

PROGRAMA REGIONAL DE ENTRENAMIENTO GEOTÉRMICO (PREG)

Diplomado de especialización en geotermia 2015

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Unidad de Postgrados



Análisis de Optimización energética de un sistema de acarreo de recursos geotérmico

Área de estudio:

Plantas geotérmicas y Aplicaciones de mediana y baja entalpia

Por :

Carlos Armando Sarmiento Zelaya
Guillermo Alfonso Rivas Herrera
José Alejandro Guzmán Martínez

Tutor: Ing. José Luis Henríquez

Colaboradores : Ing. Álvaro Flamenco e Ing. Oscar Cideos

Índice

Índice.....	2
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	5
Resumen	6
Introducción	7
Objetivos.....	8
Objetivo General.	8
Objetivos específicos.	8
Alcances	9
1. Marco teórico	10
1.1. Fundamentos de Mecánica de Fluidos	10
1.1.1. Hipótesis del continuo.....	10
1.1.2. Viscosidad dinámica	10
1.1.3. Viscosidad cinemática	11
1.1.4. Teorema de Bernoulli	12
1.1.5. Ecuación de Continuidad.....	12
1.1.6. Pérdidas de Presión en Tuberías.....	13
1.2. Fundamentos de Transferencia de Calor.....	16
1.2.1. Mecanismos de Transferencia de Calor.....	16
1.2.1.1. Transferencia de calor por conducción.....	17
1.2.1.2. Transferencia de calor por convección.....	17
1.2.1.3. Transferencia de Calor por Radiación	19
1.2.2. Aislamiento Térmico.....	19
1.2.2.1. Clasificación de los aislamientos térmicos	20
2. Metodología de Análisis	22
2.1. Descripción de Campo Geotérmico	22
2.2. Metodología.....	23
2.3. Descripción de Layout de Trabajo	24
3. Variables de entrada y criterios de diseño	25
4. Análisis de pérdidas de presión	26

4.1. Análisis para tubería con rugosidad de 0.05 que corresponde a una tubería de acero nueva	26
4.2 Análisis para tubería con rugosidad de 1.5 que corresponde a una tubería de acero con incrustaciones.....	27
4.3. Evaluación de la caída de presión en función de rugosidad y flujo másico	28
4.3.1 Caída de presión en función de la rugosidad interna de la tubería.	28
4.3.2 Caída de presión en función del flujo másico.	29
5. Análisis de pérdidas de calor.....	31
5.1. Tubería de Vapor.....	33
5.2. Tubería de Transporte de Líquido.....	36
5.3. Resumen de análisis para tubería de vapor.....	41
5.4. Resumen de análisis para tubería de líquido	41
Conclusiones	43
Recomendaciones	44
Bibliografía.....	45
Anexos	46
Anexo 1 – Programa EES para análisis de caída de presión.....	46
Anexo 2 – Programa EES para análisis de Transferencia de Calor.....	47
Anexo 3 – Diagrama de Moody	50

Índice de Figuras

Figura 1. Gradiente de velocidad causado por la viscosidad.....	10
Figura 2. Volumen de control en ecuación de continuidad	12
Figura 3. Diagrama esquemático de campo geotérmico a analizar.Elaboración Propia ...	22
Figura 4. Esquema de metodología a implementar. Ref. Elaboración Propia.....	23
Figura 5. Layout de trabajo Ref. Elaboración Propia.....	24
Figura 6. Representación de tramo de tubería en análisis. Ref. Elaboración Propia	24
Figura 7. Caída de presión en tubería nueva	26
Figura 8. Caída de presión en tubería usada	27
Figura 9. Caída de presión en función de rugosidad.....	29
Figura 10. Caída de presión en función de flujo másico en tubería de vapor	30
Figura 11. Caída de presión en función de flujo másico en tubería de líquido.....	30
Figura 12. Esquema de Interacción Aislamiento – Tubería. Ref. Estudio de Determinación de Pérdidas de Vapor del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Vol. 24, N°2, Julio-Diciembre 2011.....	31
Figura 13. Calor perdido y flujo de condensado para tubería de 36 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	34
Figura 14. Calor perdido y flujo de condensado para tubería de 40 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	35
Figura 15. Calor perdido y flujo de condensado para tubería de 48 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	36
Figura 16. Calor perdido y caída de temperatura en aislante, para tubería de 16 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	37
Figura 17. Calor perdido y temperatura superficial para tubería de 16 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	37
Figura 18. Calor perdido y caída de temperatura en aislante para tubería de 20 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	38
Figura 19. Calor perdido y temperatura superficial para tubería de 20 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	39
Figura 20. Calor perdido y caída de temperatura en aislante para tubería de 24 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	40
Figura 21. Calor perdido y temperatura superficial para tubería de 24 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio.....	40

Índice de Tablas

Tabla 1. Coeficiente de pérdidas para distintos accesorios.....	15
Tabla 2. Variables de Entrada.....	25
Tabla 3. Criterios de Diseño.....	25
Tabla 4. Caída de presión en función de diámetro interno para tubería nueva	26
Tabla 5. Caída de presión en función de diámetro interno en tubería usada.....	27
Tabla 6. Diámetros de tubería recomendados	28
Tabla 7. Caída de presión en función de rugosidad para tubería de vapor y líquido	28
Tabla 8. Caída de presión en función de flujo másico para tubería nueva y usada	29
Tabla 9. Caída de presión en función de flujo másico en tubería de líquido.....	30
Tabla 10. Calor perdido en función de aislante térmico y flujo de vapor condensado para tubería de 36 pulgadas de diámetro.....	33
Tabla 11. Calor perdido en función de aislante térmico y flujo de vapor condensado para tubería de 40 pulgadas de diámetro.....	34
Tabla 12. Calor perdido en función de aislante térmico y flujo de vapor condensado para tubería de 48 pulgadas de diámetro.....	35
Tabla 13. Calor perdido en función de aislante térmico y caída de temperatura para tubería de 16 pulgadas de diámetro.....	36
Tabla 14. Calor perdido en función de aislante térmico y caída de temperatura para tubería de 20 pulgadas de diámetro.....	38
Tabla 15. Calor perdido en función de aislante térmico y caída de temperatura para tubería de 24 pulgadas de diámetro.....	39

Resumen

El Proyecto consiste en el análisis de optimización energética, para un sistema de acarreo de vapor y agua geotérmica de una unidad de separación. Comprendiendo este la parte de mecánica de fluidos y transferencia de calor, a través de una metodología propuesta.

El objetivo del análisis es proponer medidas que permitan condiciones óptimas de operación bajo variables de entrada establecidas y consecuentemente obtener un aprovechamiento máximo de los recursos geotérmicos.

Utilizando datos de entrada y criterios de diseño para un campo geotérmico determinado se realiza un análisis hidráulico de pérdidas de presión y un análisis térmico de pérdidas de calor y caída de temperatura utilizando el software EES (Engineering Equation Solver).

Los resultados obtenidos en el análisis de caída de presión indican que para no exceder 1 bar como criterio de diseño, los diámetros recomendados para tubería de vapor son de 36, 40 y 48 pulgadas, mientras que para tubería de líquido estos son 16, 20 y 24 pulgadas.

En el análisis de pérdidas térmicas se recomiendan espesores de aislante de Silicato de Calcio y Lana Mineral de tal manera que las pérdidas no excedan el valor de 0.1 Kg/s de vapor condensado, y que la temperatura superficial de la tubería con aislante y cubierta de lámina sea aproximadamente 50°C.

Recomendando para tubería de vapor en los diámetros mencionados un espesor de aislante de 3 pulgadas y en la tubería líquido un espesor de aislante entre 1 y 2 pulgadas.

Introducción

En un sistema en donde se ve involucrado el transporte de un fluido a altas temperaturas, tienen gran relevancia las áreas de mecánica de fluidos, transferencia de calor, eficiencia energética y la rama estructural cuando estos sistemas son de gran tamaño.

Al ser sistemas grandes, incluso las pérdidas más pequeñas por unidad de longitud se vuelven considerables al sumar el efecto total, es por esta razón que una evaluación desde el punto de vista de la eficiencia energética es vital para poder detectar pérdidas ya sea desde la parte de mecánica de fluidos o transferencia de calor con el fin de detectar puntos de interés en los cuáles se puedan tomar acciones con el fin de eliminar o reducir en la medida de lo posible estas pérdidas y obtener un aumento en la eficiencia del sistema.

Es por lo anterior que se propone la realización de la evaluación de optimización energética en un sistema de acarreo tanto en la parte de mecánica de fluidos y transferencia de calor, que involucrará la simulación del sistema en condiciones determinadas para detectar posibles puntos de mejora en cuanto a aislamiento térmico o reducción de fricción en tuberías.

Objetivos

Objetivo General.

Elaborar un análisis de optimización energética de un sistema de acarreo geotérmico, identificar sus problemas y plantear propuestas de mejora para aumentar la productividad del proceso de acarreo.

Objetivos específicos.

- Conocer e identificar los posibles componentes de un sistema de acarreo de fluidos geotérmicos.
- Identificar en un sistema de acarreo los principales factores de pérdidas energéticas.
- Elaborar un análisis térmico de transferencia de calor.
- Elaborar un análisis hidráulico de caídas de presión.

Alcances

- Realización de análisis hidráulico y de transferencia de calor de una línea de acarreo convencional para fluido geotérmico.
- Simulación del sistema en condiciones de trabajo (análisis en estado estable de operación).
- Comportamiento del sistema ante distintos escenarios con la variación de distintos parámetros de operación.
- Recomendación para la optimización de la productividad de un sistema de acarreo de fluidos geotérmicos.
- Realizar un metodológica de análisis para otros parámetros de entrada y diseño de sistemas de acarreo de fluidos geotérmicos.

1. Marco teórico

1.1. Fundamentos de Mecánica de Fluidos

Los fluidos son un medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil, se caracterizan por cambiar de forma sin que existan fuerzas restitutivas que tiendan a recuperar la forma original del mismo, entre estos se encuentran los líquidos y los gases. Los líquidos toman la forma del recipiente que los aloja, manteniendo su propio volumen, mientras que los gases carecen tanto de volumen como de forma propios.

Las leyes aplicadas a los fluidos aplican tanto para gases como líquidos a excepción de los flujos donde se tiene una variación apreciable de la densidad, es entonces cuando se tiene la dinámica de gases.

1.1.1. Hipótesis del continuo

Al analizar el flujo de un fluido con expresiones matemáticas y analíticas es necesario considerar que la estructura molecular del fluido es reemplazada por un medio hipotético continuo, esto es debido a que por ejemplo la velocidad en un punto del espacio es indefinida en un medio molecular, ya que siempre sería cero, excepto cuando una molécula ocupe ese punto exacto, en ese momento sería la velocidad de la molécula y no la velocidad media de la masa de las partículas que están a su alrededor.

Cuándo se establece la hipótesis del continuo se puede analizar en flujo de un fluido a partir de las propiedades macroscópicas de este.

1.1.2. Viscosidad dinámica

La viscosidad es una propiedad que tiende a retardar el flujo de un fluido. Si se tienen dos placas y entre ellas hay un fluido y luego se aplica una fuerza que hace que la placa superior se mueva se apreciara una deformación del fluido.

