presentaron un análisis de las pérdidas de calor del pozo y la caída de presión para la inyección de vapor. En su modelo, el flujo de vapor se trató como un flujo bifásico perfectamente homogéneo. Los autores demostraron que un aumento de la tasa de inyección reducía la pérdida de calor e ilustraba que las pérdidas por fricción son importantes para determinar la presión, la calidad y la temperatura del vapor de fondo del pozo. Farouq Ali desarrolló un modelo matemático integral para simular el flujo vertical ascendente y descendente de vapor húmedo en un pozo.

¹⁴ EARLOUGHER, Robert. Some Practical Considerations in the Design of Steam Injected Wells. Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. Vol 21. No. 1. Jan. 1969, pp. 79-86. Doi: <https://doi.org/10.2118/2202-PA>

¹⁵ PACHECO, & FAROUQ, Ali. Wellbore Heat Losses and Pressure Drop in Steam Injection. Journal of Petroleum Technology. Vol. 24, No. 2. Feb. 1972, pp. 139-144. Doi: <https://doi.org/10.2118/3428-PA>

Fontanilla & Aziz ¹⁶en 1982 formularon un modelo matemático para predecir la pérdida de calor en el pozo, que incorpora correlaciones de flujo empíricas de dos fases. Utilizaron un enfoque similar al de Pacheco & Farouq Ali, pero investigaron otras tres correlaciones empíricas de dos fases. Estudiaron las correlaciones de Aziz et al ¹⁷ de 1972, Beggs & Brill¹⁸ de 1973 y Yamazaki & Yamaguchi ¹⁹ en 1979 encontraron que el uso de la correlación de Yamazaki & Yamaguchi para su modelo no arrojó resultados razonables y la caída de presión predicha utilizando la correlación de Aziz et al. Se encontró que solo la correlación de Beggs & Brill predecía con un margen de error menor cuando se comparaba con datos de campo limitados.

2.2 PÉRDIDAS MECÁNICAS

La caída de presión total en una línea de vapor es la suma de las caídas de presión originadas por fricción, aceleración y gravedad²⁰:

$$\Delta P_t = \Delta P_{fricción} + \Delta P_{aceleración} + \Delta P_{gravedad} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En algunas áreas en las que el terreno es prácticamente plano, las caídas de presión por gravedad (gradiente estático) son despreciables. Si se considera la caída de presión por aceleración también despreciable, la ecuación se reduce a:

$$\Delta P_t = \Delta P_{fricción} \quad (\text{Ecuación 10})$$

¹⁶ FONTANILLA, Jerry & AZIZ, Khalid. Prediction of Bottomhole Condition for Wet Steam Injection Wells. Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 21. No. 2. Mar.-Apr. 1982, pp. 82-88. Doi: <https://doi.org/10.2118/82-02-04>

¹⁷ Ibid. pp. 82-88.

¹⁸ BEGGS, & BRILL, James. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. Journal of Petroleum Technology. Vol 25. No. 5. May 1973, pp. 607-617. Doi: 10.2118/4007-PA

¹⁹ YAMAZAKI, Yasaburo & YAMAGUCHI, Katsuji. Characteristics of Concurrent Two- Phase Downflow in Tubes. Journal of Nuclear Science and Technology. April 01 of 1979, Vol. 16, No. 4, pp. 245-255.

²⁰ OLMOS TORRES, Tobias Ricardo. Herramienta software para predecir el comportamiento de la presión y perdidas de calor a traves de tuberías en procesos de inyección de vapor. Tesis de grado, en mención a Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas, 2002.

Como el flujo de vapor en estas tuberías de transporte se realiza en flujo bifásico, mezcla entre la fase gaseosa y líquida, esta condición complica enormemente los cálculos de caída de presión. Esto se le atribuye al hecho de que se deben tener en cuenta las propiedades de cada fluido presente, además de considerar las interacciones entre cada fase. Es necesario usar las propiedades de la mezcla y, por lo tanto, determinar las fracciones de volumen de gas y líquido *in situ* a lo largo de la tubería. El cálculo de la diferencia de presión hidrostática se modifica definiendo una densidad de mezcla. Esto se determina mediante un cálculo de retención de líquido *in situ* (cantidad de líquido en la sección de tubería). Algunos modelos encontrados en la literatura determinan el tipo de flujo basados en patrones de flujo definidos.

Tabla 1. Modelos representativos del flujo de fluidos en tuberías

| Modelo | Flujo Horizontal | Flujo Vertical | Holdup de Líquido | Mapa de Flujo |
|-----------------------------|------------------|----------------|-------------------|---------------|
| Aziz, Govier & Fogarasi | No | Si | Si | Si |
| Beggs & Brill (1973 , 1979) | Si | Si | Si | Si |
| Duns & Ros | No | Si | Si | Si |
| Hagedorn & Brown | No | Si | Si | No |
| Olgas | Si | Si | Si | Si |
| Orkisewski | No | Si | Si | Si |
| Tulsa | No | Si | Si | Si |

Fuente: Pipesim: Manual de Usuario, HYSYS: Manual de Usuario

En la tabla 1 se presentan las aplicaciones de los diferentes modelos encontrados. La correlación de Beggs & Brill fue la seleccionada para realizar el estudio debido principalmente su excelente aproximación en la predicción de los fenómenos de transporte sufridos por el agua, puesto que a la hora de su creación los autores utilizaron este fluido para su estudio, caso contrario a las demás correlaciones que en la que el estudio se basó en fluidos como el aceite y/o el gas.

2.2.1 Beggs & Brill²¹. La correlación de Beggs & Brill es aplicable para un amplio rango de condiciones de flujo. Los autores llevaron a cabo investigaciones sobre flujo bifásico, realizando una variación en el ángulo de inclinación de las tuberías empleadas en las pruebas, de -90° a +90°. Para cada diámetro de tubería, los volúmenes de líquido y gas variaban, por lo que se pudieron observar todos los patrones de flujo cuando la tubería estaba en posición horizontal. Una vez establecido cada patrón de flujo, procedieron a variar el ángulo de inclinación, así que se pudo observar como el ángulo de inclinación afectaba el holdup (la fracción volumétrica de una sección específica de tubería que es ocupada por la fase líquida) y el gradiente de presión. El holdup y el gradiente de presión fueron medidos en ángulos que variaban entre 5, 10, 15, 20, 35, 55, 75 y 90 grados, y se encontró que el holdup llegaba a su valor máximo en +50 grados y a su valor mínimo en -50 grados. El mapa de patrones de flujo original que obtuvieron Beggs & Brill fue ligeramente modificado (*ver figura 10*) para poder incluir la zona de transición entre el patrón de flujo segregado y el intermitente. Como resultado de los experimentos, obtuvieron una ecuación generalizada, que puede ser utilizada para el cálculo de los gradientes de presión en tuberías verticales en las que exista flujo multifásico, siendo útil también para las tuberías horizontales.

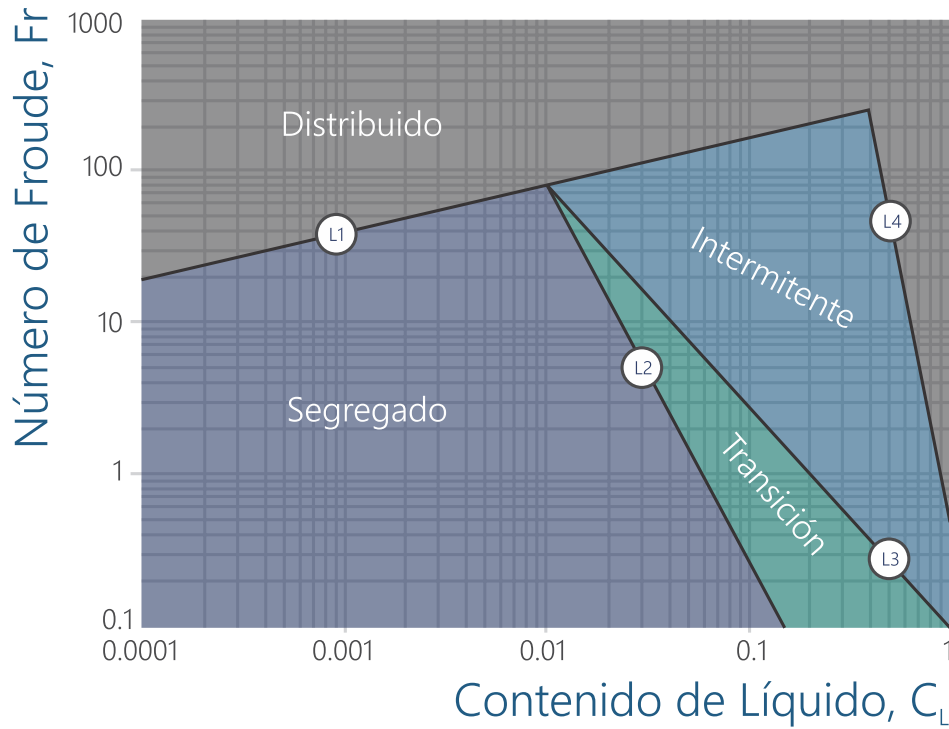
El gradiente de presión total se describe en la siguiente relación

$$\frac{dP}{dZ} = \frac{\left[\left(\frac{dP}{dZ} \right)_{Fric} + \left(\frac{dP}{dZ} \right)_{Ele} \right]}{(1 - E_K)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Para realizar la terminación de estas pérdidas presentes en el transporte, a continuación, se presentará un flujo de cálculo que los autores crearon para ayuda a los usuarios a obtener las variables de entrada de ecuaciones principales para el cálculo de los diferentes tipos de pérdidas.

²¹ BEGGS, & BRILL, James. Óp. cit. pp. 607-617.

Figura 10. Patrones de flujo Beggs y Brill



Fuente: BEGGS, & BRILL, James. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. Journal of Petroleum Technology. Vol 25. No. 5. May 1973, pp. 607-617. Doi: 10.2118/4007-PA

- **Metodología de cálculo**

Inicialmente se identifica el régimen de flujo en el cual se encuentra el fluido a evaluar, en este caso el vapor. Este es determinado con base a el número de Froude de la mezcla, el contenido del líquido en la entrada y las líneas de transición del patrón de flujo.

- **Froude de la mezcla**

$$Fr_m = \frac{v_m^2}{gD} \quad (\text{Ecuación 12})$$

- Contenido del líquido en la entrada

$$C_L = \frac{q_L}{q_g + q_L} \quad (\text{Ecuación 13})$$

- Líneas de transición

$$L_1 = 316 C_L^{0,302} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$L_2 = 0,0009252 C_L^{-2,4684} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$L_3 = 0,1 C_L^{-1,4516} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$L_4 = 0,5 C_L^{-6,738} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Con base en los valores obtenidos para estas variables se procede a seleccionar el tipo de flujo que cumpla con las condiciones establecidas para cada régimen.

Tabla 2. Patrones de flujo

| Tipo de flujo | Condición |
|---------------------|--|
| Flujo Segregado | $C_L < 0,01$ y $Fr_m < L_1$ ó $C_L \geq 0,01$ y $Fr_m < L_2$ |
| Flujo Intermitente | $0,01 \leq C_L < 0,4$ y $L_3 < Fr_m \leq L_1$ ó $C_L \geq 0,4$ y $L_3 < Fr_m \leq L_4$ |
| Flujo distribuido | $C_L < 0,4$ y $Fr_m \geq L_4$ ó $C_L \geq 0,4$ y $Fr_m > L_4$ |
| Flujo de transición | $L_2 < Fr_m < L_3$ |

- **Holdup del líquido**

Una vez realizado el paso anterior, lo siguiente es determinar el holdup ($E_L(\theta)$) de líquido, para tuberías con inclinación este término está en función del ángulo de inclinación.

$$E_L(\theta) = \frac{aC_L^b}{Fr_m^c} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Tabla 3. Términos adicionales holdup

| Régimen de flujo | A | B | C |
|------------------|-------|--------|--------|
| Segregado | 0,98 | 0,4846 | 0,0868 |
| intermitente | 0,845 | 0,5351 | 0,0173 |
| Distribuido | 1,065 | 0,5824 | 0,0609 |

El $E_L(\theta)$ debe ser mayor que C_L , si $E_L(\theta)$ es más pequeño que C_L entonces $E_L(\theta)$ se le asigna un valor de C_L que cumpla con esa condición. La fracción de volumen de líquido actual se obtiene multiplicando $E_L(\theta)$ por el factor de corrección, $B(\theta)$

$$E_L(\theta) = B(\theta) \times E_L(\theta) \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde $B(\theta)$ se obtiene:

$$B(\theta) = 1 + \beta \left(\sin(1.8 * \theta) - \left(\frac{1}{3}\right) \sin^3(1.8 * \theta) \right) \quad (\text{Ecuación 19})$$

β = es un factor de corrección que se calcula de la siguiente manera:

$$\beta = (1 - C_L) \ln(d * C_L^e * N_{lv}^f * Fr_m^g) \quad (\text{Ecuación 20})$$

Tabla 4. Términos factor de corrección

| Up hill | D | e | f | G |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|
| Segregado | 0,011 | -3,768 | 3,539 | -1,614 |
| Intermitente | 2,96 | 0,305 | -0,4473 | 0,0978 |
| Distribuido | $\beta = 0$ | | | |
| Down hill | D | e | f | G |
| Todos | 4,7 | -0,3692 | 0,1244 | -0,5056 |

• **Para flujo de transición:**

$$E_L(\theta)_{\text{transición}} = A E_L(\theta)_{\text{segregación}} + B E_L(\theta)_{\text{intermitente}} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde A Y B términos adicionales para el cálculo y se determinan de la siguiente manera:

$$A = \frac{(L_3 - Fr_m)}{(L_3 - L_2)} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$B = 1 - A \quad (\text{Ecuación 23})$$

Posteriormente se procede a calcular los siguientes términos:

- **Velocidad del líquido, N_{lv}**

$$N_{lv} = 1,938 V_{sl} \left(\frac{\rho_l}{g * \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Ecuación 24})$$

- **Densidad de la mezcla**

$$\rho_m = \rho_L \cdot E_L(\theta) + \rho_g \cdot (1 - E_L(\theta)) \quad (\text{Ecuación 25})$$

- **Gradiente de elevación**

El cambio de presión debido a la cabeza hidrostática del componente vertical de la tubería viene dado por:

$$\left(\frac{dP}{dZ} \right)_{\text{Ele}} = \frac{\rho_m \cdot g \cdot \sin \theta}{144 \cdot g_c} \quad (\text{Ecuación 26})$$

- **Gradiente de fricción**

Se determina el número de Reynolds sin deslizamiento usando la densidad de la mezcla sin deslizamiento y la viscosidad.

$$Re_{NS} = \frac{\rho_{NS} \cdot v_m \cdot D}{\mu_{NS}} \quad (\text{Ecuación 27})$$

- **Factor de fricción sin deslizamiento**

El cálculo del factor de fricción sin deslizamiento se determinará usando la ecuación de Colebrook- White ²².