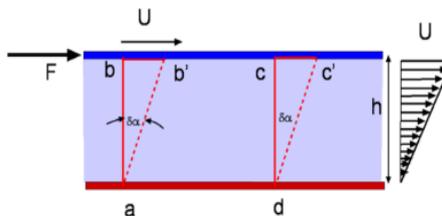


Figura 1. Gradiente de velocidad causado por la viscosidad

En la figura 1.1 se puede observar que la velocidad del fluido varía desde cero hasta el valor de la velocidad de la placa, se forma entonces un gradiente de velocidad causado por la viscosidad y en su forma más simple este gradiente presenta una variación lineal con la distancia de separación de las placas.

El gradiente de velocidad causa esfuerzos cortantes en el fluido que están relacionados por medio de una proporcionalidad directa dada por:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Donde,

τ	:	Esfuerzo Cortante
μ	:	Viscosidad Dinámica
$\frac{du}{dy}$:	Gradiente de Velocidad

En la cual la constante de proporcionalidad μ es conocida como la viscosidad dinámica o absoluta, por medio de un análisis dimensional se determina que las unidades correspondientes a la viscosidad dinámica son $N s/m^2$.

1.1.3. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es simplemente una expresión que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido, es una propiedad muy importante que se presenta en el flujo de fluidos, la expresión que relaciona estas variables es:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde,

v	:	Viscosidad Cinemática
μ	:	Viscosidad Dinámica
ρ	:	Densidad del Fluido

Las unidades de la viscosidad cinemática son: m^2/s en el sistema internacional.

1.1.4. Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli afirma que energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo. En un fluido hay tres formas de energía presentes; la energía potencial, la energía cinética y la energía de flujo. Si se asumen dos puntos a lo largo de la trayectoria, distanciados uno del otro, la magnitud de las energías en un punto pueden variar con respecto al otro, pero la sumatoria total de las energías siempre será la misma.

La ecuación de Bernoulli se usa para determinar los valores de carga de presión, carga de elevación y cambio de la carga de velocidad, conforme el fluido circula a través del sistema.

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

Donde,

p	:	Presión del fluido en un punto
γ	:	Peso específico del fluido
v	:	Velocidad del fluido en un punto
g	:	Aceleración de la gravedad
z	:	Altura de un punto medida desde un nivel de referencia

1.1.5. Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad no es más que un caso particular del principio de conservación de la masa. Se basa en que el caudal (Q) del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción.

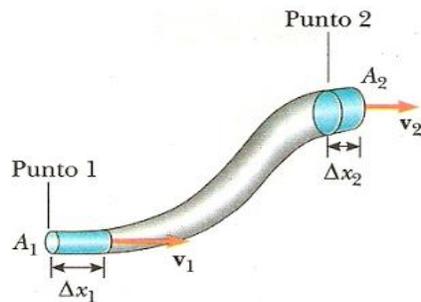


Figura 2. Volumen de control en ecuación de continuidad

$$Q_1 = Q_2$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Donde,

Q	:	Caudal
v	:	Velocidad del fluido
A	:	Área de sección transversal del fluido

1.1.6. Pérdidas de Presión en Tuberías

La pérdida de carga en una tubería o canal, es la pérdida de presión en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce. Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, o accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, etc.

1.1.6.1. Pérdida de carga en conducto o primarias

Si el flujo es uniforme, es decir que la sección es constante, y por lo tanto la velocidad también es constante, el principio de Bernoulli, entre dos puntos puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + Hf$$

El comportamiento de un fluido, en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Un medio para predecir este comportamiento en el flujo es con el manejo del número adimensional Reynolds, demostrado por Osborne Reynolds. Esta ecuación se define como:

$$Re = \frac{VD\rho}{\nu} = \frac{vD}{\mu}$$

Donde,

Re	:	Número de Reynolds
V	:	Velocidad del fluido (m/s)

D	:	Diámetros de Tubería (m)
ρ	:	Densidad del fluido (kg/m ³)
ν	:	Viscosidad Cinemática (m ² /s)
μ	:	Viscosidad Dinámica (kg/m-s)

. Este número relaciona las fuerzas de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. Para aplicaciones prácticas se tiene que los flujos con $Re < 2000$, se encuentran en estado laminar, y los $Re > 4000$, están en régimen turbulento. Los $2000 < Re < 4000$, están en la región de transición o región crítica.

Se denomina como h_L a la pérdida de energía en el sistema. De forma matemática esta se expresa a través de la ecuación de Darcy:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Donde,

f	:	Factor de Fricción
L	:	Longitud de Tubería
D	:	Diámetros de Tubería
v	:	Velocidad Promedio
g	:	Aceleración de la gravedad

El de fricción, f , se evalúa dependiendo del régimen en el que se encuentre el fluido. Una vez se tenga certeza del régimen en el que se está, se aplica alguna de estas expresiones:

Para flujo turbulento:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{1}{3.7\left(\frac{D}{\varepsilon}\right)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)^2 \right]}$$

Para flujo laminar:

$$f = \frac{64}{Re}$$

El término D/ε hace referencia a la rugosidad relativa, donde ε es la rugosidad promedio de la pared del tubo.

Cabe resaltar que otro de los métodos indispensables para evaluar el factor de fricción es el Diagrama de Moody, el cual muestra la gráfica del factor de fricción versus el Re, con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa. (Consultar Anexos)

1.1.6.2 Expresiones prácticas para el cálculo

Existen diversos métodos, obtenidos empíricamente, para calcular la pérdida de carga a lo largo de tuberías y canales abiertos:

- Ecuación de Darcy-Weisbach.
- Ecuación de Colebrook-White.
- Fórmula de Hazen-Williams.
- Diagrama de Moody.
- Fórmula de Bazin.

1.1.6.3 Pérdidas de carga secundarias

Es importante resaltar que las pérdidas por fricción también se dan por los accesorios que posean las tuberías, para esto se aplica la relación siguiente:

$$h_L = K_f \frac{v^2}{2g}$$

La siguiente tabla da algunos de los valores de K para diferentes tipos de puntos singulares:

Tabla 1. Coeficiente de pérdidas para distintos accesorios

Tipo de singularidad	K
Válvula de compuerta totalmente abierta	0,2
Válvula de compuerta mitad abierta	5,6
Curva de 90°	1,0
Curva de 45°	0,4
Válvula de pie	2,5

Emboque (entrada en una tubería)	0,5
Salida de una tubería	1,0
Ensanchamiento brusco	$(1-(D_1/D_2)^2)^2$
Reducción brusca de sección (Contracción)	$0,5(1-(D_1/D_2)^2)^2$

En campos geotérmicos el vapor producido por los pozos es transportado hacia las plantas generadoras a través de una serie de tuberías conectadas que, comúnmente, constituyen una red compleja de varios kilómetros de longitud. La predicción de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería se complica en los puntos donde se tiene redes de tubería las cuales, por operación normal del campo, su flujo es alterado por la apertura o cierre de válvulas. Sin embargo, dichas redes están ubicadas en las proximidades de la planta y su longitud es relativamente inferior que si se compara con la línea de acarreo que viene desde los pozos productores.

1.2. Fundamentos de Transferencia de Calor

El calor es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esa transferencia es la transferencia de calor.

Es necesario abordar un estudio de transferencia de calor en un sistema de acarreo de fluidos geotérmicos ya que la termodinámica se interesa en la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema realiza un proceso, de un estado de equilibrio a otro, y no indica en cuanto tiempo transcurrirá. En la práctica tiene más interés la razón de transferencia de calor (transferencia de calor por unidad de tiempo) que la cantidad de este último.

El requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura que es la fuerza impulsora para la transferencia de calor, y se produce del medio con la temperatura más alta hacia el medio con temperatura más baja y se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

1.2.1. Mecanismos de Transferencia de Calor

Para proceder a realizar un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación.

El diseño de los sistemas de intercambio de calor y conversión energética requieren del conocimiento de cada uno de estos mecanismos, así como de sus interacciones.

1.2.1.1. Transferencia de calor por conducción

La conducción, es el único mecanismo de transmisión de calor posible en los medios sólidos opacos, cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura. El calor se trasmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, debido al movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones como sucede en los metales.

La ley básica de la conducción del calor (Joseph Fourier), establece: “La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y a la diferencia de temperatura pero inversamente proporcional al espesor del cuerpo”.

$$Q_c = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

El flujo real de calor depende de la conductividad térmica (k), que es una propiedad física del cuerpo que mide la capacidad del material para conducir calor. El signo (-) es consecuencia del segundo principio de la termodinámica, según el cual el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja.

1.2.1.2. Transferencia de calor por convección

Cuando un fluido a T_α se pone en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta T_s , al proceso de intercambio de energía térmica se denomina convección.

Existen dos tipos de convección:

- a) **Convección libre o natural**, ocurre cuando la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensionales, el fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna fuerza motriz exterior.
- b) **Convección forzada**, tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad (v), sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_s mayor o menor que la del fluido T_α .

Independiente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitido Q_c , se puede escribir a través de la Ley de enfriamiento de Newton.

$$Q_c = h A(T_s - T_\alpha)$$

Donde,

h	:	Coficiente de transferencia de calor entre la interface líquido – sólido ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
A	:	Área superficial en contacto con el fluido (m^2)
T_s	:	Temperatura de Superficie ($^\circ C$)
T_α	:	Temperatura del Fluido ($^\circ C$)

La ecuación anterior sirve como definición de (h), su valor numérico se tiene que determinar analítica o experimentalmente.

El coeficiente de transmisión de calor por convección forzada depende en general, de la densidad, viscosidad, de la velocidad del fluido, de las propiedades térmicas del fluido.

En la convección forzada la velocidad viene impuesta al sistema con una bomba, ventilador y se puede medir directamente.

El número adimensional para la convección forzada es el número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

La convección natural, es causada por fuerzas de empuje que dependen de la variación de densidad y temperatura.

El número adimensional característico para la convección natural es el número de Grashoff (Gr)

$$Gr = \frac{g\beta}{\nu^2} \Delta T \cdot L^3$$

Donde,

Gr	:	Número de Grashoff
g	:	Aceleración de la gravedad
ΔT	:	Diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido
β	:	Coficiente de dilatación térmica del fluido
L	:	Longitud característica

1.2.1.3. Transferencia de Calor por Radiación

Mientras que la conducción y la convección térmica tienen lugar sólo a través de un medio natural, la Radiación térmica puede transportar el calor a través de un fluido o del vacío, en forma de ondas electromagnéticas o fotones como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, estos se propagan a la velocidad de la luz.

La cantidad de energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta a la que se encuentra y también la naturaleza de la superficie.

El radiador perfecto o cuerpo negro, emite una cantidad de energía radiante de su superficie, Q_r :

$$Q_r = \sigma AT^4 = AE_b$$

Donde,

Q_r	:	Transferencia de calor por radiación
σ	:	Constante de Stefan - Boltzmann
T	:	Temperatura del cuerpo emisor de calor
A	:	Superficie del cuerpo emisor de calor
E_b	:	Poder emisivo del radiador

La ecuación anterior expresa que toda superficie negra irradia calor proporcionalmente a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Siendo la emisión independiente de las condiciones de los alrededores, la evaluación de una transferencia neta de energía radiante requiere una diferencia en la temperatura superficial de dos o más cuerpos entre los cuales tiene lugar el intercambio.

1.2.2. Aislamiento Térmico

Funciones Principales

- Reducir la conducción térmica en el material,
- Reducir las corrientes de convección térmica
- Reducir la transferencia de calor por radiación,
- Mantener bien aisladas las tuberías de vapor genera ahorros del 3 a 13% del consumo de combustible de una planta.

Los Datos técnicos más importantes a tener en cuenta para la elección del aislamiento térmico de las tuberías son los siguientes:

- **Conductividad:** Cuanto menor sea la conductividad mejor será el aislamiento térmico del material.
- **Espesor:** Lógicamente cuanto mayor sea este valor, mejor comportamiento térmico se obtiene.
- **Rango de Temperatura :**Es necesario que el fabricante aporte las maximas temperaturas y minimas de trabajo a las que pueden ser sometidas los materiales sin que sufran deterioro.

1.2.2.1. Clasificación de los aislamientos térmicos.

Los aislantes térmicos se pueden clasificar, de acuerdo a su forma y composición, de la siguiente manera:

- *Fibras minerales*
- *Aislantes térmicos granulares*
- *Aislantes térmicos celulares*

Aislantes térmicos de fibras minerales:

Materiales procesados a partir del estado de fusión de roca, escoria o vidrio, y convertidos a fibra con un procedimiento de centrifugación a alta velocidad, o a través de dados de estirado o la combinación de ambos. Las fibras están distribuidas de modo multidireccional y dividen finamente el espacio de aire. Pueden o no estar unidas entre sí.

Aislantes térmicos celulares:

Materiales compuestos por pequeñísimas celdas individuales separadas entre sí. El material celular puede ser vidrio o plástico espumado.

Presentaciones:

- Flexibles, preformados en hojas, rollos, tubos o unidades rectangulares: Placas, medias cañas, módulos, cubiertas para tuberías.
- Espumado en sitio: Poliuretano por aspersión.

Aislantes térmicos granulares:

Materiales compuestos por nódulos que contienen espacios vacíos. Son combinados con fibras de refuerzo con lo que consiguen rigidez, estructura y preforma.

Presentaciones: Rígidos: Blocks, tablas y medias cañas.

Las razones para la utilización del aislamiento térmico son, fundamentalmente:

- a) Necesidades de proceso, ya que deben evitarse transferencias térmicas que limiten la eficiencia térmica el proceso por diferencias de temperaturas no admisibles.
- b) Seguridad de las personas y bienes. Si no existe aislamiento térmico suficiente, las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar lesiones y accidentes en las personas. En el límite, producir efectos de combustión e incendio en materiales combustibles próximos a estas superficies.
- c) El aislamiento térmico reduce las pérdidas energéticas, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento. Es con mucho el mejor método de ahorro de energía conocido, permitiendo la amortización del material aislante instalado en períodos de tiempo muy bajos, por ejemplo, algunas semanas.

2. Metodología de Análisis

La teoría antes indicada se pondrá en práctica desarrollando una metodología que permita el análisis de un sistema de acarreo de vapor y agua geotérmica para un campo con las características siguientes

2.1. Descripción de Campo Geotérmico

El sistema de transporte de fluidos geotérmicos a analizar posee dos zonas de producción ubicadas a 800 msnm, desde estas el flujo de vapor es conducido hacia la planta geotérmica ubicada a 500 msnm a través de una tubería de 1.5 Km de longitud.

Se tiene una unidad de separación para las dos zonas de producción, desde esta unidad se conduce el agua geotérmica hasta la zona de reinyección ubicada a 250 msnm a través de una tubería de 2.5 Km de longitud.

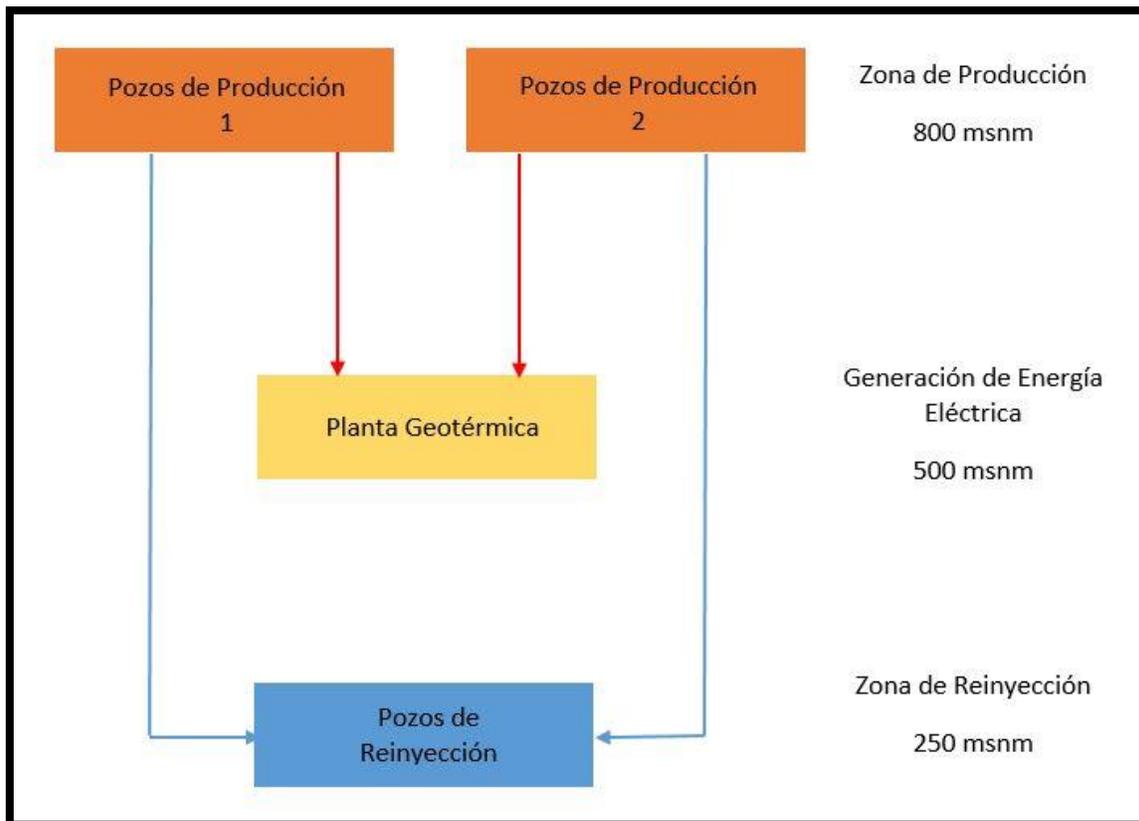


Figura 3. Diagrama esquemático de campo geotérmico a analizar. Ref. Elaboración Propia

2.2. Metodología

Tomando como base ciertos parámetros de entrada de un sistema de acarreo de fluidos geotérmicos y criterios de diseño típicos de estos sistemas en la región; se propone una metodología en la cual se realizará un análisis hidráulico de caída de presión y un análisis térmico de pérdidas de calor. En ambos análisis se utiliza el software EES (Engineering Equation Solver).

El fin del análisis hidráulico es la determinación de un rango de diámetros de tubería que minimicen las pérdidas por fricción tanto en la línea de vapor como la de líquido. Una vez se determine este rango de diámetros tanto, se procederá a realizar el análisis térmico, en que comprende la determinación de las pérdidas de calor para los distintos diámetros obtenidos variando espesor de aislamiento y material utilizado, esto con el fin de realizar recomendaciones técnicas basadas en los resultados obtenidos.

La metodología descrita anteriormente se resume en el siguiente esquema:

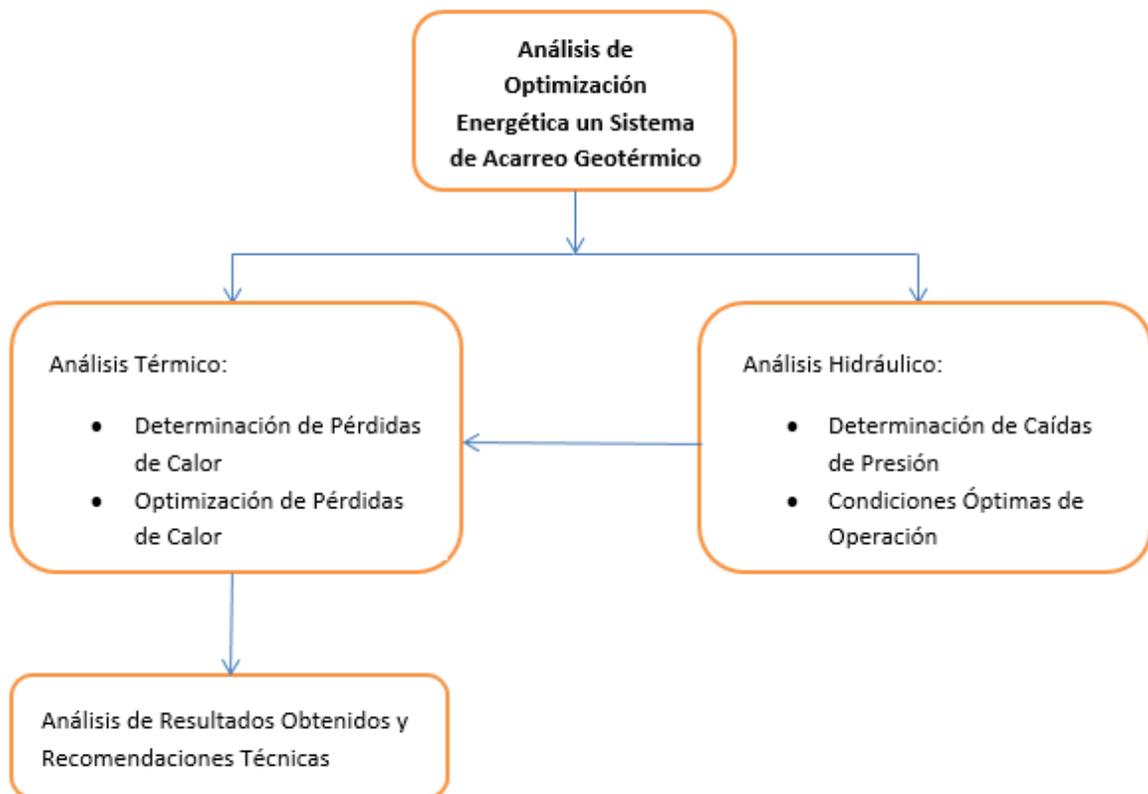


Figura 4. Esquema de metodología a implementar. Ref. Elaboración Propia

2.3.Descripción de Layout de Trabajo

Para ejemplificar la metodología propuesta se analizará una unidad de separación conformado por dos pozos productores ubicados a 800 msnm, para ambos pozos se utiliza una unidad de separación con salida de vapor a la planta geotérmica a través de una tubería de 1.5 km de longitud y salida de agua geotérmica a la zona de reinyección conformada por dos pozos.