Inicialmente se establece la relación entre los factores de fricción:

$$\frac{F_{TP}}{F_{NS}} = e^S \quad (\text{Ecuación 28})$$

El valor de S está gobernado por las siguientes condiciones:

$$S = \ln(2.2y - 1.2) \quad (\text{Ecuación 29})$$

Si $1 < y < 1.2$, de lo contrario

$$S = \frac{\ln(y)}{(-0,0523 + 3,182 \ln(y) - 0,8725(\ln(y))^2 + 0,01853(\ln(y))^4)} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde:

$$y = \frac{C_L}{E_l(\theta)^2} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Finalmente, las pérdidas de presión por fricción están dadas por:

$$\left(\frac{dP}{dZ}\right)_{\text{fric}} = \frac{2 \cdot F_{TP} V_m^2 \rho_{NS}}{144 \cdot g_c \cdot D} \quad (\text{Ecuación 32})$$

²² WHITE, Frank. Mecánica de Fluidos. Editorial McGraw-Hill. Sexta Edición, 2008.

- **Presión por la aceleración**

Las pérdidas de presión por la aceleración, el factor E_K esta dado por:

$$E_K = \frac{\rho_m \cdot V_m \cdot V_{sg}}{g_c \cdot P} \quad (\text{Ecuación 33})$$

2.3 PÉRDIDAS TÉRMICAS

Dada la diferencia de temperatura existente entre el agua caliente, vapor, y el medio ambiente que rodea las líneas de superficie (líneas que transportan el fluido caliente hasta el cabezal del pozo) y la tubería de inyección, parte del contenido de calor del fluido que fluye se pierde antes de llegar a la formación. Es importante cuantificar cuanto calor se pierde y tratar de reducir estas pérdidas a un valor mínimo.

Para poder hablar de pérdidas de calor se hace necesario conocer los mecanismos de transferencia de calor, los cuales se enuncian a continuación:

- **Conducción**

Basado en la ley cero de la termodinámica, la transferencia de calor se dará en dirección desde el cuerpo más caliente al cuerpo más frío; así mismo, esta transferencia puede hacer parte de difusión térmica dentro del mismo cuerpo, considerando una transferencia de calor interna entre zonas de alta a zonas de baja temperatura.

- **Convección**

Es la transferencia de calor desde una superficie hacia un fluido en movimiento (o del fluido hacia la superficie) en contacto con ella, o de una parte de un fluido con velocidad a mayor temperatura hacia otra parte del mismo fluido a menor temperatura. Si el movimiento del fluido se debe a la aplicación de alguna fuerza

(bomba, abanico, etc.), se dice que existe convección forzada. Pero si este cambio se debe a diferencia de densidades debido a que los fluidos se encuentran a distintas temperaturas, se dice que hay convección libre.

El mecanismo de convección es realmente una combinación de conducción y radiación, influenciada por el movimiento del fluido.

- **Radiación**

Cuando dos cuerpos de temperaturas diferentes están separados por un vacío perfecto, no es posible la transferencia de calor por conducción o convección; en tal caso, la transferencia de calor ocurre mediante radiación térmica, es decir, la energía radiante emitida por un cuerpo, debido a su temperatura, es transmitida en el espacio en forma de ondas electromagnéticas. De esta forma el cuerpo con mayor temperatura emite más energía que la que absorbe y el cuerpo con menor temperatura absorbe más que la que irradia. Si el cuerpo es un emisor y receptor perfecto de energía, es decir, toda la energía que absorbe la refleja, se denomina cuerpo negro. Si no cumple con la anterior característica o las superficies no se encuentran totalmente rodeadas de un aislante, tendrá un factor de emisividad.

2.3.1 Pérdidas en superficie. Cuando se habla de pérdidas de calor que sufre el vapor ubicado en tuberías en superficie se considera que en este tipo de pérdidas están incluidos los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Su magnitud depende de la longitud de tubería y su diámetro, de la naturaleza y espesor del aislante, y de la temperatura del fluido caliente en la línea y del medio ambiente que la rodea.

- **Metodología de cálculo**

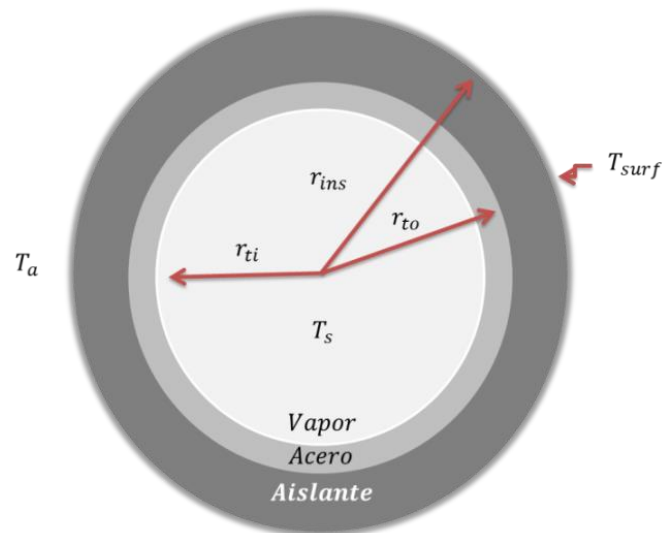
Inicialmente se estudiará el fenómeno de transferencia de calor para el trayecto comprendido entre el generador y la cabeza del pozo para posteriormente analizar el recorrido del vapor desde el cabezal de pozo hasta la cara de la formación a estimular.

Considérese el sistema ilustrado (figura 11) el cual presenta la sección transversal de una tubería de radio interno r_{ti} (ft), radio externo r_{to} (ft), a través de la cual está fluyendo vapor a la temperatura T_s (°F) ²³. La tubería puede o no estar aislada, si está aislada el radio exterior será r_{ins} (ft). La temperatura en la superficie exterior de la tubería (desnuda o aislada) será T_{surf} (°F) y la temperatura ambiente será T_a (°F).

Los mecanismos de transferencia son:

- Del fluido en movimiento a la pared interna de la tubería existe convección forzada.
- A través de la tubería (acero) existe conducción.
- A través del aislante existe conducción.
- Del aislante hacia el medio ambiente existe convección y radiación.

Figura 11. Sistema sección transversal



Fuente: ALVARADO, Douglas & BANZÉR, Carlos. Recuperación térmica del petróleo. Caracas, 2002

²³ ALVARADO, Douglas & BANZÉR, Carlos. Óp cit.

Para iniciar con la metodología de cálculo se debe realizar la suposición de una temperatura externa del aislante, se recomienda empezar con un promedio entre la temperatura ambiente y la temperatura de inyección del vapor.

$$T_{ae} = \frac{T_{amb} + T_s}{2} \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (\text{Ecuación 34})$$

Se determina una temperatura promedio para realizar los cálculos posteriores

$$\bar{T} = \frac{T_{ae} + T_{amb}}{2} \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (\text{Ecuación 35})$$

Una vez realizado este cálculo se procede a terminar las propiedades del aire mediante las correlaciones propuesta por Keyes Eckert & Drake²⁴ a la temperatura promedio.

- **Conductividad térmica (K_a):** Capacidad de un material para conducir el calor.

$$K_a = 0,01328 + 2,471x10^{-5}\bar{T} - 4,247x10^{-9}\bar{T}^2 \quad (\text{Ecuación 36})$$

- **Densidad (ρ_a):** Relación entre la masa y el volumen de un fluido.

$$\rho_a = 0,0771 - 8,848x10^{-5}\bar{T} - 3,744x10^{-8}\bar{T}^2 \quad (\text{Ecuación 37})$$

- **Viscosidad dinámica (μ_a):** Medida de la resistencia que ofrece un fluido sometido a un esfuerzo.

$$\mu_a = 0,0400 + 6,155x10^{-5}\bar{T} - 1,220x10^{-8}\bar{T}^2 \quad (\text{Ecuación 38})$$

²⁴ ECKERT & DRAKE, Robert. Heat and Mass Transfer. New York: Editorial McGraw-Hill. Segunda Edición, 1950. ISBN: 978-0070189256

- **Capacidad calorífica a presión constante (C_{pa}):** es la capacidad que tiene la unidad de masa para almacenar calor cuando su temperatura aumenta en una unidad

$$C_{pa} = 0,2382 + 1,390 \times 10^{-5} \bar{T} + 1,027 \times 10^{-8} \bar{T}^2 \quad (\text{Ecuación 39})$$

- **Coefficiente de expansión volumétrica (B_a):** Representa la variación del volumen de la misma masa de fluido al aumentar su temperatura en una unidad.

$$B_a = 0,0024 - 0,757 \times 10^{-5} \bar{T} + 0,169 \times 10^{-7} \bar{T}^2 - 0,148 \times 10^{-10} \bar{T}^3 \quad (\text{Ecuación 40})$$

Las ecuaciones anteriores son válidas en el rango de 0° a 1000°F, excepto para la ecuación 40, la cual solo es válida de 0° a 500°F

- **Coefficiente de convección**

Para lograr determinar este coeficiente se debe identificar qué clase de convección se trabajará en el caso de estudio, se tienen dos opciones: se trabaja con convección natural o convección forzada.

- **Convección natural**

Se considera convección natural si el movimiento del fluido es ocasionado por fuerzas de empuje debidas a diferencias de densidad causadas por diferencias de temperatura en el fluido.

$$h_{ca} = 0,53 \frac{K_a}{D_{ea}} \left[\frac{D_{ea}^3 (T - T_{amb}) (G * B_a * C_{pa} * V_{iscA})}{V_{isc}^2 * K_a} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Ecuación 41})$$

- **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 natural.

✚ Si $1 < V_{aire} * 8.8 * D_{ea} \leq 50$ se considera convección forzada, caso 1:

$$h_{ca} = 19.3 C_{pa} \frac{(\rho_a * V_{aire})^{0,6}}{D_{ea}^{0,4}} \quad (\text{Ecuación 42})$$

✚ Si $V_{aire} * 8.8 * D_{ea} > 50$ se considera convección forzada, caso 2:

$$h_{ca} = 8,02339 \frac{K_a}{D_{ea}} \left(\frac{5,28 * \rho_a * V_{aire} * D_{ea}}{\mu_a} \right) \quad (\text{Ecuación 43})$$

- **Coeficiente de Radiación**

El coeficiente de radiación está en función diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y el aislante, así como con el factor de forma de la tubería (F_f) y factor de emisión (F_e).

$$h_r = 0,1714 * 10^8 F_e * F_f * (T_e^2 + T_{amb}^2)(T_e - T_{amb}) \quad (\text{Ecuación 44})$$

El factor de emisión de una superficie cilíndrica caliente hacia la atmosfera se supone que: $F_e = e_{pe}$, emisividad del área externa de la tubería o el aislante. La emisividad de las tuberías normalmente usadas en petróleos es de

aproximadamente 0,9. Si estas superficies se pintan con pintura de aluminio, su emisividad puede bajar aproximadamente a 0,3.

- **Coeficiente total de transferencia de calor**

Este coeficiente se determina evaluando los mecanismos de transferencia de calor actuando en un determinado sistema. Para propósitos prácticos y debido a que el coeficiente de conducción cuando se trabaja con fluidos como el vapor o agua caliente tiene una baja contribución, su valor será despreciado; en estos términos el coeficiente total este definido por:

$$U = \left[\frac{r_{ae} \ln \frac{r_{ae}}{r_{pe}}}{K_a} + \frac{1}{h_{ca} + h_r} \right]^{-1} \quad (\text{Ecuación 45})$$

Una vez obtenido este coeficiente se puede realizar el cálculo de la tasa de pérdidas de calor:

$$q = 2\pi r_{ae} U (T_s - T_{amb}); \frac{Btu}{hr - ft} \quad (\text{Ecuación 46})$$

Ahora se determina una temperatura externa del aislante o tubería, si esta no es la misma que la supuesta inicialmente en la ecuación 34, el proceso inicia otra vez. En este caso utilizando como nueva temperatura la calculada en la ecuación 47 hasta que estas dos tengan un error de aproximación del 0,5%.

$$T_{ae} = T_f - \frac{q * \ln \frac{r_{ae}}{r_{pe}}}{2\pi K_a} \quad (\text{Ecuación 47})$$

- **Calidad de vapor**

Una vez terminado el proceso de iteración del paso anterior y con los datos encontrados a esta temperatura, se puede obtener una estimación de la calidad del vapor que llegará a la cabeza del pozo.

$$X_c = X_{gen} - \frac{q * L}{w_V L_v} \quad (\text{Ecuación 48})$$

2.3.2 Perdidas de calor en el pozo. El diseño de pozos de inyección de agua caliente o vapor requiere de la estimación de la temperatura del revestidor, lo cual a su vez requiere de una estimación de la tasa de pérdidas de calor.

Existen varios métodos para calcular las pérdidas de calor en un pozo de inyección, la mayoría de los cuales se basan en las siguientes suposiciones:

- a. El vapor se inyecta por la tubería de producción a temperatura, presión, tasa y calidad constante.
- b. Dentro de la tubería de producción los cambios de energía cinética y potencial, así como las pérdidas por fricción son despreciables. Esta suposición implica que, si el vapor no pierde calor suficiente para condensarse, la temperatura de la tubería de producción permanecerá constante a través de toda su longitud y será igual a la temperatura del vapor en la superficie.
- c. El gradiente geotérmico puede despreciarse y la temperatura de la tierra puede considerarse igual al promedio aritmético, es decir que la temperatura en la superficie, más la mitad del aumento de temperatura a la formación de interés.

d. Las conductividades y difusividades térmicas de la tierra en la región del pozo, se consideran constantes.

- **Método de Willhite**

De los métodos o procedimientos basados en las suposiciones anteriores, el método de Willhite es posiblemente el más riguroso y de fácil aplicación. Este se fundamenta en el uso de un coeficiente de transferencia de calor total (U_{to}) para un sistema formado por el espacio anular, las tuberías de inyección y revestimiento, el cemento y el aislante en caso que exista (*Figura 12*).

Las expresiones de U_{to} dadas por las ecuaciones fueron desarrolladas considerando los siguientes mecanismos de transferencia de calor:

- Convección forzada desde el vapor hacia la superficie interna de la tubería de inyección.
- Conducción a través de las paredes de la tubería de inyección y de revestimiento, del aislante y del cemento.
- Convección libre y radiación en el espacio anular.

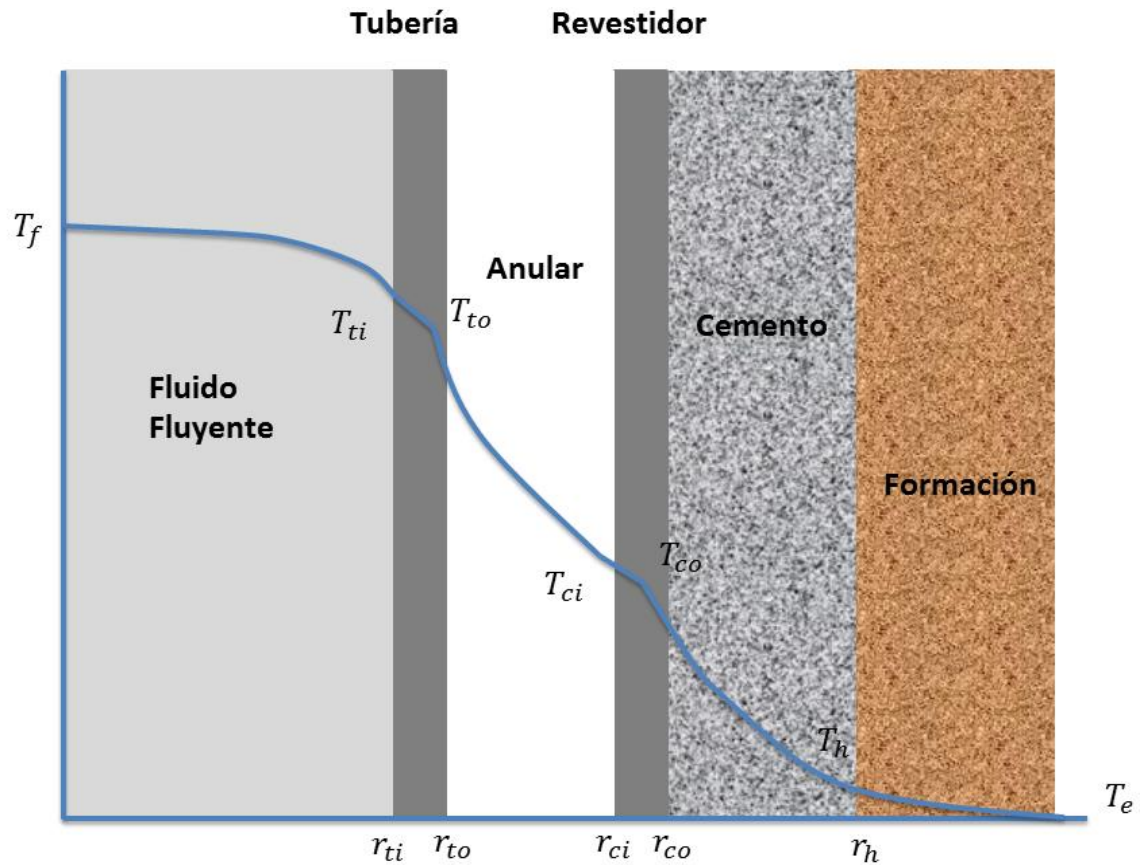
Y se basa en las siguientes suposiciones:

- El fluido se inyecta por la cabeza del pozo y a través de la tubería de inyección a tasa, temperatura, presión y calidad constantes, lo cual constituye un proceso de flujo continuo.
- La temperatura de la tierra se considera constante e igual al promedio entre la temperatura en superficie y la temperatura a la profundidad Z de modo que:

$$T_t = T_{amb} + \frac{(G \cdot G) * Z}{2} \quad (\text{Ecuación 49})$$

- La conductividad de la tierra y la difusividad de la tierra en la región que rodea el pozo, pueden considerarse constantes, calculadas según la naturaleza y proporción de las formaciones atravesadas por el pozo, generalmente areniscas y lutitas ,100% saturadas con agua.

Figura 12. Flujo de calor en el pozo



Fuente: ALVARADO, Douglas & BANZÉR, Carlos. Recuperación térmica del petróleo. Caracas, 2002

Willhite realizó un procedimiento que permite obtener la temperatura que tendría el revestimiento teniendo en cuenta las condiciones a las que se supone que se encuentra el pozo. A continuación, se mostrará dicho procedimiento:

- **Determinación de las pérdidas:**

Se inicia asumiendo una temperatura del aislante (T_{ea}) de la ecuación 40, después se determina la temperatura externa del revestidor.

$$T_{er} = T_t + \frac{K_{ais} f(t) (T_s - T_{ea})}{K_t \ln \frac{r_{ea}}{r_{ep}}} \quad (\text{Ecuación 50})$$

$$K_t = \frac{\sum K_i h_i}{ht} \quad (\text{Ecuación 51})$$

Si se tiene en cuenta que la temperatura en la pared del pozo no es constante con respecto al tiempo, la función tiempo ($f(t)$) refleja la resistencia térmica de la tierra. Es necesario de esta manera recurrir a la ecuación de difusión de calor para flujo radial que solucionada de una forma aproximada por Ramey²⁵ está dada por:

$$f(t) = \ln \frac{2\sqrt{Dt}}{r_{re}} - 0,290 \quad (\text{Ecuación 52})$$

Una vez determinado se calcula la temperatura promedio en el anular entre la tubería de revestimiento y la parte externa del aislante.

$$\bar{T}_{anular} = \frac{T_{ea} + T_{er}}{2} \quad (\text{Ecuación 53})$$

Con esta temperatura se procede a realizar el cálculo de las propiedades del fluido que se encuentra en el espacio anular, en este caso el aire (como suposición de método) con las ecuaciones 36-40

²⁵ RAMEY. Wellbore Heat Transmission. Society of Petroleum Engineers. Journal of Petroleum Technology, Vol. 14. No. 4, Apr. 1962, pp. 427-435. Doi: <https://doi.org/10.2118/96-PA>

- **Coeficiente de convección**

La transferencia se realizará únicamente a través del fluido presente entre la tubería y el revestimiento, y se puede calcular de la siguiente manera:

$$h_c = \left[\frac{0,049 * K_f * G_r^{0,33} * P_r^{0,074}}{r_{ae} * \ln \frac{r_{ir}}{r_{ea}}} \right] \quad (\text{Ecuación 54})$$

Donde:

$$G_r = \frac{(r_{ir} - r_{ea})^3 G * \rho_f^2 * B_f * (T_{ea} - T_{er})}{\mu_f^2} \quad (\text{Ecuación 55})$$

$$P_r = \frac{C_f \mu_f}{K_f} \quad (\text{Ecuación 56})$$

- **Coeficiente de radiación**

$$h_r = 0,1714 * 10^8 F_e * F_f * (T_{ea}^2 + T_{er}^2)(T_{ea} + T_{er}) \quad (\text{Ecuación 57})$$

Donde:

$$F_e = \frac{1}{\frac{1}{E_{ae}} - \frac{r_{ea}}{r_{ir}} \left[\frac{1}{E_{ir}} - 1 \right]} \quad (\text{Ecuación 58})$$

- **Coeficiente total de transferencia**

De manera similar con el caso de tubería de superficie para el cálculo en pozo se toman las mismas consideraciones:

(Ecuación 59)

$$U = \left[\frac{r_{ae} * \ln \frac{r_{ea}}{r_{ir}}}{K_a} + \frac{r_{ep}}{r_{ea}(h_c + h_r)} \right]^{-1}$$

Se recalcula la temperatura externa del aislante

$$T_{ea} = T_s - \frac{r_{pe} * U * \ln \frac{r_{ea}}{r_{ir}} * (T_s + T_{er})}{K_a} \quad (\text{Ecuación 60})$$

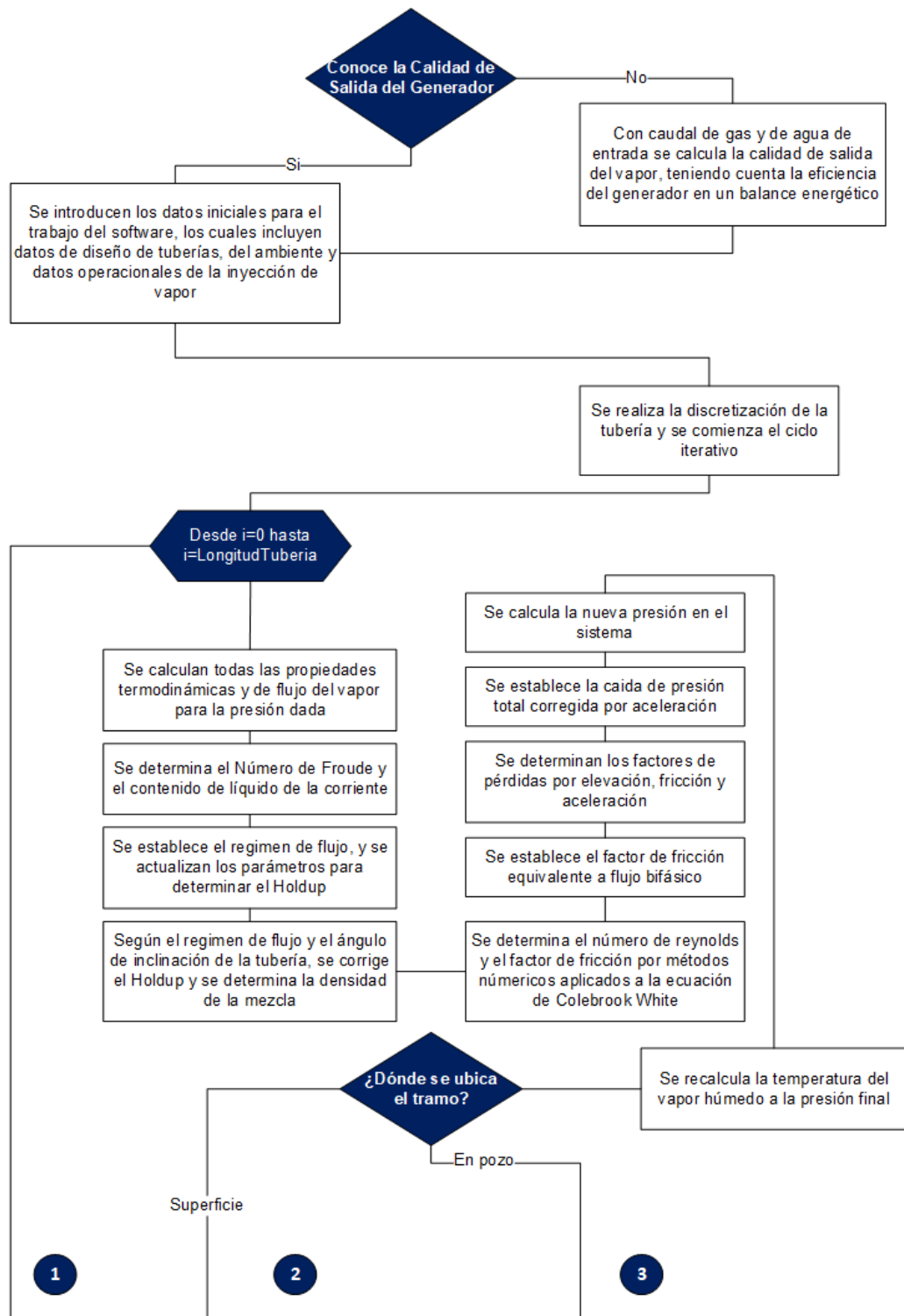
Siguiendo el mismo orden de ideas que el caso de tubería en superficie se determina una temperatura externa del aislante o tubería; si esta no es la misma que la supuesta inicialmente en la ecuación 40, el proceso inicia otra vez, en este caso utilizando como nueva temperatura la calculada en la ecuación 60 hasta que estas dos tengan un error de aproximación del 0,5%.

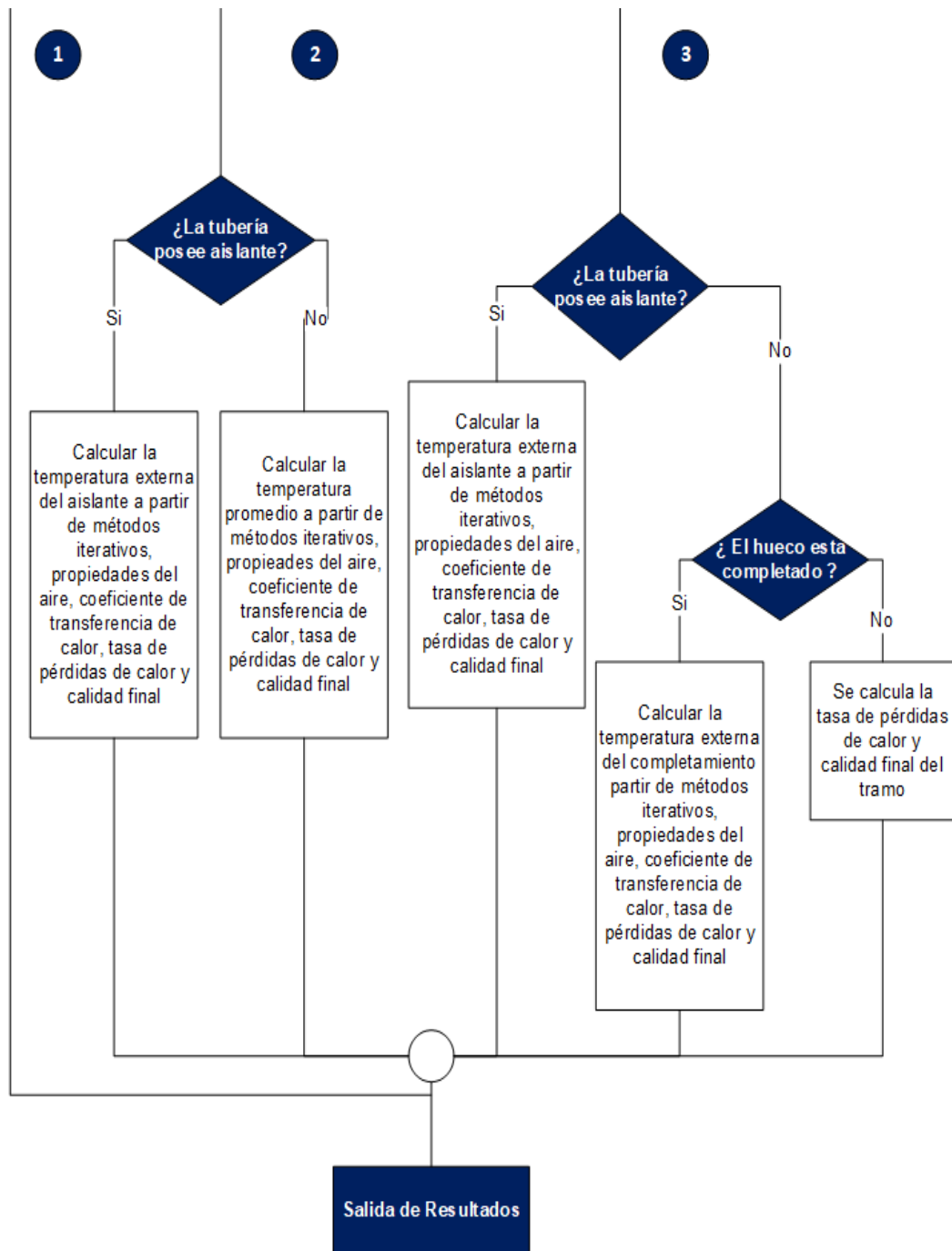
Después de realizar esta iteración se podrá estimar la tasa de pérdidas de calor (q) y la calidad con la que llega el vapor a fondo de pozo (Ecuación 48).

$$q = \frac{2\pi K_t (T_{re} - T_t)}{f(t)}; \frac{Btu}{hr - ft} \quad (\text{Ecuación 61})$$

El proceso que integra la determinación de pérdidas de calor y presión de superficie a fondo, se puede observar en la Figura 13.