Esquemáticamente se tiene el campo geotérmico en la siguiente figura:

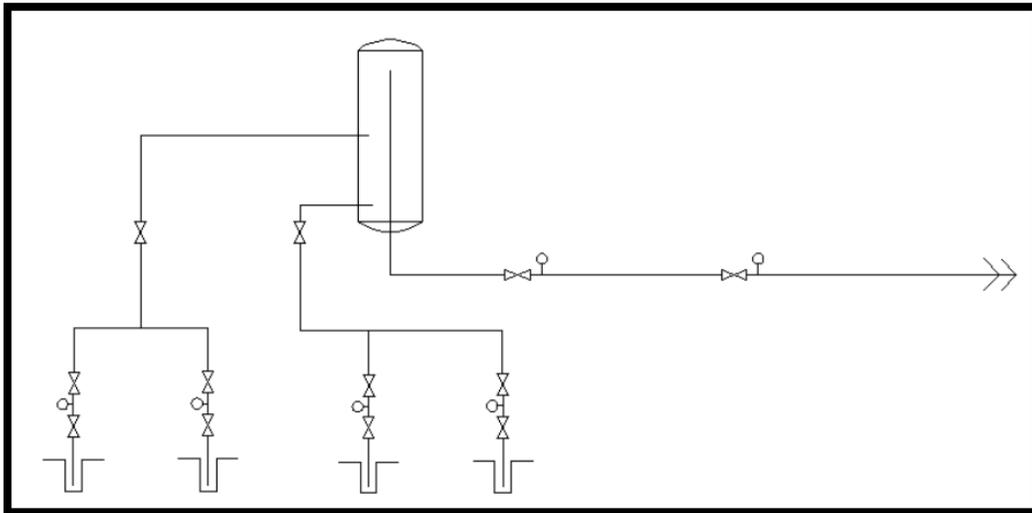


Figura 5. Layout de trabajo Ref. Elaboración Propia

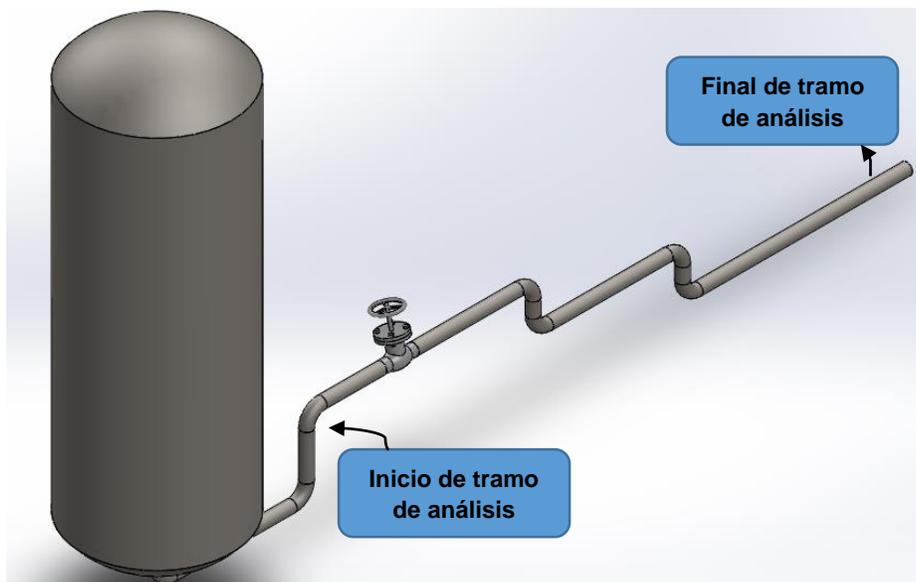


Figura 6. Representación de tramo de tubería en análisis. Ref. Elaboración Propia

3. Variables de entrada y criterios de diseño

Para poder determinar los parámetros óptimos de operación de un sistema, es necesario considerar dos tipos de parámetros para iniciar el análisis de hidráulico y térmico. Las variables de entrada se consideran como datos característicos que son comunes en los sistemas de acarreo de fluido geotérmico y los criterios de diseño son parámetros que se utilizan para dimensionar el sistema, obteniendo como datos de salida diámetros de tubería y espesores de aislamiento.

Tabla 2. Variables de Entrada

Variables de entrada	
Longitud de Tubería de Vapor	1.5 km
Longitud de Tubería de Líquido	2.5 km
Trabajo desarrollado en la turbina	36 MW
Presión a la salida del separador ciclónico	6 Barg
Presión a la entrada de la turbina	4.5 Barg
Ubicación de los pozos productores	800 msnm
Ubicación de los pozos reinyectores	250 msnm
Ubicación de la planta	500 msnm

Tabla 3. Criterios de Diseño

Criterios de diseño	
Velocidad de fluido en tubería de vapor	30 m/s
Velocidad de fluido en tubería de líquido	2 m/s
Flujo másico de vapor	85 kg/s
Flujo másico de líquido	340 kg/s
Calidad del vapor en tubería bifásica	20%
Rugosidad de la tubería (nueva y usada)	0.05 a 1.5
Temperatura ambiente	32°C
Temperatura superficial de tubería	50°C
Material de la Tubería	ASTM 53 grado B
Porcentaje de perdidas secundarias	15%

4. Análisis de pérdidas de presión

Para el caso en estudio el criterio fundamental en el análisis de caída de presión es que en la tubería de vapor no se debe de exceder un valor de pérdidas, para el cual se ha asumido un valor de 1 Barg. Para la realización del análisis se diseñó un programa en el software EES (consultar anexos) que determina un rango de valores de diámetros que cumplen con el criterio antes mencionado. Este análisis se hará tanto para la tubería de vapor como la de líquido.

4.1. Análisis para tubería con rugosidad de 0.05 que corresponde a una tubería de acero nueva

Tabla 4. Caída de presión en función de diámetro interno para tubería nueva

Diámetro (in)	Caída de Presión en tuberías de vapor (Barg)	Caída de Presión en tuberías de líquido(Barg)
12	-	15.09
16	-	3.42
20	11.42	1.08
24	4.46	0.43
28	2.02	0.19
32	1.02	0.10
36	0.56	0.05
40	0.32	0.03
44	0.20	-
48	0.13	-

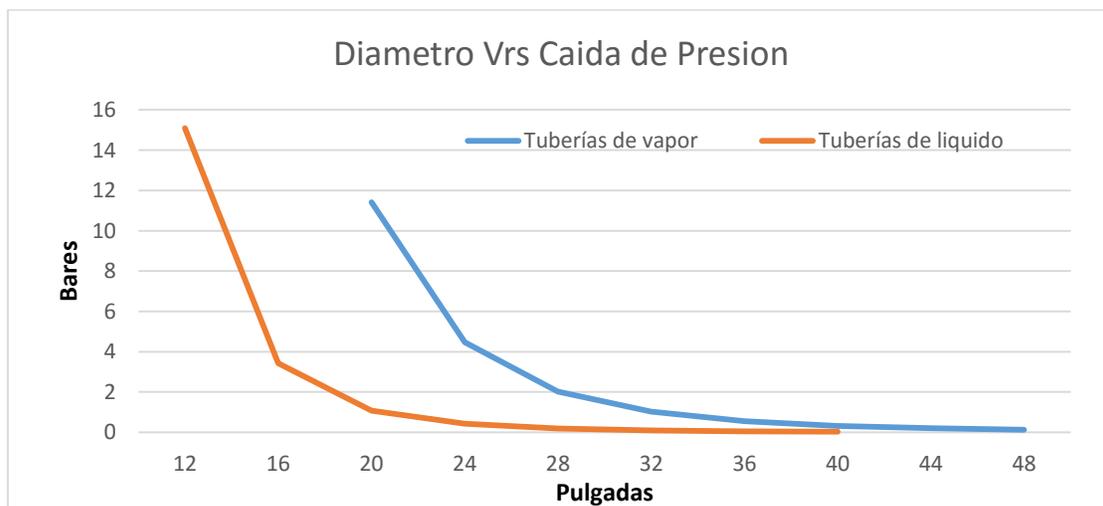


Figura 7. Caída de presión en tubería nueva

Con los resultados obtenidos anteriormente, se puede observar que los diámetros óptimos que cumplen con el criterio antes mencionado para tubería de vapor que cumplen se encuentran en el rango de 32 a 48 pulgadas, mientras que los diámetros óptimos de tubería de líquido que cumplen con el criterio son los que se encuentran entre 20 a 40 pulgadas.

Como diámetros recomendados en tubería de vapor se resaltan los de 36, 40 y 48 pulgadas y para tubería de líquido los diámetros recomendados son los de 16, 20 y 24 pulgadas, se incluye el diámetro de 16 pulgadas ya que en la tubería de líquido la caída de presión puede exceder el valor establecido anteriormente.

4.2 Análisis para tubería con rugosidad de 1.5 que corresponde a una tubería de acero con incrustaciones

Tabla 5. Caída de presión en función de diámetro interno en tubería usada

Diámetro (in)	Caída de Presión en tuberías de vapor (Barg)	Caída de Presión en tuberías de líquido (Barg)
12	-	34.08
16	-	7.43
20	24.57	2.28
24	9.39	0.87
28	4.17	0.39
32	2.06	0.19
36	1.11	0.10
40	0.64	0.06
44	0.39	-
48	0.25	-

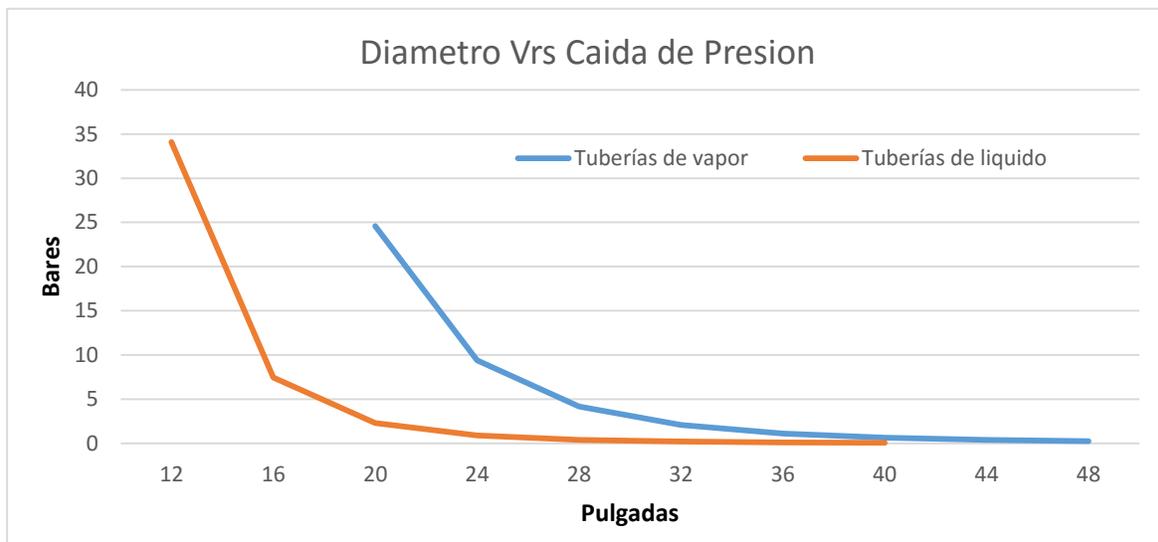


Figura 8. Caída de presión en tubería usada

Con los resultados obtenidos anteriormente, se puede observar que los diámetros óptimos de tubería de vapor que cumplen con el criterio de diseño establecido se encuentran en el rango de 36 a 48 pulgadas, mientras que los diámetros óptimos de tubería de líquido que cumplen con el criterio establecido son los que se encuentran entre 24 a 40 pulgadas.