Figura 13. Diagrama de flujo para la determinación de pérdidas de calor en superficie y fondo



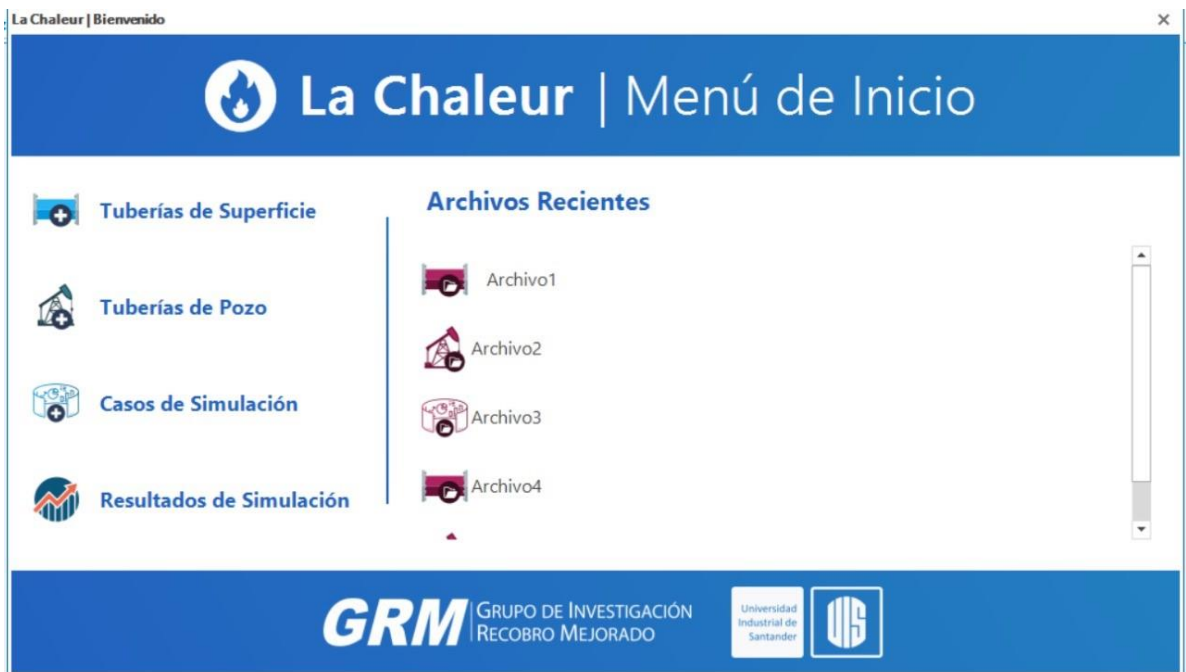


3. PROGRAMA “LA CHALEUR”

3.1 INTRODUCCIÓN

LA CHALEUR, es una novedosa propuesta software que permitirá la evaluación y estimación de pérdidas de calor y presión en líneas de flujo de vapor, a medida que este es transportado desde superficie a fondo. Gracias a esto, es posible evaluar múltiples condiciones operacionales y de diseño, que permitan optimizar el proceso, a nivel de costo energético y de eficiencia de inyección. El software incorpora una interfaz intuitiva y amigable con el usuario (ver figura 14), que permite el análisis de múltiples escenarios en cuestión de minutos. El software consta de tres módulos principales de diseño que se dividirán en el diseño de superficie, diseño de pozo y finalmente, controles de la simulación.

Figura 14. Pantalla inicial.



En el primero de los módulos, es posible realizar un diseño detallado de la tubería de superficie que transportará el vapor desde el generador al cabezal de inyección. En este módulo, como se observa en la figura 15, el usuario tendrá la posibilidad de incluir diferentes características térmicas, de geometría y de diseño de la tubería, entre estas se encontrará la incorporación de aislante, tipo de aislante, conductividad de la tubería y del aislante, emisividad, longitud, diámetros, entre otros parámetros, que pueden ser variados tramo a tramo, con el fin de generar un diseño de línea de tubería que represente de la mejor manera los diseños reales.

Figura 15. Creación de tramo de tubería en superficie.



Creación de tramo de tubería en superficie

| Propiedades Físicas | | Propiedades Térmicas de la Tubería | |
|-------------------------|---|--|--|
| Longitud | <input type="text" value="0"/> ft | Emisividad | <input type="text" value="0,00000"/> |
| Diametro Interno | <input type="text" value="0,000"/> in | Conductividad | <input type="text" value="0,00000"/> BTU/h.ft.°F |
| Diametro Externo | <input type="text" value="0,000"/> in | Propiedades Térmicas del Aislante | |
| Rugosidad | <input type="text" value="0,00000"/> in | Emisividad | <input type="text" value="0,00000"/> |
| Número de Loops | <input type="text" value="0"/> | Conductividad | <input type="text" value="0,00000"/> BTU/h.ft.°F |
| El tramo posee Aislante | <input type="text" value="Si"/> | Espesor | <input type="text" value="0,00"/> in |
| Cambio de Altura | <input type="text" value="0"/> ft | <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="Agregar"/> | |

Por otra parte, el segundo módulo (ver figura 16) permitirá el diseño detallado del pozo, según 3 tipos de diseño diferentes: el primero, un pozo que contiene tubería de inyección, aislante y casing; el segundo, un pozo sin aislante y con casing; y finalmente, un diseño de pozo de hueco abierto. En este módulo, será posible la incorporación de parámetros geotérmicos, de geometría y de transferencia de calor de cada una de las tuberías involucradas, así como el diseño de aislante y la selección de propiedades del mismo.

Figura 16. Creación de tramo de tubería en pozo



 **Creación de Pozo**

Características del Pozo

PMF ft

Diámetro in

Tipo de Pozo

Propiedades Térmicas del Aislante

Emisividad

Conductividad BTU/h-ft²F

Espesor in

Características Geológicas

Gradiente Geotérmico 1/°F

Net to Gross Promedio

Características de la Tubería de Inyección

Diámetro Interno in

Diámetro Externo in

Emisividad

Conductividad BTU/h

Características del Revestimiento

Diámetro Interno in

Diámetro Externo in

Emisividad

Conductividad BTU/h

Finalmente, se encontrará en la figura 17 con la sección de controles de simulación. En esta, se seleccionará el nivel de discretización con el que se realizarán los cálculos, así como las condiciones iniciales de inyección, que incluyan la calidad de salida del generador, cantidad de agua equivalente, presión, entre otras.

Una vez ingresados los datos en la sección de controles de simulación, se habilitará la opción de corrida de la simulación (ver figura 18) y los cálculos serán realizados, obteniendo valores punto a punto para cada una de las propiedades termodinámicas del vapor.

Figura 17. Creación de caso de simulación

Creación de Caso de Simulación

Carga de archivos de simulación

Tubería de Superficie:

Tubería de Pozo:

Cargar

Tubería de Superficie

| Nombre | Longitud [ft] | # de Tramos | Long. Tramo |
|---------|---------------|-------------|-------------|
| Tramo 1 | 2000 | 100 | 20 |
| Tramo 2 | 1200 | 100 | 12 |
| Tramo 3 | 1200 | 100 | 12 |

Editar Discretización

Condiciones Iniciales

Caudal de Agua Equivalente: BBL/Día

Presión de Entrada a Tub: psi

Temperatura Ambiente: °F

Velocidad del Viento: mi/hr

Calidad Inicial: Fracción **Estimar**

Tiempo de Inyección: Horas

Discretización de tiempo: Horas

Tubería de Fondo

Longitud: ft

Discretización: Tramos

Tipo de Pozo: Pozo con aislante en fondo

Long. Tramo:

Calcular Discretización

Una vez la simulación se ha finalizado, el software permitirá la generación de gráficas con ejes secundarios con las que se logra más de 30.000 combinaciones entre las variables (ver figura 19), y tablas que permitan representar el proceso de la mejor manera posible, así como la posibilidad de exportar estos datos a Microsoft Excel de manera general, por tramo o por pozo, en caso de requerirse realizar un informe más detallado.

Figura 18. Desarrollo de simulación

Desarrollo de Simulación

Por favor indica en que carpeta deseas que los archivos de simulación y de registro sean almacenados.
Después, haz click en Iniciar Simulación

Archivo de Resultados

| | | | | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|-----------|
| -> | X1=1925,000 | X2=1950,000 | Pi =784,133 | Pf=783,209 | Qi=0,8075 | Qf=0,8072 |
| -> | X1=1950,000 | X2=1975,000 | Pi =783,209 | Pf=782,283 | Qi=0,8072 | Qf=0,8069 |
| -> | X1=1975,000 | X2=2000,000 | Pi =782,283 | Pf=781,356 | Qi=0,8069 | Qf=0,8066 |
| -> | X1=2000,000 | X2=2025,000 | Pi =781,356 | Pf=780,428 | Qi=0,8066 | Qf=0,8063 |
| -> | X1=2025,000 | X2=2050,000 | Pi =780,428 | Pf=779,498 | Qi=0,8063 | Qf=0,8060 |
| -> | X1=2050,000 | X2=2075,000 | Pi =779,498 | Pf=778,567 | Qi=0,8060 | Qf=0,8057 |
| -> | X1=2075,000 | X2=2100,000 | Pi =778,567 | Pf=777,634 | Qi=0,8057 | Qf=0,8054 |
| -> | X1=2100,000 | X2=2125,000 | Pi =777,634 | Pf=776,701 | Qi=0,8054 | Qf=0,8051 |
| -> | X1=2125,000 | X2=2150,000 | Pi =776,701 | Pf=775,765 | Qi=0,8051 | Qf=0,8048 |
| -> | X1=2150,000 | X2=2175,000 | Pi =775,765 | Pf=774,829 | Qi=0,8048 | Qf=0,8046 |
| -> | X1=2175,000 | X2=2200,000 | Pi =774,829 | Pf=773,890 | Qi=0,8046 | Qf=0,8043 |
| -> | X1=2200,000 | X2=2225,000 | Pi =773,890 | Pf=772,951 | Qi=0,8043 | Qf=0,8040 |
| -> | X1=2225,000 | X2=2250,000 | Pi =772,951 | Pf=772,010 | Qi=0,8040 | Qf=0,8037 |
| -> | X1=2250,000 | X2=2275,000 | Pi =772,010 | Pf=771,067 | Qi=0,8037 | Qf=0,8034 |
| -> | X1=2275,000 | X2=2300,000 | Pi =771,067 | Pf=770,124 | Qi=0,8034 | Qf=0,8031 |
| -> | X1=2300,000 | X2=2325,000 | Pi =770,124 | Pf=769,178 | Qi=0,8031 | Qf=0,8028 |
| -> | X1=2325,000 | X2=2350,000 | Pi =769,178 | Pf=768,231 | Qi=0,8028 | Qf=0,8025 |
| -> | X1=2350,000 | X2=2375,000 | Pi =768,231 | Pf=767,283 | Qi=0,8025 | Qf=0,8022 |
| -> | X1=2375,000 | X2=2400,000 | Pi =767,283 | Pf=766,333 | Qi=0,8022 | Qf=0,8020 |
| -> | X1=2400,000 | X2=2425,000 | Pi =766,333 | Pf=765,382 | Qi=0,8020 | Qf=0,8017 |
| -> | X1=2425,000 | X2=2450,000 | Pi =765,382 | Pf=764,429 | Qi=0,8017 | Qf=0,8014 |
| -> | X1=2450,000 | X2=2475,000 | Pi =764,429 | Pf=763,475 | Qi=0,8014 | Qf=0,8011 |
| -> | X1=2475,000 | X2=2500,000 | Pi =763,475 | Pf=762,519 | Qi=0,8011 | Qf=0,8008 |

Presion a final de T=360 P= 762,519 Calidad=0,801

Fin de Simulación

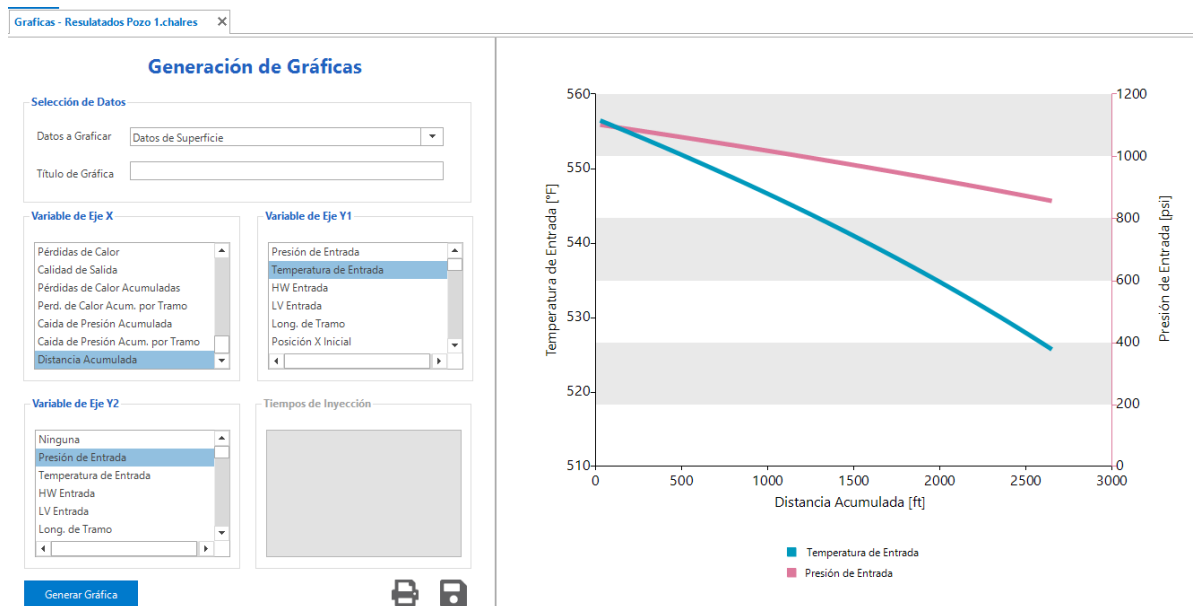
Timestamp de Finalización: 22/07/2018 4:22:56 p. m.
Total Running Time: 10894ms

El software, además, incorpora herramientas que facilitarán la creación de la simulación al usuario, entre estas se encuentran:

- **Convertor de Unidades:** El software permitirá la introducción de valores en diferentes unidades internacionales y anglosajonas y las procesará de forma coherente.
- **Perfil de Distancia vs Altura:** Se incorpora la generación de un perfil de distancia en la sección de diseño de tubería de superficie, el cual permitirá al usuario tener una mejor idea del diseño de tubería propuesto y como los cambios de altura pueden afectar el proceso.

- **Catálogo de Tuberías:** LA CHALEUR incorporará una base de datos que contenga diferentes denominaciones de tuberías presentes en el mercado, la cual permitirá la identificación de valores necesarios para la simulación, tales como diámetros internos, externos, espesor de pared, rugosidad, etc.
- **Catálogo de Aislantes:** El software incorporará una completa lista de aislantes la cual contendrá información importante, como la conductividad, difusividad y emisividad del mismo.

Figura 19. Generación de graficas



3.2 VALIDACIÓN

Se realizó la validación del programa con los datos obtenidos de un pozo de crudo pesado colombiano ubicado en el Valle Medio del Magdalena el cual lleva más de 20 años inyectando vapor como método de recobro mejorado. Basados en el diagrama de flujo presentado en la figura 13, los datos de entrada para la validación para la tubería de superficie se encuentran en la figura 20 y figura 21

Figura 20. Creación tramo de tubería de superficie.

Edición de Tubería de Superficie | La Chaleur

Creación de tramo de tubería en superficie

Propiedades Físicas

Longitud: 2625 ft ✓

Diametro Interno: 3,068 in ✓

Diametro Externo: 3,500 in ✓

Rugosidad: 0,00180 in ✓

Número de Loops: 0

El tramo posee Aislante: Si

Cambio de Altura: 0 ft

Propiedades Térmicas de la Tubería

Emisividad: 0,00000

Conductividad: 0,00000 BTU/h-ft-°F

Propiedades Térmicas del Aislante

Emisividad: 0,30000 ✓

Conductividad: 0,03600 BTU/h-ft-°F ✓

Espesor: 3,00 in ✓

Figura 21. Creación de caso de simulación.

La Chaleur | Controles de Simulación: SimulacionTecaWithAislante (1).chalsim

Creación de Caso de Simulación

Carga de archivos de simulación

Tubería de Superficie: C:\Users\Sandris\Downloads\TuberíaTeca.stub

Tubería de Pozo: C:\Users\Sandris\Downloads\PozoTecaConAislante.w...

Condiciones Iniciales

Caudal de Agua Equivalente: 1800,0 BBL/Día

Presión de Entrada a Tub: 1100,0 psi

Temperatura Ambiente: 93,0 °F

Velocidad del Viento: 6,00 mi/hr

Calidad Inicial: 0,850 Fracción

Tiempo de Inyección: 360 Horas

Discretización de tiempo: 24 Horas

Tubería de Superficie

| Nombre | Longitud [ft] | # de Tramos | Long. Tramo |
|---------|---------------|-------------|----------------|
| Tramo 1 | 2624,6719 | 100 | 26,24671916010 |

Tubería de Fondo

Longitud: 2500,000 ft

Discretización: 100 Tramos

Tipo de Pozo: Pozo con aislante en fondo

Long. Tramo: 25 Ft

Los siguientes cálculos se realizaron para un tramo de 100 ft de tubería, procedimiento que realiza internamente el programa dependiendo de la discretización que el usuario elija:

- 1) Se calcularon las propiedades del vapor húmedo, los volúmenes de vapor y líquido, pérdidas de presión por cambios de energía potencial y fricción (metodología Beggs & Brill). Si el segmento cuenta con “loop de expansión” se debe calcular fricción por codos.

a) Calor sensible

$$h_w = 91P^{0,2574} = 91 * (1100)^{0,2574} = 551,95 \left[\frac{BTU}{Lb} \right]$$

b) Calor latente

$$L_c = 1328P^{-0,08774} - 2.22x 10^{-3}P^{1,513}$$

$$= 1328 * (1100)^{-0,08774} - 2.22x 10^{-3} * (1100)^{1,513} = 629,9 \left[\frac{BTU}{Lb} \right]$$

c) Flujo másico de agua y vapor

$$Q_{agua} = (1 - 0,8) * 630000 = 126000 \left[\frac{BTU}{Lb} \right]$$

$$Q_{vapor} = (0,8) * 630000 = 504000 \left[\frac{BTU}{Lb} \right]$$

d) Flujo de calor

$$Q_{heat} = (126000 + 504000) * (551.95 + (0,8 * 629,66)) = 665071678 \left[\frac{BTU}{dia} \right]$$

e) Volumen específico del agua y del vapor

$$V_l = 0,015868 + (8,60372 \times 10^{-5} * (1100^{0,225})) + (2,00191 \times 10^{-4} * (1100^{0,45}))$$
$$= 0,02096 \left[\frac{ft^3}{Lb} \right]$$

$$V_g = 815,66 * 1100^{-1,0884} = 0,399261 \left[\frac{ft^3}{Lb} \right]$$

f) Área de flujo y velocidad de la mezcla

$$Area = \frac{\pi * \left(\frac{3,0680}{12} \right)^2}{4} = 0,0513 [ft^2]$$

- Inicialmente se determina los valores de velocidades de las fases por separado para así determinar la velocidad de la mezcla

$$Vel_{agua} = \frac{(126000 * 0,02096)}{0,0513 * 3600 * 24} = 0,59546 \left[\frac{ft}{s} \right]$$

$$Vel_{vapor} = \frac{504000 * 0,3992}{0,0513 * 3600 * 24} = 45,36658 \left[\frac{ft}{s} \right]$$

$$Vel_{mezcla} = 0,59546 + 45,36658 = 45,9620 \left[\frac{ft}{s} \right]$$

g) Numero de Froude

$$Fr_m = \frac{45,9620^2}{32,174 * \left(\frac{3,068}{12} \right)} = 256,8144$$

h) Contenido de líquido

$$C_L = \frac{0,59546}{45,9620} = 0,0130$$

i) Líneas de transición

$$\begin{aligned}L_1 &= 316 (0,0130^{0,302}) = 85,0448.. \\L_2 &= 0,0009252 (0,0130^{-2,4684}) = 42,214 ... \\L_3 &= 0,1(0,0130^{-1,4516}) = 54,959 ... \\L_4 &= 0,5(0,0130^{-6,738}) = 2,614 \times 10^{12}\end{aligned}$$

j) Tipo de flujo

Después de realizar los cálculos para terminar las variables de entrada a la tabla 2, se puede identificar que para este caso el flujo a trabajar es distribuido.

k) Holdup de líquido

Los parámetros necesarios se encuentran especificados en la tabla 3 que están en función del tipo de flujo.

$$E_L(\theta) = \frac{1,065 * (0,013)^{0,582}}{(256,8144)^{0,061}}$$

l) Velocidad de líquido

$$N_{lv} = 1,938 * (0,59546) \left(\frac{1}{0,02096 * 32,174 * 0,001} \right)^{\frac{1}{4}} = 6,917$$

m) Densidad de la mezcla y densidad sin desplazamiento

$$\rho_m = \left(\frac{0,0130}{0,02096} \right) + \left(\frac{(1 - 0,0130)}{0,399261} \right) = 3,09 \left[\frac{Lb}{ft^3} \right]$$

$$\rho_{msln} = \left(\frac{0,060}{0,02096} \right) + \left(\frac{(1 - 0,060)}{0,399261} \right) = 5,236 \left[\frac{Lb}{ft^3} \right]$$

n) Viscosidades dinámicas y número de Reynolds sin desplazamiento.

- Se determinan las viscosidades dinámicas del agua líquida y el vapor

$$\mu_w = \frac{0,382}{1488,1639} = 2,565 \times 10^{-4} \left[\frac{Lb}{ft * s} \right]$$

$$\mu_v = \frac{0,382}{1488,1639} = 9,145 \times 10^{-9} \left[\frac{Lb}{ft * s} \right]$$

- Viscosidad dinámica de la mezcla

$$\mu_m = \frac{0,382}{1488,1639} = 1,551 \times 10^{-5} \left[\frac{Lb}{ft * s} \right]$$

- Numero de Reynolds sin deslizamiento

$$Re_{Ns} = \frac{5,236 * 45,9620 * \left(\frac{3,068}{12} \right)}{1,551 \times 10^{-5}} = 3967691,15 \dots$$

o) Factor de fricción sin deslizamiento

El cálculo del factor de fricción sin deslizamiento se determinó a partir del desarrollo numérico de la ecuación de Colebrook White para la determinación del factor de fricción a una fase. La resolución de la ecuación se realiza de forma iterativa en el software, una vez el método numérico converge, el error relativo es de 0.00001%.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

La ecuación de Moody es solucionada por métodos iterativos (En el software se hace uso de Newton Raphson) obteniendo finalmente el valor de λ (Factor de Fricción de una fase)

$$F_{NS} = 0,003$$

Factor de dos fases

$$y = \frac{0,0130}{0,06^2} = 1,266$$

$$S = \frac{\ln(1,266)}{(-0,0523 + 3,182 \ln(1,266) - 0,8725(\ln(1,266))^2 + 0,01853(\ln(1,266))^4)}$$

$$= 0,482$$

$$F_{2NS} = 0,003e^{0,483} = 0,004$$

p) Pérdidas por fricción

$$\left(\frac{dP}{dZ} \right)_{\text{fric}} = \frac{2 * 0,004 * 3,09 * (45,96^2)}{144 * 32,174 * \left(\frac{3,068}{12} \right)} = 0,045 \text{ psi}$$

q) Pérdidas por elevación

El tramo a analizar no posee cambios de altura, por lo tanto:

$$\left(\frac{dP}{dZ} \right)_{\text{elv}} = 0 \text{ psi}$$

r) Pérdidas mecánicas totales

$$\left(\frac{dP}{dZ}\right)_{\text{totales}} = 0,045 - 0 = 0,045 \text{ psi}$$

s) Nueva presión del sistema

$$P = 1100 - 0,045 = 1099,9 \text{ psi}$$

Con la nueva presión determinada se obtendrá las nuevas propiedades térmicas del vapor para realizar los cálculos de las pérdidas de calor.

2) Calcular T_{ae} por prueba y error, propiedades del aire, coeficientes de transferencia de calor, pérdidas de calor y calidad final.

Después del procedimiento de prueba y error que se efectúa internamente, para calcular la temperatura exterior del aislante se obtiene:

a) Temperatura promedio

$$T_{prom} = \frac{T_{aislante} - T_{ambiente}}{2} = \frac{92,6345 + 80}{2} = 86,3162^{\circ}F$$

b) Conductividad térmica del aire

$$K_a = 0,01328 + 2,471 \times 10^{-5} \bar{T} - 4,247 \times 10^{-9} \bar{T}^2$$

$$K_a = 0,01328 + 2,471 \times 10^{-5} (86,3162) - 4,247 \times 10^{-9} (86,3162)^2 = 0,01538 \left[\frac{BTU}{h \cdot ft \cdot ^{\circ}F} \right]$$

c) Densidad del aire

$$\rho_a = 0,0771 - 8,848 \times 10^{-5} \bar{T} - 3,744 \times 10^{-8} \bar{T}^2$$
$$\rho_a = 0,0771 - 8,848 \times 10^{-5} (86,3162) - 3,744 \times 10^{-8} (86,3162)^2 = 0,0691 \left[\frac{Lb}{ft^3} \right]$$

d) Viscosidad dinámica

$$\mu_a = 0,0400 + 6,155 \times 10^{-5} \bar{T} - 1,220 \times 10^{-8} \bar{T}^2$$
$$\mu_a = 0,0400 + 6,155 \times 10^{-5} (86,3162) - 1,220 \times 10^{-8} (86,3162)^2 = 0,045 \left[\frac{Lb}{pie \cdot h} \right]$$

e) Capacidad calorífica

$$C_{pa} = 0,2382 + 1,390 \times 10^{-5} \bar{T} + 1,027 \times 10^{-8} \bar{T}^2$$
$$C_{pa} = 0,2382 + 1,390 \times 10^{-5} (86,3162) + 1,027 \times 10^{-8} (86,3162)^2 = 0,2394 \left[\frac{BTU}{Lb \cdot F} \right]$$

f) Coeficiente de expansión volumétrica

$$B_a = 0,0024 - 0,757 \times 10^{-5} \bar{T} + 0,169 \times 10^{-7} \bar{T}^2 - 0,148 \times 10^{-10} \bar{T}^3$$
$$B_a = 0,0024 - 0,757 \times 10^{-5} (86,3) + 0,169 \times 10^{-7} (86,3)^2 - 0,148 \times 10^{-10} (86,3)^3$$
$$= 0,0018 \left[\frac{vol}{vol \cdot F} \right]$$

g) Coeficiente de convección forzada

$$h_{ca} = 19.3 C_{pa} \frac{(\rho_a * V_{aire})^{0,6}}{D_{ea}^{0,4}}$$
$$h_{ca} = 19.3 * 0,2394 \frac{(0,0691 * 6)^{0,6}}{(0,7916)^{0,4}} = 2,994$$

h) Coeficiente de radiación

$$h_r = 0,1714 * 10^8 F_e * F_f * (T_e^2 + T_{amb}^2)(T_e - T_{amb})$$
$$h_r = 0,1714 * 10^8 (0,3) * 1 * ((552,304^2 + 539,62^2)(552,304 - 539,62)) = 0,3348$$

i) Coeficiente total de transferencia

$$U = \left[\frac{r_{ae} \ln \frac{r_{ae}}{r_{pe}}}{K_a} + \frac{1}{h_{ca} + h_r} \right]^{-1}$$
$$U = \left[\frac{(0,3958) \ln \frac{0,3958}{0,1458}}{0,036} + \frac{1}{2,99 + 0,3348} \right]^{-1} = 0,08865$$

j) Tasa pérdida de calor

$$q = 2\pi(0,39583)U(T_s - T_{amb})$$
$$q = 2\pi r_{ae} U (554,44 - 80) = 104,61 \left[\frac{Btu}{hr - ft} \right]$$

k) Calidad de vapor al final de 100 ft de tubería.

$$X_c = 0,7992$$

El procedimiento se repite dependiendo de la cantidad de subtramos que el usuario haya elegido evaluar.

Gracias a los resultados obtenidos por LA CHALEUR es posible lograr un buen ajuste, no solo con los softwares de simulación comerciales como Aspen HYSYS sino también con los casos de verificación de campos reales.

A continuación, se muestra una tabla de comparación entre la información del campo reportada en la literatura y los resultados presentados tanto por LA CHALEUR como por un software de uso comercial que se empleó como fuente de verificación.

Tabla 5. Comparación de resultados.

| Propiedad | Información del campo | LA CHALEUR | Error % | Software* | Error %* |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------|----------------|------------------|-----------------|
| P_{inical} (psi) | 1100 | 1100 | 0 | 1100 | 0 |
| $P_{finaltramo}$ (psi) | 900 | 870,66 | 3,26 | 859,2 | 1,3 |
| $T_{finaltramo}$ (°F) | Desconocido | 527,88 | - | 530,8 | 0,55 |
| $X_{inicialtramo}$ (fraccion) | 0,8 | 0,8 | 0 | 0,8 | 0 |
| $X_{finaltramo}$ (fraccion) | Desconocido | 0,7838 | - | 0,7896 | 0,0255 |

El análisis muestra que respecto al campo de estudio la caída de presión concuerda de manera aceptable con los valores obtenidos en campo de medidas directas, alrededor de 900 psi para una presión de salida de 11000 psi en una línea de 2600 ft de longitud.

* Software Aspen hysys, uso libre campus central Universidad Industrial de Santander.

* Error determinado entre los resultados reportados por La Chaleur y el Software comercial.

4. CONCLUSIONES

1. A partir del análisis realizado y la predicción de resultados proporcionado por el software, es posible determinar y optimizar el diseño del sistema de flujo del vapor desde cabeza a fondo de pozo, con el fin de que cumpla con criterios de costo, eficiencia y efectividad necesarias para el proceso. Gracias a la integración de los mecanismos de pérdidas mecánicas y pérdidas térmicas, es posible realizar la representación de un proceso más real, así como identificar el efecto de cada tipo de pérdidas sobre el proceso.
2. Al considerar un flujo monofásico en el cálculo de las pérdidas mecánicas, aunque cuenta con una aprobable aproximación, acarrea errores debido a que no refleja la realidad del proceso puesto que el vapor sufre cambios termodinámicos en su transporte generando así flujo bifásico y no monofásico, es por esto que el uso de las correlaciones como las realizadas por Beggs & Brill permiten la evaluación de flujo bifásico en tubería horizontal, inclinada y vertical logrando así obtener una buena exactitud del fenómeno real.
3. Para sistemas donde la velocidad media del fluido sea baja y exista un aporte de energía potencial al sistema, como es el caso de flujo de vapor húmedo en el pozo, se puede presentar un aumento de la presión a través de la tubería, debido a que las pérdidas de presión por fricción son inferiores comparadas con la ganancia de presión ocasionada por la energía potencial y cinética.
4. El término que mayor tiene incidencia en los cálculos de las pérdidas térmicas es el coeficiente global de transferencia de calor pues se evidencia

que diferentes autores se han dedicado a modificar su cálculo para lograr garantizar que incluya la mayoría de los fenómenos que se presentan en el proceso además de incluir el uso de aislantes térmicos que reducen estas pérdidas significativamente.