En la siguiente tabla se resumen los diámetros recomendados para tubería de vapor y líquido a partir de los resultados obtenidos:

Tabla 6. Diámetros de tubería recomendados

Tipo de tubería	Diámetro
Vapor	36",40",48"
Líquido	16",20",24"

4.3. Evaluación de la caída de presión en función de rugosidad y flujo másico

Para tubería de vapor de 40 pulgadas y tubería de líquido de 20 pulgadas se realiza una evaluación para determinar el comportamiento de las caídas de presión conforme varía la rugosidad ya que a medida transcurre el tiempo de servicio del sistema este factor se ve incrementado, a la vez se realiza una evaluación ante la variación de flujo másico dado que los pozos productores sufren un decaimiento en su presión de cabezal y flujo del recuerdo a medida aumenta el tiempo de uso.

4.3.1 Caída de presión en función de la rugosidad interna de la tubería.

A medida transcurre el tiempo de operación del sistema, las incrustaciones y deterioro internode la tubería aumenta, lo que se traduce en aumento de la caída de presión en el tiempo.

Tabla 7. Caída de presión en función de rugosidad para tubería de vapor y líquido

Rugosidad	Caída de presión en tubería (Barg)	
	Vapor 40"	Líquido 20"
0.05	0.32	1.084
0.21	0.41	1.419
0.37	0.46	1.607
0.53	0.5	1.749
0.69	0.53	1.866
0.86	0.56	1.967
1.02	0.58	2.058
1.18	0.6	2.14
1.34	0.62	2.216
1.5	0.64	2.286

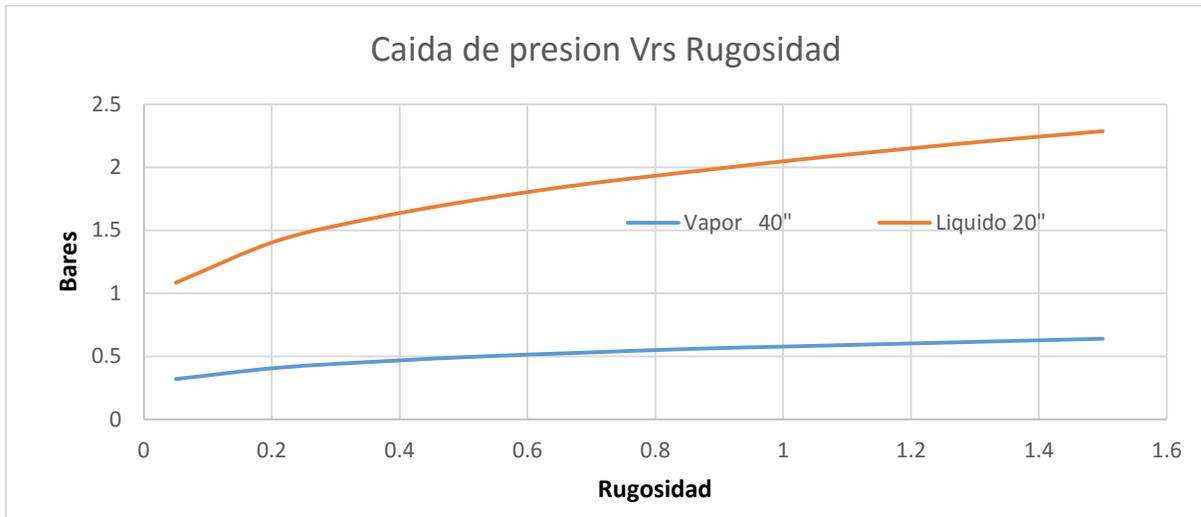


Figura 9. Caída de presión en función de rugosidad

4.3.2 Caída de presión en función del flujo másico.

El flujo másico proveniente de la zona de producción suele variar en el tiempo debido a que característicamente los pozos tienden a experimentar una disminución en su presión de cabezal, es por esto que un análisis de la respuesta del sistema de acarreo ante esta situación es importante para poder realizar las acciones necesarias que prevengan la disminución de la producción de la planta.

Tabla 8. Caída de presión en función de flujo másico para tubería nueva y usada

Flujo Másico vapor (kg/s)	Tubería nueva e = 0.05 (Barg)	Tubería Usada e = 1.5 (Barg)
70	0.2213	0.4335
73	0.2403	0.4715
76	0.26	0.511
79	0.2806	0.552
82	0.3018	0.5947
85	0.3239	0.639
88	0.3467	0.6848
91	0.3704	0.7323
94	0.3947	0.7813
97	0.4199	0.8319

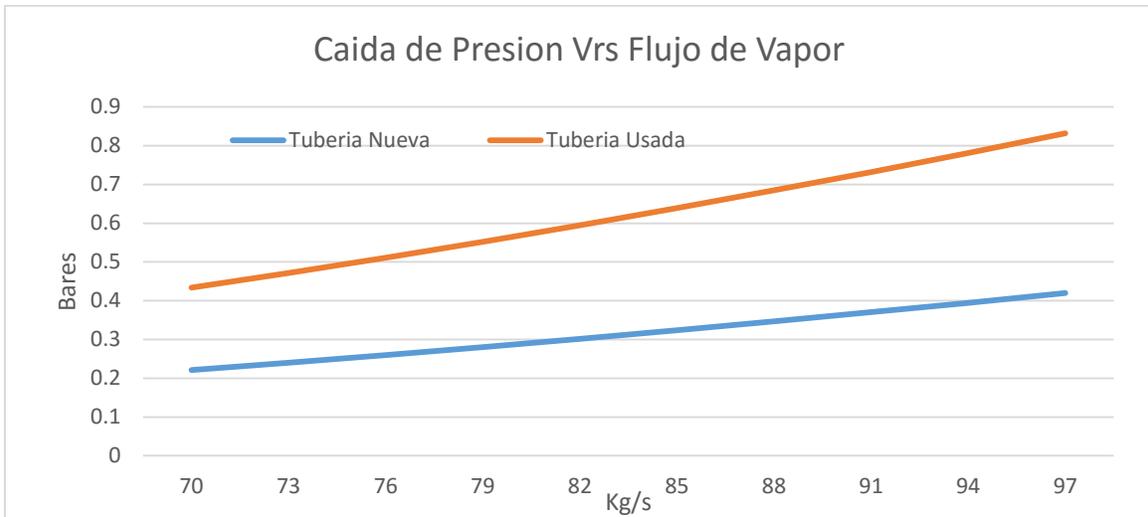


Figura 10. Caída de presión en función de flujo másico en tubería de vapor

Tabla 9. Caída de presión en función de flujo másico en tubería de líquido

Flujo másico líquido (kg/s)	Tubería nueva e = 0.05 (Barg)	Tubería Usada e = 1.5 (Barg)
325	0.9919	2.089
328	1.01	2.128
331	1.028	2.167
334	1.047	2.206
337	1.065	2.246
340	1.084	2.286
343	1.103	2.327
346	1.122	2.368
349	1.141	2.409
352	1.161	2.45

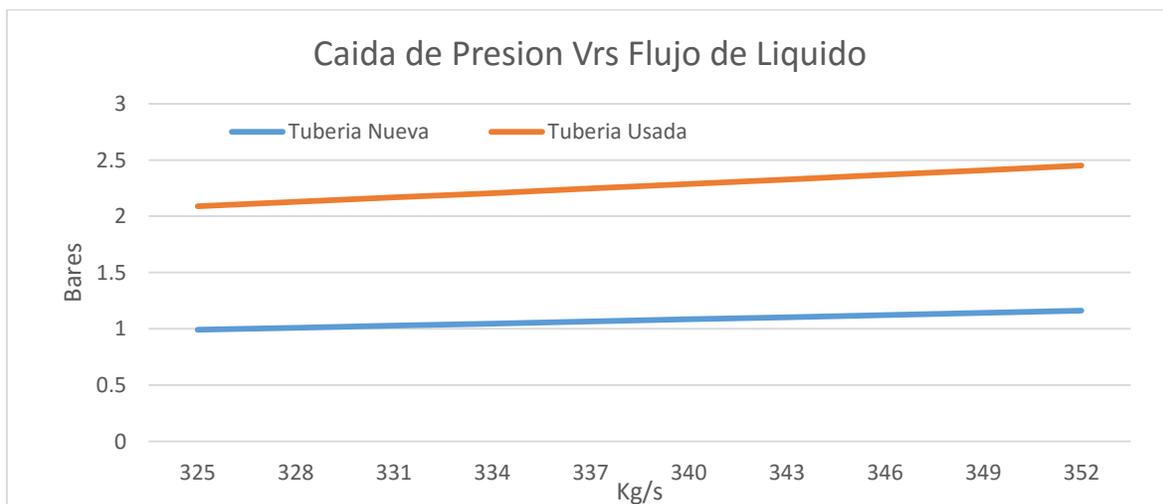


Figura 11. Caída de presión en función de flujo másico en tubería de líquido

5. Análisis de pérdidas de calor

Para evaluar la transferencia de calor desde la superficie exterior de una tubería de acarreo hacia el aire ambiental, es preciso realizar un balance de calor en la superficie exterior de éste. Se muestra un diagrama esquemático de los componentes típicos de una tubería de acarreo. Puede apreciarse que en el caso de este sistema están presentes los tres mecanismos básicos de transferencia de calor: conducción, convección, radiación.

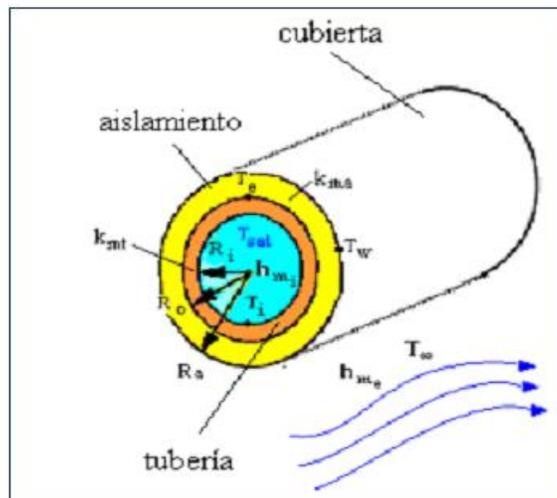


Figura 12. Esquema de Interacción Aislamiento – Tubería. Ref. Estudio de Determinación de Perdidas de Vapor del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Vol. 24, N°2, Julio-Diciembre 2011.