5. El uso de herramientas computacionales como la desarrolla en el presente trabajo en lenguaje C# simplifica el tiempo de cómputo y así permite obtener datos con más precisión debido principalmente a que la metodología es un proceso iterativo que el programa puede realizar con un error inferior al 0.5%.
6. A partir de los resultados proporcionados por la herramienta software **LA CHALEUR**, se puede determinar que el error aproximado entre los datos de campo y él calculado es menor al 5 %.

5. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda complementar el software a partir de la implementación de otras correlaciones de flujo multifásico, así como la capacidad de seleccionar el criterio de cambio entre las correlaciones de flujo vertical, horizontal e inclinado.
2. Debido a los numerosos modelos para determinar las pérdidas de calor en un proceso de inyección de vapor reportados en la literatura, se recomienda incluir otras metodologías de cálculo que incluyan variables como el coeficiente de conducción que, aunque no tiene un aporte significativo en las pérdidas totales, ayudaría a aumentar la precisión de la herramienta entre otras variables omitidas.
3. La técnica de inyección de vapor presenta diferentes tecnologías que fueron desarrolladas para aumentar su campo de acción como la aplicación en pozo desviados o horizontales, por esto se recomienda ampliar la metodología de cálculo del software para que incluya un análisis en estos tipos de pozo.

BIBLIOGRAFIA

ALVARADO, Douglas & BANZÉR, Carlos. Recuperación térmica del petróleo. Caracas, 2002

BEGGS, & BRILL, James. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. Journal of Petroleum Technology. Vol 25. No. 5. May 1973, pp. 607-617. Doi: 10.2118/4007-PA

CENGEL, Yunus. Termodinámica. México: Editorial McGraw Hill, 2012. ISBN 9786071507433

EARLOUGHER, Robert. Some Practical Considerations in the Design of Steam Injected Wells. Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. Vol 21. No. 1. Jan. 1969, pp. 79-86. Doi: <https://doi.org/10.2118/2202-PA>

ECKERT & DRAKE, Robert. Heat and Mass Transfer. New York: Editorial McGraw-Hill. Segunda Edicion, 1950. ISBN: 978-0070189256

FAROUQ, Ali. Current Status of Steam Injection as a Heavy Oil Recovery Methods. Petroleum Society of Canada. Vol 13. No. 01, 1974. p.1-15. Doi:10.2118/74-01-06.

FONTANILLA, Jerry & AZIZ, Khalid. Prediction of Bottomhole Condition for Wet Steam Injection Wells. Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 21. No. 2. Mar.-Apr. 1982, pp. 82-88. Doi: <https://doi.org/10.2118/82-02-04>

GREEN, Don & WILLHITE, Paul. Enhanced Oil Recovery. University of Kansas. Richardson, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 1998. ISBN: 978-1-61399-494-8

HOIST & FLOCK. Wellbore Behavior During Saturated Steam Injection. Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 5, No. 4. Oct.-Dec. 1966, pp. 184-193. Doi: <https://doi.org/10.2118/66-04-05>

MANRIQUE ROJAS, Miguel Antonio. Estudio y modelado del flujo de vapor en líneas de transporte para procesos de recobro térmico. Tesis de Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2012.

OLMOS TORRES, Tobias Ricardo. Herramienta software para predecir el comportamiento de la presión y pérdidas de calor a traves de tuberías en procesos de inyección de vapor. Tesis de grado, en mención a Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2002.

PACHECO, & FAROUQ, Ali. Wellbore Heat Losses and Pressure Drop in Steam Injection. Journal of Petroleum Technology. Vol. 24, No. 2. Feb. 1972, pp. 139-144. Doi: <https://doi.org/10.2118/3428-PA>

RAMEY. Wellbore Heat Transmission. Society of Petroleum Engineers. Journal of Petroleum Technology, Vol. 14. No. 4, Apr. 1962, pp. 427-435. Doi: <https://doi.org/10.2118/96-PA>

RAMEY. Wellbore Heat Transmission. Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. Vol. 14, No. 4. April 1962, pp. 427-435. Doi: <https://doi.org/10.2118/96-PA>

SATTER, Abdus, Heat Losses During Flow of Steam Down a Wellbore. Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. Vol. 17, No. 7. July 1965, pp. 845-851. Doi: <https://doi.org/10.2118/66-04-05>

TAITEL, Yehuda, BORNEA, Dvora & DUKLER: Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. AIChE Journal 26. N.º 6. May 1980. pp.345-354. Doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690260304>

WHITE, Frank. Mecánica de Fluidos. Editorial McGraw-Hill. Sexta Edición, 2008.

WILLHITE, Paul. Overall Heat Transfer Coefficients in Steam and Hot Water Injection Wells. Journal of Petroleum Technology, Vol. 19, No. 5. May 1967. pp. 607-615. Ponca City, Okla

YAMAZAKI, Yasaburo & YAMAGUCHI, Katsuji. Characteristics of Concurrent Two-Phase Downflow in Tubes. Journal of Nuclear Science and Technology. April 01 of 1979, Vol. 16, No. 4, pp. 245-255.

ZERKALOV, Georgy. Steam Injection for Enhanced Oil Recovery. □On line□. California: Stanford University. December 07 of 2015. Available in: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/zerkalov2/>

ANEXOS

Anexo A. Manual del usuario

1. Descargue la carpeta “LA CHALEUR” y guárdela en una ubicación de interés, tenga en cuenta que los resultados del mismo se guardarán en la misma ubicación; asegúrese que el ordenador donde esté descargado el programa posea net framework 4.0
2. Ejecute el archivo llamado “LA CHALEUR”.application , inmediatamente se abrirá la ventana que se muestra a continuación:

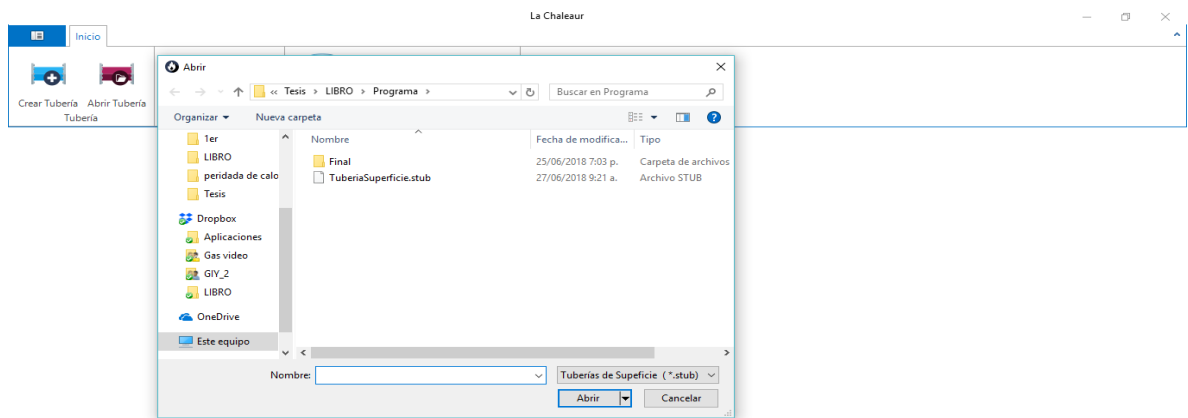


El software se divide en 4 módulos: tubería de superficie, creación de pozo, caso de simulación y resultados de simulación, el usuario deberá ingresar los datos en dos módulos iniciales para poder realizar la simulación y visualizar los resultados.

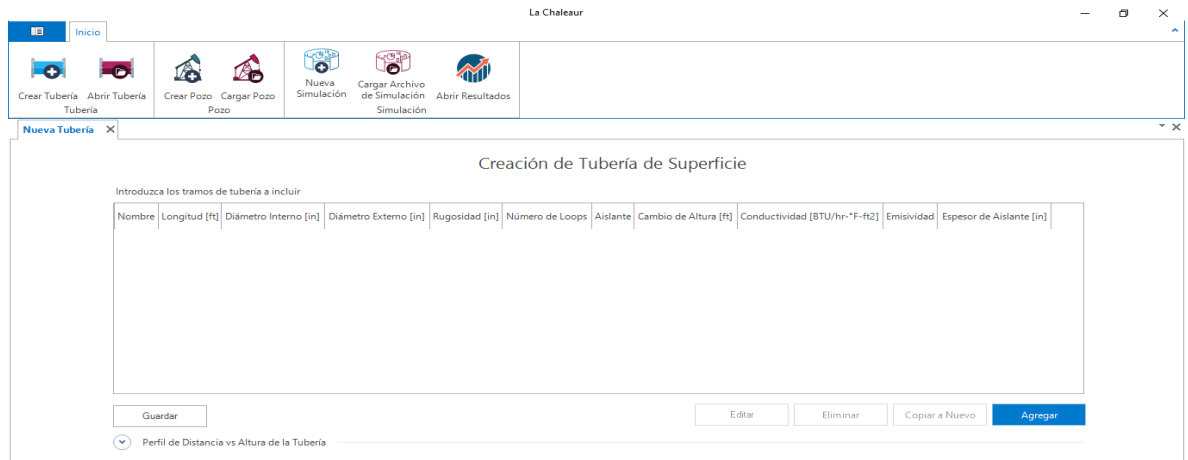
Módulo tubería de superficie

En este segmento el usuario tendrá la posibilidad de incluir diferentes características térmicas, de geometría y de diseño de la tubería que pueden ser variados tramo a tramo.

3. En la parte superior izquierda el usuario encontrará dos iconos de tubería, podrá escoger entre crear tubería o abrir tubería.



4. En caso de elegir crear tubería se tendrá la opción de crear diferentes tramos si el usuario considera que existen cambios en las características de geometría o geográficas a largo de toda la tubería desde la salida del generador hasta la cabeza del pozo.



5. Para ingresar un nuevo tramo, se deberá dar clic en la opción agregar, inmediatamente se abrirá una ventana como la que se muestra a continuación:



Edición de tramo de tubería de superficie

Propiedades Físicas

| | | | |
|-------------------------|---------|----|---|
| Longitud | 500 | ft | ✓ |
| Dímetro Interno | 5,000 | in | ✓ |
| Dímetro Externo | 4,000 | in | ✗ |
| Rugosidad | 0,00010 | in | ✓ |
| Número de Loops | 0 | | |
| El tramo posee Aislante | Si | | |
| Cambio de Altura | 0 | ft | |

Propiedades Térmicas de la Tubería

| | | |
|---------------|---------|---------------------------|
| Emisividad | 0,00000 | |
| Conductividad | 0,00000 | BTU/h-ft ² -°F |

Propiedades Térmicas del Aislante

| | | |
|---------------|---------|---------------------------|
| Emisividad | 0,30000 | |
| Conductividad | 0,04000 | BTU/h-ft ² -°F |
| Espesor | 2,00 | in |

El valor del diámetro externo debe ser mayor al diámetro interno

Cancelar Aceptar

Se deberán ingresar los datos verificando que al final de la casilla aparezca un icono de aprobación en color verde, indicando que el dato es aceptado por el programa; en caso contrario se obtendrá una “x” en color rojo en el cual acercando el cursor aparece un mensaje indicado la inconsistencia.

5.1 Longitud

Corresponde al trayecto entre el inicio y el fin del tramo a evaluar teniendo en cuenta la longitud de todos y cada uno de los “Loops de expansión”. El valor puede ser suministrado en pies, metros y milímetros.

5.2 Diámetro interno

El diámetro interior de la tubería puede ser suministrada en pulgadas, pies, centímetros, milímetros y metros. Este diámetro es variable para cada caso.

5.3 Diámetro externo

El diámetro exterior de la tubería puede ser suministrado en pulgadas, pies, centímetros, milímetros y metros. Es necesario tener presente que en estas propiedades se tienen en cuenta únicamente los diámetros de la tubería desnuda, en caso de tener otro tipo de componentes la tubería, estos se involucrarán más adelante.

5.4 Rugosidad

Este valor corresponde a la rugosidad que presenta la tubería que se está evaluando, este valor puede ser introducido en pulgadas, centímetros, milímetros.

5.5 Número de Loops

El usuario debe suministrar el número de estos en el trayecto, que normalmente son dispuestos cada 200 pies.

5.6 Propiedades térmicas del aislante

El usuario tendrá la opción de elegir si la tubería posee o no aislante, dependiendo de la elección en la parte derecha se habilitará el ingreso de los datos respectivos. Si la tubería posee aislante se activaría "Propiedades térmicas del aislante".

5.6.1 Emisividad

La emisividad del recubrimiento del aislante que puede variar dependiendo del material con el que es recubierto el aislante, los valores se encuentran en el rango de 0,3 y 0,9.

5.6.2 Conductividad

La conductividad se puede ingresar en $\frac{BTU}{h*ft*^{\circ}F}$ o $\frac{W}{m*K}$.

5.6.3 Espesor

El espesor de aislante debe ser ingresado en pulgadas.

5.7 Propiedades de la tubería

Esta sección se activará si el usuario eligió la opción que la tubería a trabajar no posee aislante.

5.7.1 Emisividad

El usuario ingresará los valores de emisividad si conoce el valor, los valores tipos se encuentran en el rango de 0,3 y 0,9.

5.7.2 Conductividad

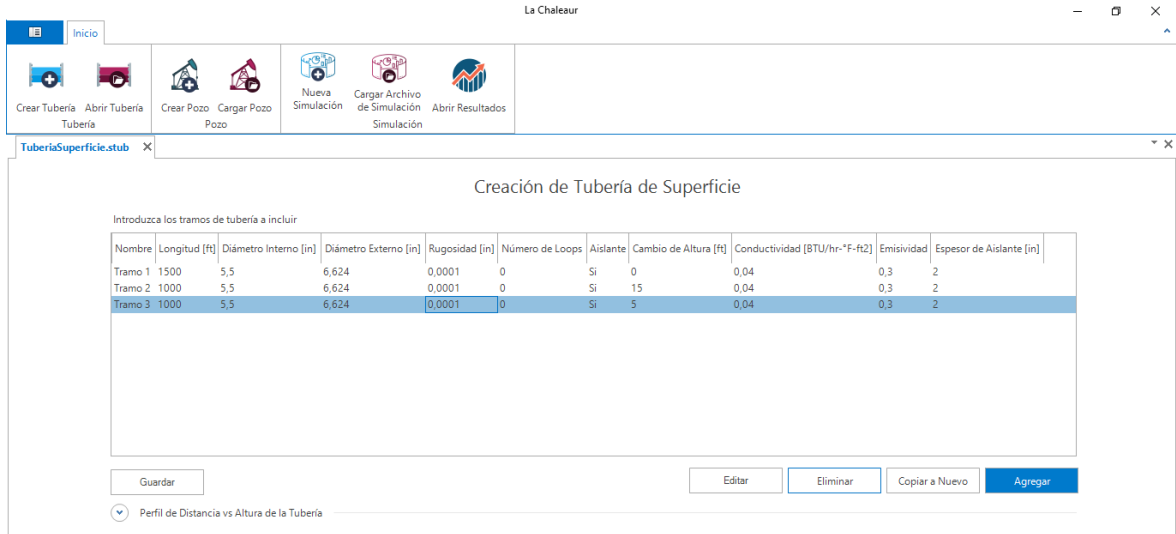
La conductividad se puede ingresar en $\frac{BTU}{h*ft*^{\circ}F}$ o $\frac{W}{m*K}$.

5.8 Cambio de altura

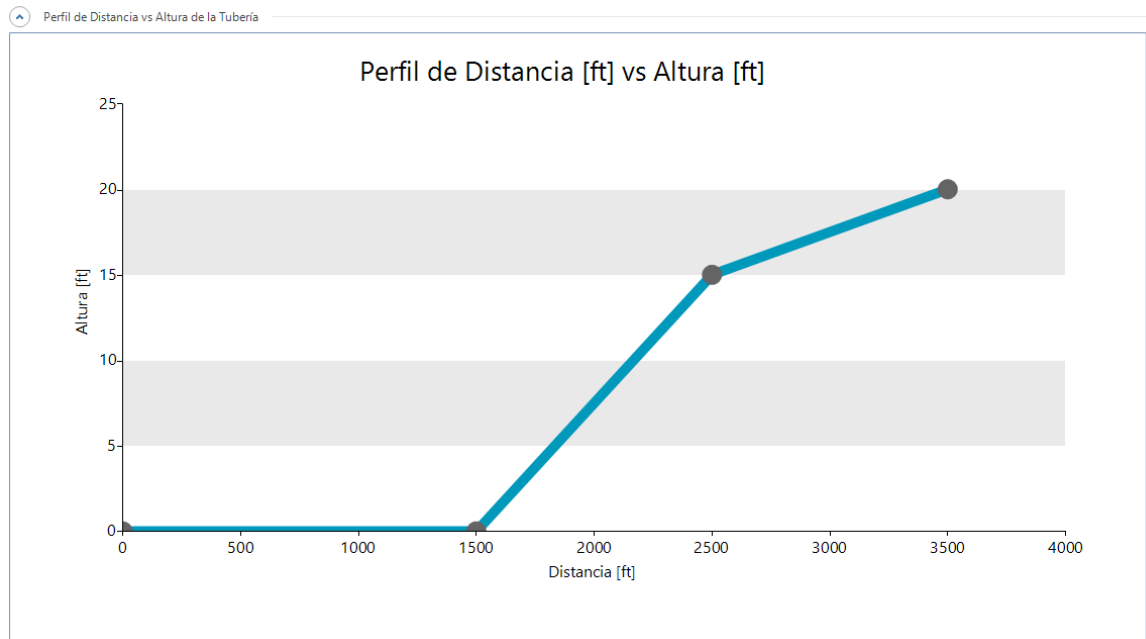
Hace referencia a el cambio de altura que puede sufrir la tubería con respecto a la ubicación inicial del tramo. Se puede ingresar en pulgadas, pies o metros.

Para ser más ágil la creación se tendrá la opción de copiar un tramo ya agregado, en este caso se crear un tramo idéntico al seleccionado y junto con la opción editar el usuario podrá modificar el cambio que presenta la tubería sin necesidad de realizar el tramo desde el inicio.

Una vez ingresada la totalidad de los tramos se obtendrá una tabla como la que se evidencia a continuación:



6. Una vez termina la creación de tubería, en la parte inferior izquierda se encontrada la opción de desplegar Perfil de Distancia vs Altura de la Tubería.



7. Una vez cargado los datos el usuario tendrá la opción de “guardar “y elegir el nombre y la ubicación del archivo que desee.

Modulo Creación de Pozo

- De manera similar con el módulo anterior en la parte central se encontrará dos íconos de creación de pozo se podrá escoger entre crear pozo o cargar pozo.
- Al seleccionar crear pozo, se desplegará una ventana nueva como se observa a continuación:



Creación de Pozo

| Características del Pozo | Características de la Tubería de Inyección |
|--|---|
| PMF <input type="text" value="0"/> ft <input type="button" value="v"/> | Diámetro Interno <input type="text" value="0,000"/> in <input type="button" value="v"/> |
| Diámetro <input type="text" value="0,000"/> in <input type="button" value="v"/> | Diámetro Externo <input type="text" value="0,000"/> in <input type="button" value="v"/> |
| Tipo de Pozo <input type="text" value="Pozo con Aislante"/> <input type="button" value="v"/> | Emisividad <input type="text" value="0,00000"/> |
| | Conductividad <input type="text" value="0,00000"/> BTU/h <input type="button" value="v"/> |
| Propiedades Térmicas del Aislante | Características del Revestimiento |
| Emisividad <input type="text" value="0,00000"/> | Diámetro Interno <input type="text" value="0,000"/> in <input type="button" value="v"/> |
| Conductividad <input type="text" value="0,00000"/> BTU/h-ft*F <input type="button" value="v"/> | Diámetro Externo <input type="text" value="0,000"/> in <input type="button" value="v"/> |
| Espesor <input type="text" value="0,00"/> in <input type="button" value="v"/> | Emisividad <input type="text" value="0,00000"/> |
| | Conductividad <input type="text" value="0,00000"/> BTU/h <input type="button" value="v"/> |
| Características Geológicas | <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Guardar"/> |
| Gradiente Geotérmico <input type="text" value="0,000"/> 1/*F <input type="button" value="v"/> | |
| Net to Gross Promedio <input type="text" value="0,000"/> | |

9.1 Características del pozo

El usuario introducirá los datos básicos del pozo a trabajar los cuales son:

9.1.1 PMF

El usuario ingresara la profundidad media de las perforaciones en pies o metros, normalmente los yacimientos sometidos a proceso de inyección de vapor para recobro mejorado de aceite son someros es decir se encuentran aproximadamente entre un rango de 500 y 3000 pies de profundidad.

9.1.2 Diámetro

Este valor puede estar del orden de 12 pulgadas y debe ser diferente al diámetro exterior del revestimiento, teniendo en cuenta que el volumen comprendido entre los dos encuentra ocupado por cemento. Se podrá ingresar en pulgadas, pies, centímetros o metros.

9.1.3 Tipo de pozo

El usuario tendrá la opción de elegir el tipo de pozo a analizar, entre las opciones se encuentra pozo a hueco abierto, pozo con aislante, pozo sin aislante. Una vez realizada la elección se habilitarán las casillas correspondientes al tipo de pozo.

9.2 Propiedades térmicas del aislante

Si el usuario elige la opción de “pozo con aislante” se habilitarán las siguientes casillas:

9.2.1 Emisividad

La emisividad del recubrimiento del aislante que puede variar dependiendo del material con el que es recubierto el aislante, los valores se encuentran en el rango de 0,3 y 0,9.

9.2.2 Conductividad

La conductividad se puede ingresar en $\frac{BTU}{h*ft*^{\circ}F}$ o $\frac{W}{m*K}$.

9.2.3 Espesor

El espesor de aislante debe ser ingresado en pulgadas.

9.3 Características geológicas

Para el estudio de la transferencia de calor en el pozo es necesario conocer la variación de la temperatura a través de la profundidad y el porcentaje de pérdida de acuerdo al tipo de roca que se encuentra.

9.3.1 Gradiente Geotérmico

El gradiente geotérmico, expresado en $\frac{^{\circ}F}{ft}$ en el rango aproximado de 0,01 y 0,08 esto varía de la ubicación geográfica del pozo.

9.3.2 Net to Gross promedio

Hace referencia al porcentaje de areniscas promedio en la columna estratigráfica.

9.4 Características de la tubería de inyección

Esta opción está disponible para los 3 tipos de pozo, el usuario ingresará los datos básicos de la tubería de inyección de vapor presente en el pozo de estudio los cuales son:

- Diámetro externo
- Diámetro interno
- Conductividad
- Emisividad

9.5 Características del revestimiento

Esta opción está disponible para "pozo con aislante" y "pozo sin aislante", el usuario ingresará los datos básicos de la tubería de revestimiento "Casing" de vapor presente en el pozo de estudio. De un pozo a otro pueden variar significativamente de acuerdo al plan de perforación- cementación y disponibilidad de revestimientos de la compañía en esos momentos. Los datos básicos que se requieren son:

- Diámetro interno
- Diámetro externo
- Conductividad
- Emisividad

10. Una vez cargado los datos el usuario tendrá la opción de seleccionar entre las casillas “guardar “y “reset”. Si elige la opción guardar podrá escoger el nombre y la ubicación del archivo que desee caso contrario si hace clic en reset se borrara todos los datos introducidos.

Modulo Creación de caso de Simulación

11. En este módulo el usuario tendrá nuevamente la opción de “Cargar archivo de simulación “, “Nueva simulación” o “Abrir resultados.

12. Al seleccionar Nueva simulación, se desplegará una ventana nueva como se observa a continuación.

La Chaleur | Controles de Simulación

Creación de Caso de Simulación

Carga de archivos de simulación

Tubería de Superficie: ...

Tubería de Pozo: ...

Cargar

Condiciones Iniciales

Caudal de Agua Equivalente: BBL/Día

Presión de Entrada a Tub: psi

Temperatura Ambiente: °F

Velocidad del Viento: mi/hr

Calidad Inicial: Fracción **Estimar**

Tiempo de Inyección: Horas

Discretización de tiempo: Horas

Guardar Simulación **Reset** **Iniciar Simulación**

Tubería de Superficie

| Nombre | Longitud [ft] | # de Tramos | Long. Tramo |
|--------|---------------|-------------|-------------|
| | | | |

Editar Discretización

Tubería de Fondo

Longitud: ft

Discretización: Tramos

Tipo de Pozo:

Long. Tramo:

Calcular Discretización

Inicialmente para habilitar la entrada de datos de este módulo el usuario debe cargar los archivos de tubería de superficie y tubería de pozo que se encontraran en la ubicación que el usuario haya elegido en los módulos anteriores.

13. Una vez terminando el paso anterior se debe dar clic en “cargar” y se podrá continuar con la introducción de los datos para la simulación.

La Chaleur | Controles de Simulación

Creación de Caso de Simulación

Carga de archivos de simulación

Tubería de Superficie:

Tubería de Pozo:

Tubería de Superficie

| Nombre | Longitud [ft] | # de Tramos | Long. Tramo |
|---------|---------------|-------------|-------------|
| Tramo 1 | 2000 | 100 | 20 |
| Tramo 2 | 1200 | 100 | 12 |
| Tramo 3 | 1200 | 100 | 12 |

Condiciones Iniciales

Caudal de Agua Equivalente: BBL/Día

Presión de Entrada a Tub: psi

Temperatura Ambiente: °F

Velocidad del Viento: mi/hr

Calidad Inicial: Fracción

Tiempo de Inyección: Horas

Discretización de tiempo: Horas

Tubería de Fondo

Longitud: ft

Discretización: Tramos

Tipo de Pozo: Pozo con aislante en fondo

Long. Tramo:

13.1 Condiciones iniciales

Para el desarrollo correcto del programa es necesario el suministro de información básica que el usuario debe estar en capacidad de proporcionar.

13.1.1 Caudal de agua equivalente

Corresponde al volumen de agua que se está introduciendo al generador para ser convertido en vapor de agua, las unidades deben estar en $\left(\frac{BBL}{Día}\right)$

13.1.2 Presión de entrada a tub

El valor de la presión con la cual está saliendo el vapor del generador, esta se debe ingresar en unidades de (psi).

13.1.3 Temperatura ambiente

Es necesario conocer la temperatura promedio del ambiente donde se desea realizar el estudio ya que es un parámetro fundamental en la transferencia de calor por convección, debe ser suministrada en (°F).

13.1.4 Velocidad del viento

La velocidad del viento se debe suministrar en millas por hora y es variable dependiente de la geográfica donde se encuentre dispuesta la tubería.

13.1.5 Calidad inicial

El usuario debe ingresar el valor de la calidad del vapor a la salida del generador en fracción, si este valor es desconocido tendrá la opción de determinarla haciendo clic en el recuadro azul “estimar” ubicado a la derecha de esta casilla.

Una vez realizado este paso aparecerá una ventana en la cual se preguntarán variables mínimas para que el programa internamente determine cuál es el valor de la calidad del vapor a la salida del generador.

La Chaleur | Estimación de Calidad de Salida

Estimación de calidad de salida del generador

A continuación, completa toda la información requerida con el fin de estimar la calidad de salida del generador a partir de la realización de un balance energético.

Condiciones de Entrada

| | | |
|------------------------------|------------------------------------|----------|
| Caudal de Agua Equivalente | <input type="text" value="18000"/> | BBL/Día |
| Presión de la Tubería | <input type="text" value="1100"/> | psi |
| Temperatura de Entrada | <input type="text" value="0,0"/> | °F |
| Flujo de Combustible | <input type="text" value="0,0"/> | Ft3/Día |
| Poder Calorífico Combustible | <input type="text" value="0,0"/> | BTU/ft3 |
| Eficiencia del Generador | <input type="text" value="0,000"/> | Fracción |

Calidad Estimada

- **Flujo de combustible**

En LA CHALEUR se asume que el generador opera con gas para elevar la temperatura del agua, de esta manera es necesario conocer el caudal del mismo que se le está suministrando al generador en $\left(\frac{ft^3}{Dia}\right)$

- **Poder calorífico del gas**

Esta propiedad del gas debe ser conocida por el usuario ya que es la forma de cuantificar la energía que le puede suministrar el gas y de hecho es el principal parámetro para su compra en el mercado energético, debe estar en unidades de $\left(\frac{Btu}{ft^3}\right)$

- **Eficiencia del generador**

Corresponde al valor en fracción de la cantidad de calor que el gas le suministra al agua con respecto al que posee.

13.1.6 Tiempo de inyección

Este tiempo debe estar suministrado en días y es un parámetro importante ya que el calentamiento de la tierra como se conoce es función del tiempo.

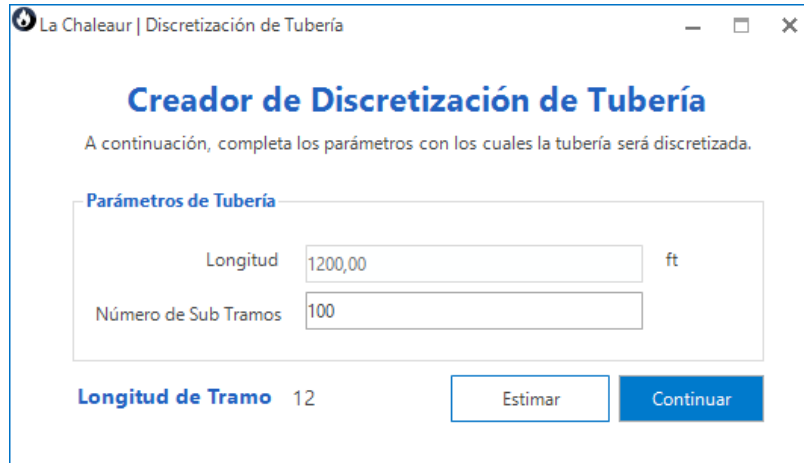
13.1.7 Discretización de tiempo

Este parámetro se usará con el fin de conocer el valor de las pérdidas durante los días de inyección de manera detallada, este valor varía entre 24 horas hasta el tiempo de inyección.