Se desarrolla el análisis de transferencia de calor, para el rango de diámetros de tubería recomendados en el análisis de caída de presión, delimitándolo de la siguiente manera:

- Para tubería de transporte de vapor optimizando el calor perdido en kW_{th}, el flujo másico de vapor condensado, recomendando espesor de aislante tomando como criterio no exceder 0.1 Kg/s de vapor condensado a largo de la tubería.
- Para tubería de transporte de agua optimizando el calor perdido en kW_{th}, la temperatura superficial, se tomará aproximadamente de 50°C considerando aislante y cubierta de lámina de aluminio, recomendando espesores de aislantes que cumplan dicho criterio.
- Se calcula la caída de temperatura en el aislante para determinar su resistencia térmica y establecer una comparación entre el Silicato de Calcio y Lana Mineral.

Realizando un balance de calor en la superficie exterior de la tubería de acarreo se tiene que el calor por unidad de longitud que se conduce hacia la superficie exterior, se transfiere al aire ambiental a través de los mecanismos de convección y radiación.

$$\frac{q_{cd}}{L} = \frac{q_{cv}}{L} + \frac{q_r}{L}$$

La transferencia de calor por conducción a través de la tubería y el aislante se puede evaluar aplicando el concepto de resistencia térmica equivalente. En coordenadas cilíndricas, la conducción de calor por unidad de longitud a través de la tubería de acarreo está dada por:

$$\frac{q_{cd}}{L} = \frac{T_{sat} - T_w}{\frac{\ln(\frac{D_o}{D_i})}{2\pi k_{mt}} + \frac{\ln(\frac{D_o}{D_i})}{2\pi k_{ma}}}$$

Donde la k_{mt} y k_{ma} representan conductividades del material tubería y aislamiento respectivamente.

La transferencia de calor por convección, por unidad de longitud, se evalúa aplicando la ley de enfriamiento de Newton, de acuerdo con:

$$\frac{q_{cv}}{L} = h_m \pi D_a (T_w - T_\alpha)$$

La pérdida de calor por radiación térmica desde una tubería de transporte de vapor hacia el aire del ambiente depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie exterior de la tubería. Para evaluar la transferencia de calor por radiación, se asume que la tubería es un cuerpo gris que intercambia calor con el aire ambiental que lo rodea. Por lo tanto, el calor por unidad de longitud transferido al aire se evalúa mediante la ley de Stefan-Boltzmann aplicada a un cuerpo gris:

$$\frac{q_r}{L} = \varepsilon \sigma \pi D_a (T_w^4 - T_\alpha^4)$$

Considerando el factor de vista es 1, dado que el sistema intercambia energía con el medio que lo rodea en 360 grados

Modelando el sistema en EES, expresando el circuito de resistencias detalladas a continuación y en función implícita de temperaturas del ambiente y del fluido geotérmico, se obtiene una ecuación base para evaluar las pérdidas de Transferencia de Calor.

- Resistencia de Convección en el interior de la Tubería
- Resistencia de Conducción en la Tubería de Acero al Carbono
- Resistencia de Contacto entre Tubería y Aislante (2mm de aire)
- Resistencia de Conducción en el aislante
- Resistencia de Contacto entre Tubería y Aislante (2mm de aire)
- Resistencia de Conducción en la cubierta de aluminio
- Resistencia de Radiación en el Exterior
- Resistencia de Convección en el Exterior

$$Q = \frac{T_{prominterna} - T_{ambiente}}{R_{total}} [W/L]$$

$$Q_{total} = Q * Longitud$$

5.1. Tubería de Vapor

Aislante de Lana Mineral y Silicato de Calcio con Lámina galvanizada de protección

Diámetro de 36, 40, 48 pulgadas y 85kg/s

Tabla 10. Calor perdido en función de aislante térmico y flujo de vapor condensado para tubería de 36 pulgadas de diámetro

Q perdido(Lana Mineral, kW_th)	Q perdido (Silicato de Calcio, kW_th)	Espesor de Aislante (cm)	F. Condensado Lana Mineral (kg/s)	F. Condensado Silicato de Calcio (kg/s)
423.6	388.2	1	0.2051	0.1879
270.7	271	5	0.1311	0.1312
191	200.8	10	0.09244	0.0972
150.1	161.9	15	0.07264	0.07837
125.1	137.1	20	0.06056	0.06637
108.2	119.8	25	0.05239	0.05802
96.02	107.1	30	0.04648	0.05187
86.76	97.34	35	0.042	0.04713
79.48	89.55	40	0.03848	0.04335
73.59	83.19	45	0.03563	0.04027

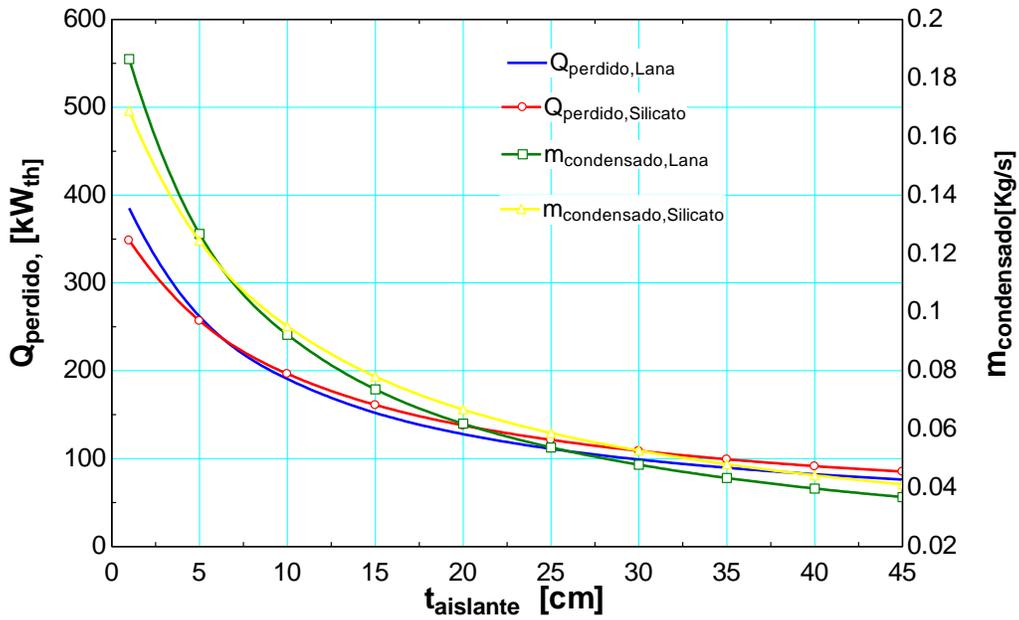


Figura 13. Calor perdido y flujo de condensado para tubería de 36 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

La grafica se aproxima en un espesor de aislante de 45 cm a una pérdida de no más de 100 kW_th y 0.04 Kg/s de vapor condensado, presentando un comportamiento totalmente asintótico en ese punto.

Tabla 11. Calor perdido en función de aislante térmico y flujo de vapor condensado para tubería de 40 pulgadas de diámetro

Q perdido(Lana Mineral, kW_th)	Q perdido (Silicato de Calcio, kW_th)	Espesor de Aislante (cm)	F. Condensado Lana Mineral (kg/s)	F. Condensado Silicato de Calcio (kg/s)
385.1	348.5	1	0.1864	0.1687
261.8	256.9	5	0.1268	0.1244
190.7	196.6	10	0.0923	0.09516
152.1	161.2	15	0.07365	0.07804
127.9	137.9	20	0.06192	0.06676
111.2	121.3	25	0.05384	0.05874
98.99	108.9	30	0.04792	0.05274
89.63	99.28	35	0.04339	0.04806
82.22	91.53	40	0.0398	0.04431
76.19	85.16	45	0.03688	0.04123

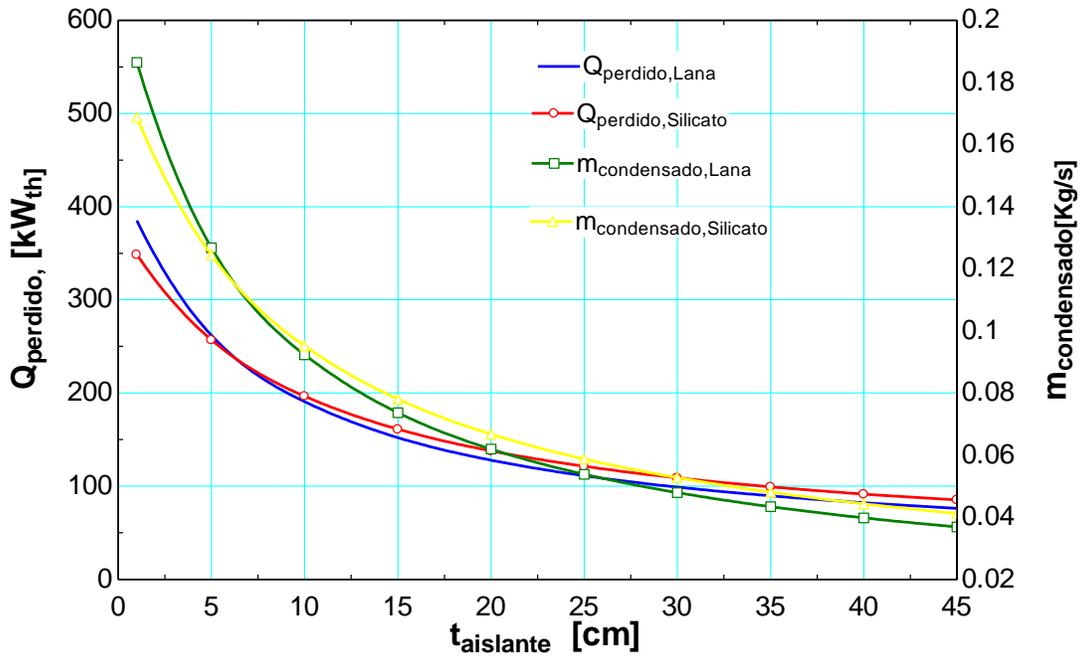


Figura 14. Calor perdido y flujo de condensado para tubería de 40 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

Tabla 12. Calor perdido en función de aislante térmico y flujo de vapor condensado para tubería de 48 pulgadas de diámetro

Q perdido(Lana Mineral, kW_th)	Q perdido (Silicato de Calcio, kW_th)	Esesor de Aislante (cm)	F. Condensado Lana Mineral (kg/s)	F. Condensado Silicato de Calcio(kg/s)
321.2	285.7	1	0.1555	0.1383
240	228	5	0.1162	0.1104
184.9	184.1	10	0.0895	0.08914
152	155.8	15	0.07357	0.07542
130.1	135.9	20	0.06296	0.06582
114.4	121.2	25	0.05538	0.0587
102.6	109.9	30	0.04967	0.0532
93.39	100.9	35	0.04521	0.04882
85.99	93.46	40	0.04163	0.04525
79.91	87.3	45	0.03868	0.04226

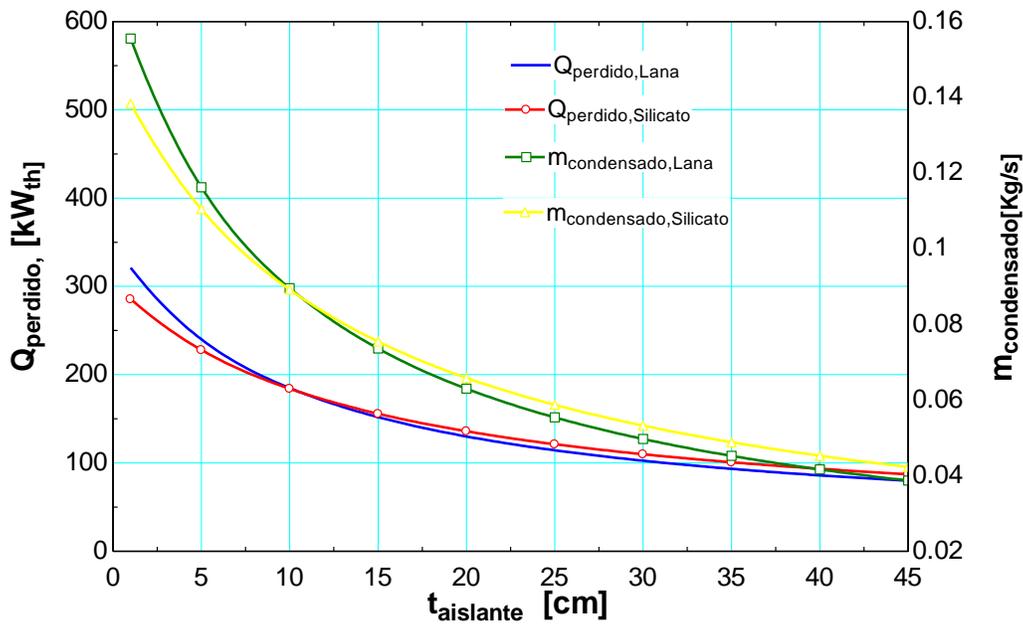


Figura 15. Calor perdido y flujo de condensado para tubería de 48 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

La grafica se acerca a un espesor de aislante de 35 cm a una pérdida de no más de 100 kW_th y 0.04 Kg/s de vapor condensado, presentando un comportamiento totalmente asintótico en ese punto.

5.2. Tubería de Transporte de Líquido

Aislante de Lana Mineral y Silicato de Calcio con Lámina galvanizada de protección
Diámetro de 16, 20, 24 pulgadas y 340kg/s

Tabla 13. Calor perdido en función de aislante térmico y caída de temperatura en tubería de 16 pulgadas de diámetro

Caída de Temperatura en Aislante(Silicato de Calcio, °C)	Caída de Temperatura en Aislante (Lana Mineral, °C)	Espesor de Aislante (cm)	Q perdido (Lana Mineral, kW_th)	Q perdido (Silicato de Calcio, kW_th)	T. Superficial Silicato de Calcio (°C)	T. Superficial Lana Mineral (°C)
92.22	94.78	1	807	858.3	54.14	52.7
110.7	113.6	5	357	406.4	43.92	42.23
116.2	118.8	10	223.7	259.8	40.94	39.42
118.1	120.6	15	169.2	198	39.92	38.48
118.2	121.3	20	139.2	163.5	39.53	38.11
118.9	121.6	25	120.1	141.3	39.4	37.99
119.3	121.7	30	106.7	125.8	39.42	37.99
119.3	121.6	35	96.86	114.2	39.52	38.07
119.1	121.5	40	89.2	105.2	39.66	38.19
118.9	121.3	45	83.06	97.97	39.84	38.34

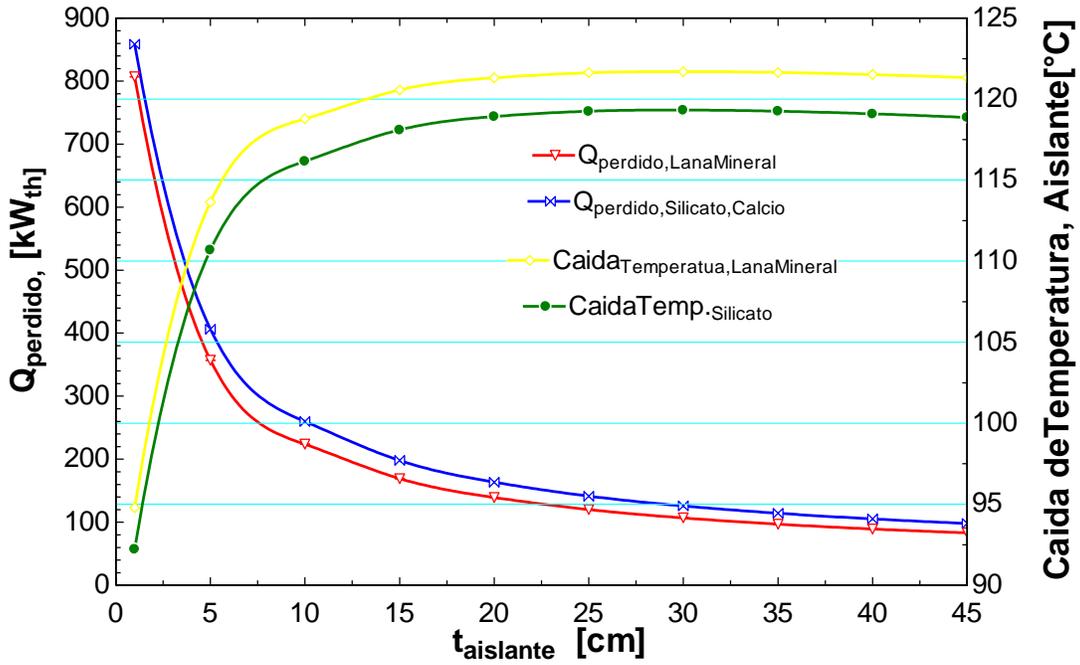


Figura 16. Calor perdido y caída de temperatura en aislante, para tubería de 16 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

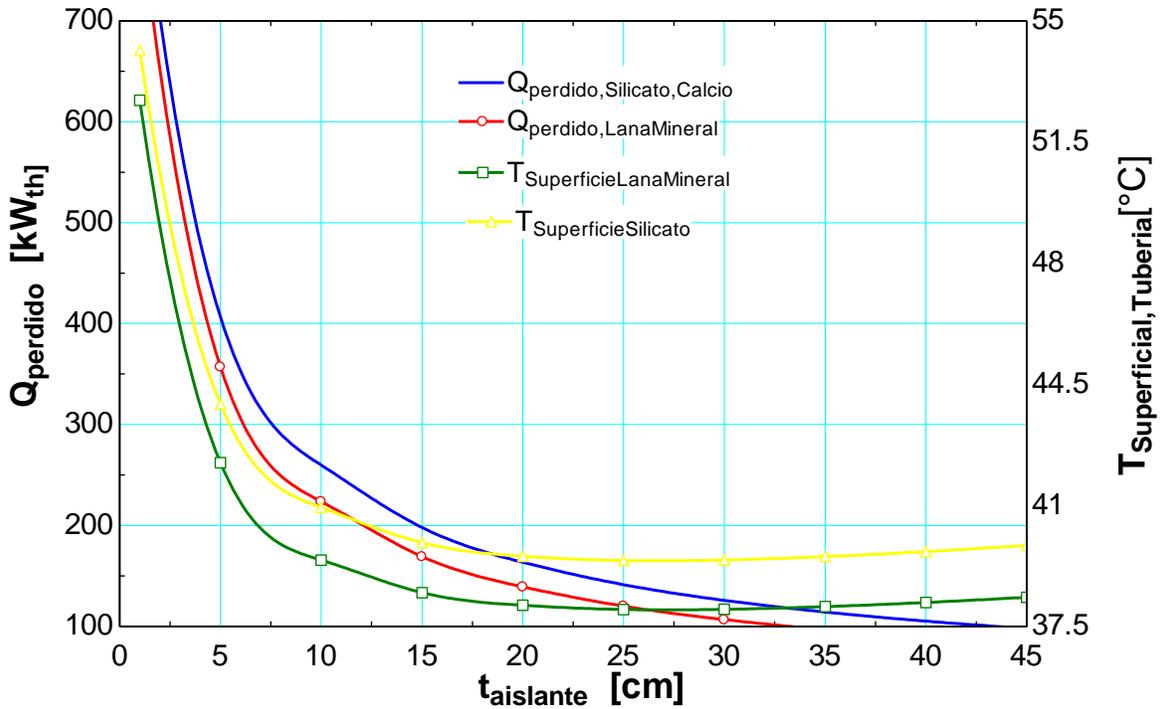


Figura 17. Calor perdido y temperatura superficial para tubería de 16 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

Tabla 14. Calor perdido en función de aislante térmico y caída de temperatura para tubería de 20 pulgadas de diámetro

Caída de Temperatura en Aislante (Silicato de Calcio, °C)	Caída de Temperatura en Aislante (Lana Mineral, °C)	Espesor de Aislante (cm)	Q perdido (Lana Mineral, kW_th)	Q perdido (Silicato de Calcio, kW_th)	T. Superficial Silicato de Calcio (°C)	T. Superficial Lana Mineral (°C)
87.05	89.15	1	731.9	765.5	57.51	56.3
104.6	107.8	5	373.7	417.4	47.78	45.78
111.2	114.2	10	243	278.4	43.97	42.21
113.8	116.7	15	185.7	214.7	42.53	40.84
115.1	117.9	20	153.2	178.1	41.87	40.21
115.7	118.5	25	132.2	154.1	41.56	39.92
116.1	118.8	30	117.4	137.1	41.44	39.8
116.2	118.9	35	106.3	124.3	41.43	39.78
116.1	118.9	40	97.72	114.4	41.5	39.83
116	118.8	45	90.82	106.3	41.61	39.92