13.2 Tubería de superficie

En esta sección el usuario encontrara los tramos de tuberías cargados al inicio de la simulación con el objetivo de poder dividir los tramos en la cantidad de subtramos que el usuario desee que el programa realice el cálculo y así obtenga

datos más representativos del proceso. Al hacer clic en el recuadro azul “calcular discretizaron” inmediatamente se determinará la distancia de estos sub tramos.



La Chaleur | Discretización de Tubería

Creador de Discretización de Tubería

A continuación, completa los parámetros con los cuales la tubería será discretizada.

Parámetros de Tubería

Longitud ft

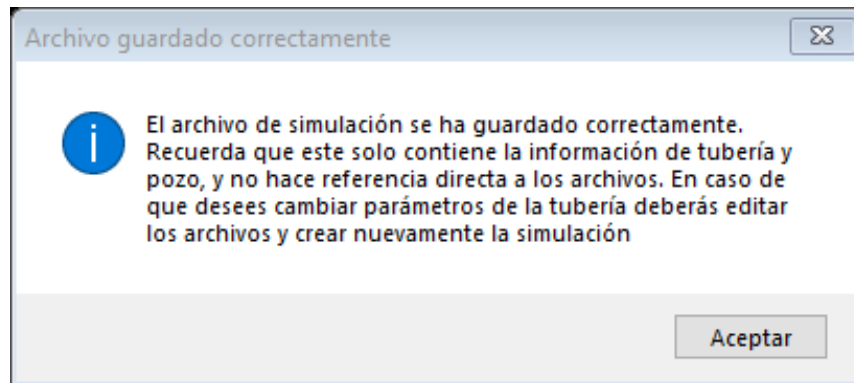
Número de Sub Tramos

Longitud de Tramo 12

13.3 Tubería de fondo

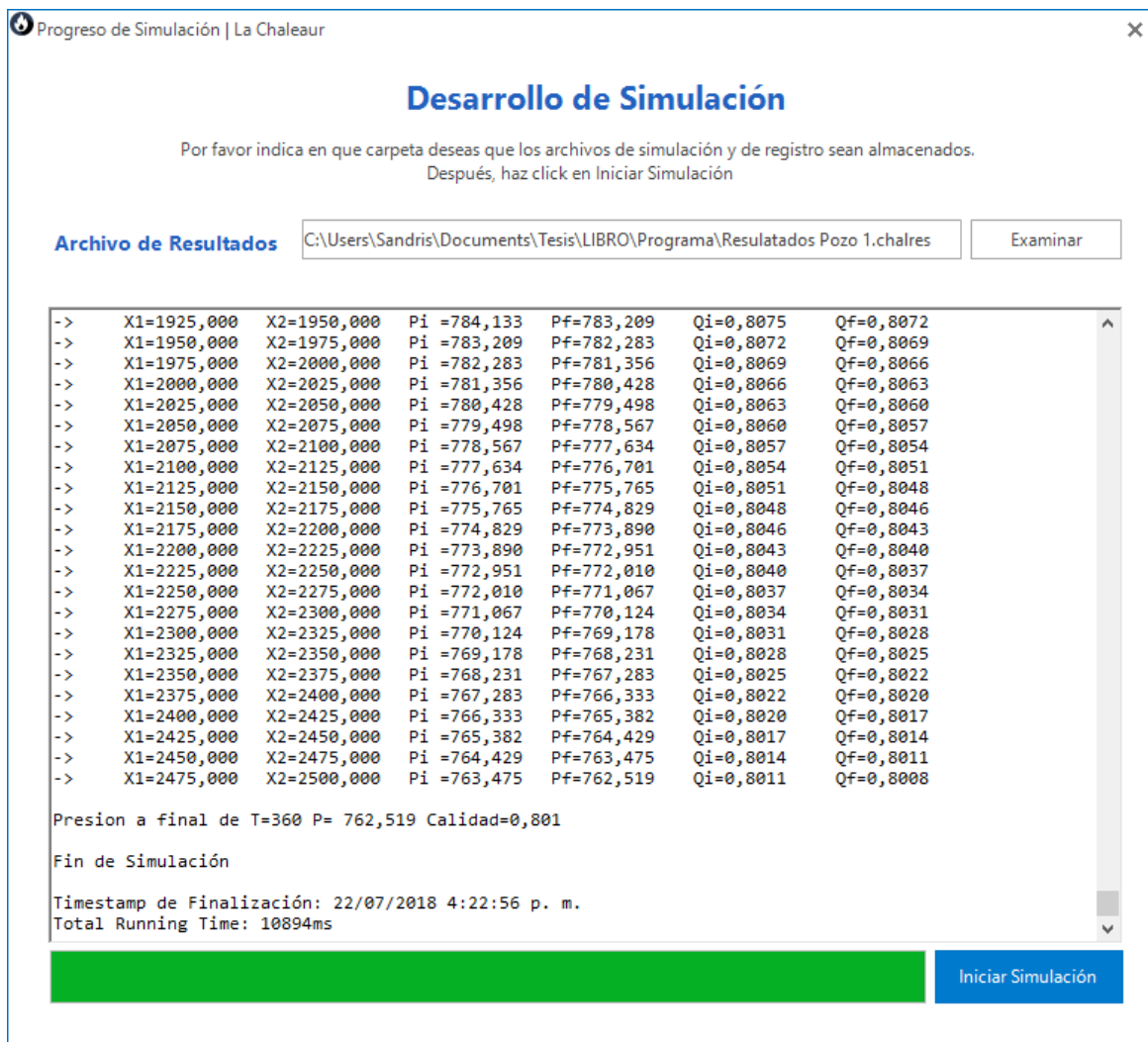
En esta sección el usuario encontrara la profundidad del pozo a trabajar cargada al inicio de la simulación con el objetivo de poder dividir el pozo en la cantidad de subtramos que el usuario desee que el programa realice el cálculo y así obtenga datos más representativos del proceso. Al hacer clic en el recuadro azul “editar discretizaron” aparecerá la ventana presentada a continuación que ayudará el usuario a realizar este proceso.

- Una vez cargado los datos el usuario tendrá la opción de seleccionar entre las casillas “guardar simulación “, “reset” y “iniciar simulación”. Si elije la opción guardar simulación podrá guardar el archivo con el nombre y la ubicación que desee, una vez guardado aparece el siguiente aviso emergente de aclaración al darle aceptar se podrá seguir con la simulación.

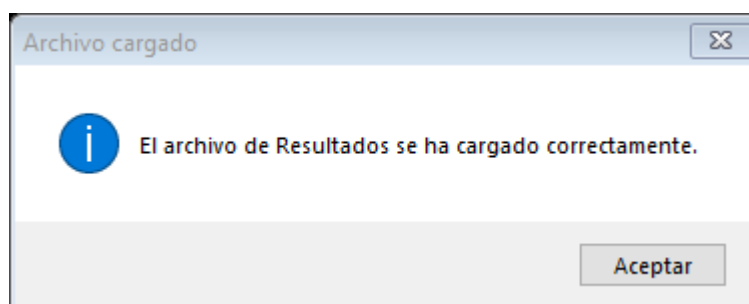


15. Al elegir la opción “guardar simulación” se debe iniciar en que carpeta desea que los archivos de simulación y registro sean almacenados. Después podrá hacer clic en “Iniciar simulación”

16. Cuando termine el proceso de simulación una ventana con la que se encuentra a continuación aparecerá en esta se podrá ver los resultados de ubicación del subtramo en distancia inicial X_1 y distancia final X_2 , presión inicial y final y calidad inicial y final. Además, se visualizará la hora local del equipo y fecha de la realización de la simulación junto con el tiempo que el programa se tomó para los cálculos.



17. Al terminar la simulación ya estará listo para visualizar los resultados, al hacer clic en “abrir resultados” el usuario tendrá que cargar el archivo de simulación creado en la opción anterior debería aparecer el siguiente mensaje:



18. Una vez cargado inmediatamente aparecerán 3 iconos nuevos, “exportar a Excel”, “graficas” y generar reporte.

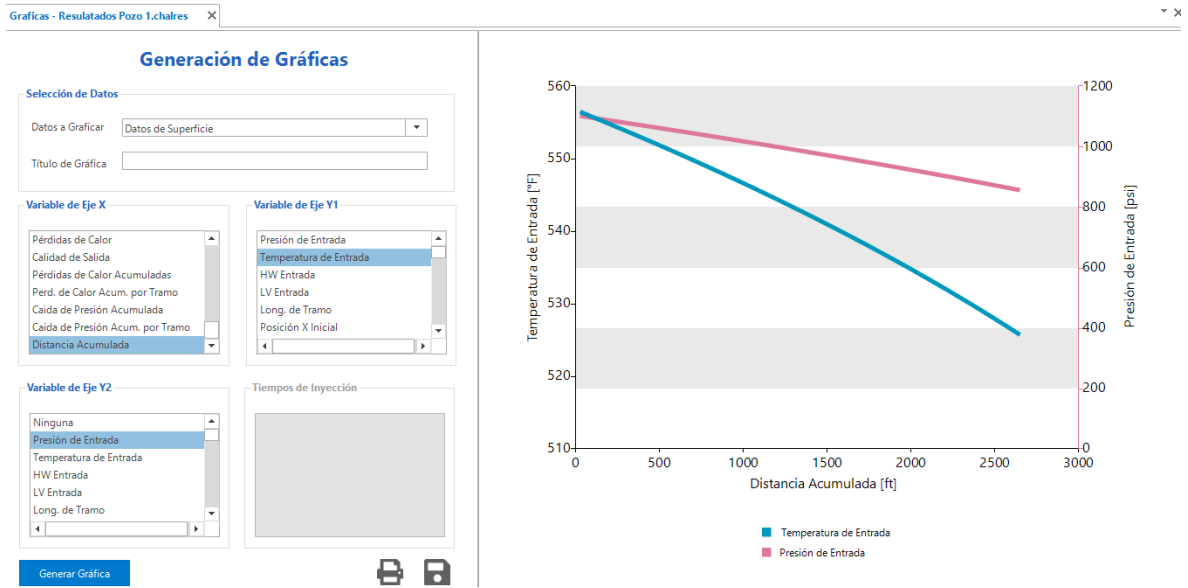


19. Si se elige la opción de “exportar a Excel” creará un archivo en Microsoft Excel que tendrá una tabla que contiene todos los datos de los resultados de la simulación.
20. En la opción de generar graficas el usuario podrá crear más de 30.000 combinaciones en gráficas, debido a que tendrá la opción de crear plots multi-eje en coordenadas cartesianas (un eje X y dos ejes Y).
21. Inicialmente tendrá que seleccionar que el paquete de datos que desea graficar, podrá escoger entre “Datos de Superficie”, “Datos de Pozo” y “Datos generales”.
22. Una vez determinado se tendrá la opción de nombrar la gráfica como el usuario desee y elegir la propiedad correspondiente a cada eje entre las mencionadas en la siguiente tabla:

| Propiedad | Definicion |
|------------------------|--|
| Presión de entrada | Presión del fluido a la entrada de cada subtramo. |
| Temperatura de entrada | Temperatura del fluido a la entrada de cada subtramo. |
| HW Entrada | Entalpia de entrada del fluido a cada subtramo. |
| LV Entrada | Calor latente de entrada del fluido de cada subtramo. |
| Long. De tramo | Longitud total del tramo de tubería a estudiar. |
| Posición X Inicial | Posición inicial del subtramo con respecto a una línea horizontal. |
| Posición X Final | Posición final del subtramo con respecto a una línea horizontal. |
| Posición Y Inicial | Posición inicial del subtramo con respecto a una línea vertical. |
| Posición Y Final | Posición final del subtramo con respecto a una línea vertical. |

| | |
|--------------------------------------|---|
| Angulo | Angulo de inclinación del subtramo. |
| Calidad de Entrada | Calidad del vapor de entrada al subtramo. |
| Flujo Másico de Agua | Flujo másico de agua presente en el subtramo. |
| Flujo Másico de Vapor | Flujo másico de vapor presente en el subtramo. |
| Flujo de Calor | Flujo calor presente en el subtramo. |
| Volumen Especifico de Agua | Volumen Especifico de Agua presente en el subtramo. |
| Volumen Especifico de Vapor | Volumen Especifico de Vapor Agua presente en el subtramo. |
| Caudal de Agua | Caudal de Agua en el subtramo. |
| Caudal de Vapor | Caudal de vapor en el subtramo. |
| Velocidad de Agua | Velocidad del Agua que atraviesa el subtramo. |
| Velocidad de Vapor | Velocidad del vapor que atraviesa el subtramo. |
| Velocidad de Mezcla | Velocidad de la mezcla de agua y vapor que atraviesa el subtramo. |
| Régimen de Flujo | Tipo de régimen de flujo que se presenta en el subtramo. Se identifican con la siguiente nomenclatura: 0: Flujo Distribuido 1: Flujo Intermitente 2: Flujo de Transición 3: Flujo segregado |
| Numero de Reynolds | Numero de Reynolds que tiene el fluido en el subtramo. |
| Factor de Fricción TP | Factor de Fricción calculado para cada subtramo. |
| dP/dz Fricción | Perdidas por fricción presentes en el subtramo. |
| dP/dz Elevación | Perdidas por elevación presentes en el subtramo. |
| Caída de presión | Caída de presión total en el subtramo teniendo en cuenta las pérdidas por fricción y por elevación presentes en el subtramo. |
| Presión de salida | Presión del fluido a la salida de cada subtramo. |
| Entalpia de salida | Entalpia de salida a cada subtramo. |
| Temperatura de salida | Temperatura del fluido a la salida de cada subtramo. |
| LV de salida | Calor latente del fluido a la salida de cada subtramo |
| Perdidas de calor | Perdidas de calor que sufrió el fluido en cada subtramo de tubería |
| Calidad de salida | Calidad de la salida del vapor la final de cada subtramo |
| Perdidas de calor Acumuladas | Perdidas de calor totales que sufrió el fluido en todo su recorrido. |
| Perd. de calor Acom. por Tramo | Perdidas de calor totales que sufrió el fluido en cada tramo de tubería |
| Caída de Presión Acumulada | Perdidas de presión totales que sufrió el fluido en todo su recorrido. |
| Caída de presión acumulada por tramo | Perdidas de calor totales que sufrió el fluido en cada tramo de tubería |
| Distancia Acumulada | Longitud total de tubería recorrido por el fluido. |

23. Al terminar de seleccionar los ejes se creará en la parte derecha del módulo la gráfica deseada la cual se tiene la opción de guardar como imagen o impresión directa. El resultado final se evidencia en la siguiente imagen:



Cada grafica tendrá su nombre, título de eje con sus respectivas unidades de medida y su leyenda en el caso que se trabajando los dos ejes Y.

24. Al seleccionar “generar reporte” tendrá la opción de realizar reportes por tramo en superficie, del pozo y reporte general, en este caso se encontrará con un archivo excel detallado del proceso elegido.