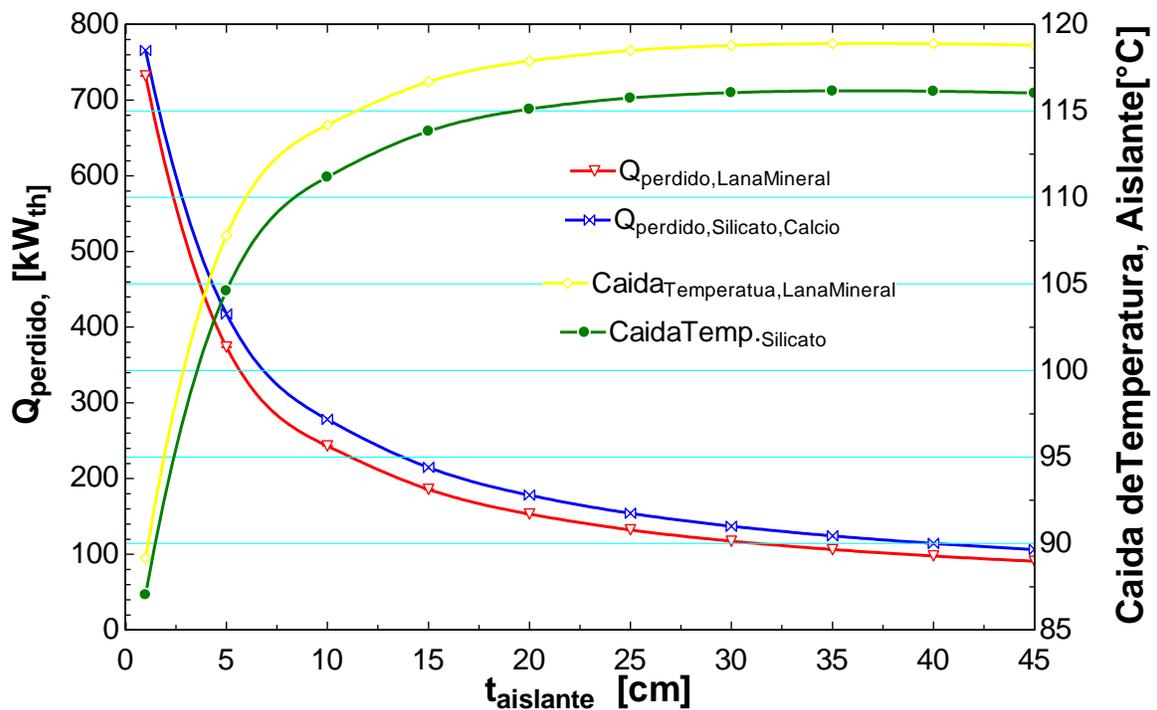


Figura 18. Calor perdido y caída de temperatura en aislante para tubería de 20 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

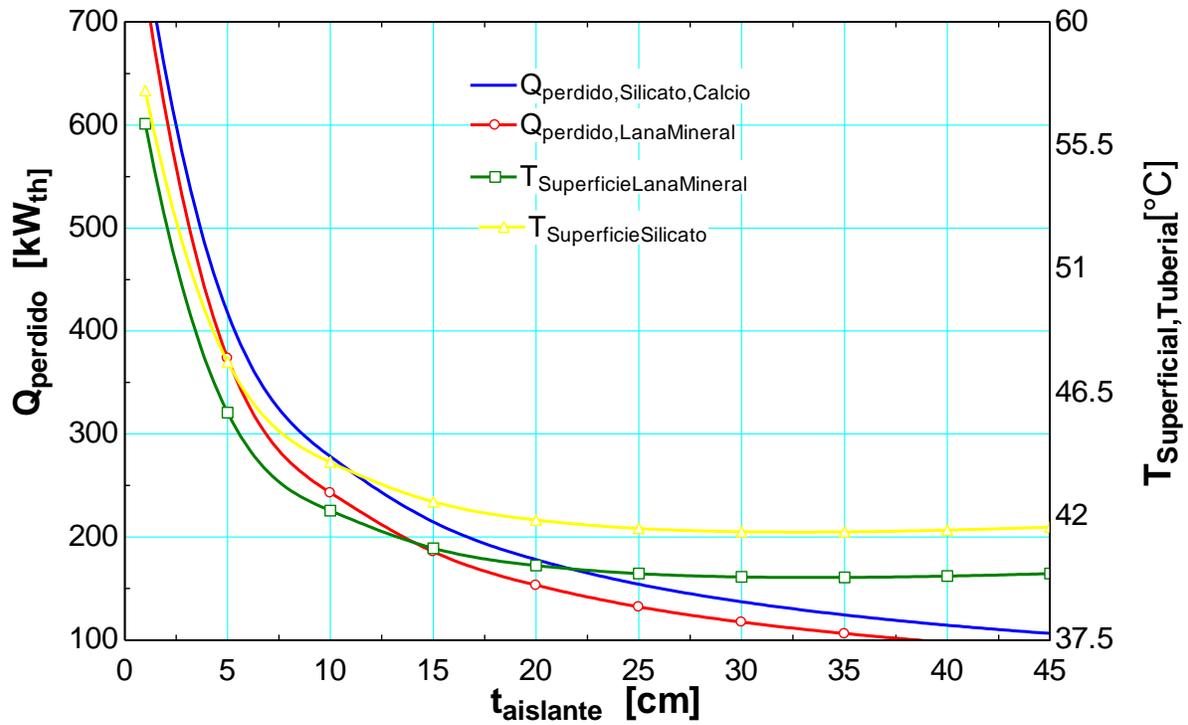


Figura 19. Calor perdido y temperatura superficial para tubería de 20 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

Tabla 15. Calor perdido en función de aislante térmico y caída de temperatura para tubería de 24 pulgadas de diámetro

Caída de Temperatura en Aislante (Silicato de Calcio, °C)	Caída de Temperatura en Aislante (Lana Mineral, °C)	Espesor de Aislante (cm)	Q perdido (Lana Mineral, kW_th)	Q perdido (Silicato de Calcio, kW_th)	T. Superficial Silicato de Calcio (°C)	T. Superficial Lana Mineral (°C)
83.48	85.19	1	658	680.6	59.91	58.91
99.38	102.6	5	377	414.2	50.86	50.86
106.5	109.8	10	255.1	287.8	46.84	46.84
109.7	112.9	15	197.6	225.7	45.07	45.07
111.4	114.5	20	164	188.6	44.17	44.17
112.3	115.4	25	141.8	163.7	43.69	43.69
112.8	115.9	30	126	145.9	43.44	43.44
113.1	116.1	35	114.1	132.3	43.33	43.33
113.2	116.3	40	104.8	121.7	43.31	43.31
113.2	116.3	45	97.34	113.1	43.35	43.35

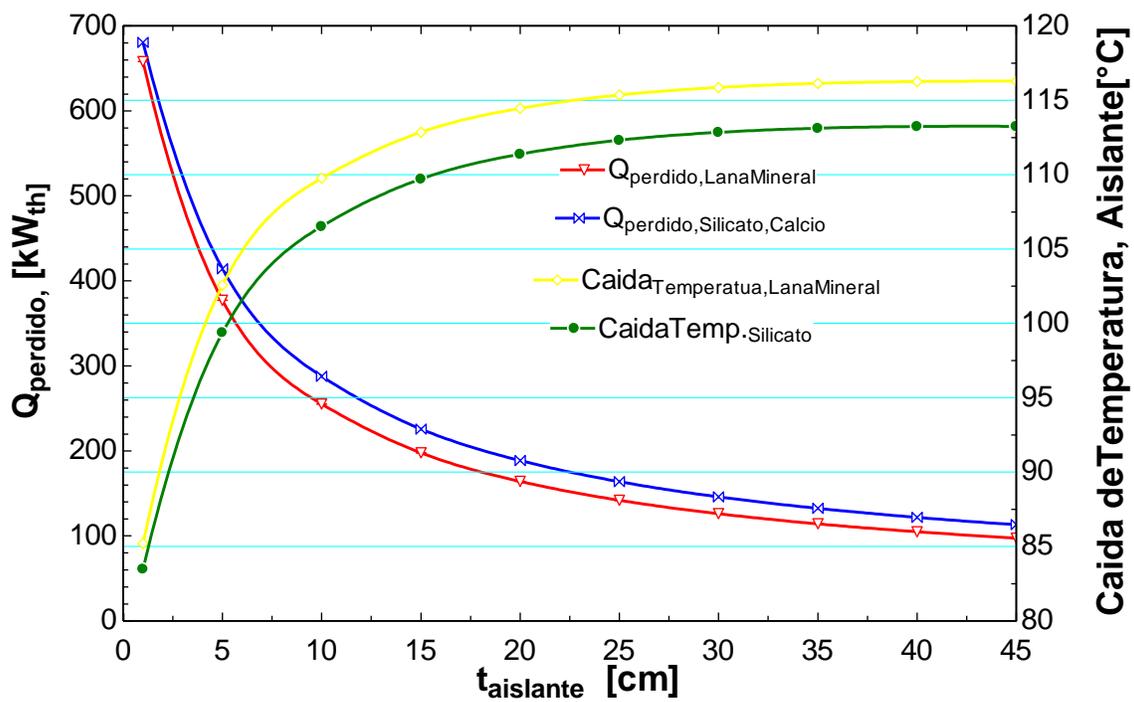


Figura 20. Calor perdido y caída de temperatura en aislante para tubería de 24 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

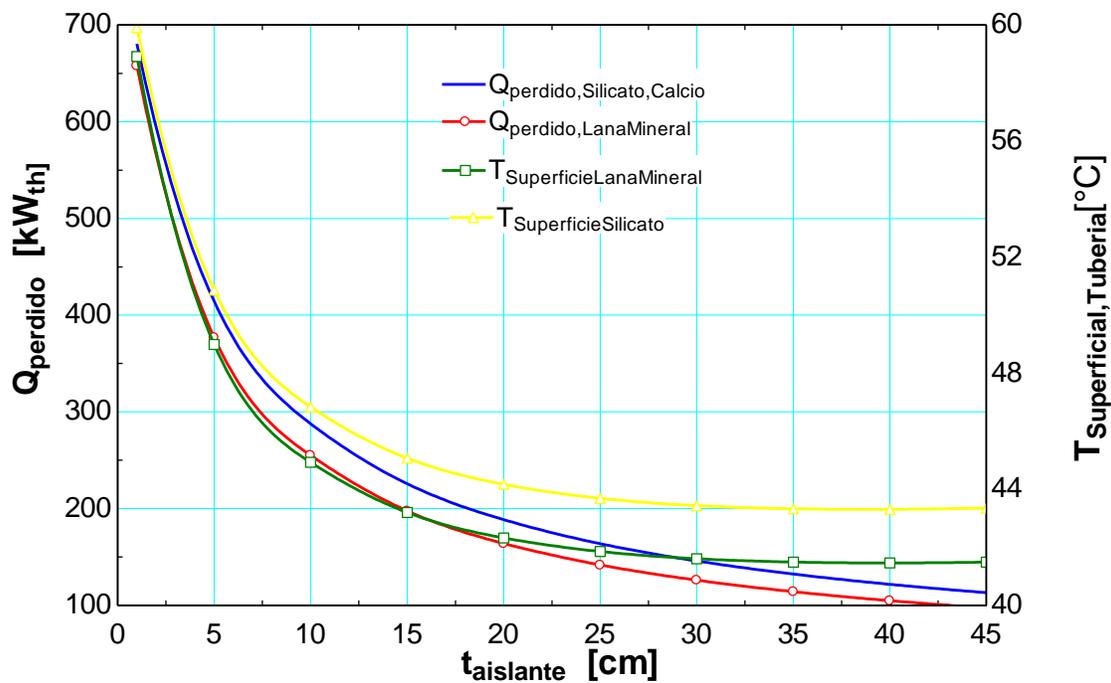


Figura 21. Calor perdido y temperatura superficial para tubería de 24 pulgadas utilizando lana mineral y silicato de calcio

5.3. Resumen de análisis para tubería de vapor

- **Tubería de 36 pulg.**

Material Aislante	Espesor Recomendado	Flujo de Vapor Condensado	Calor Perdido
Silicato de Calcio	7 cm (4pulg.)	0.1175 Kg/s	242.92 kW_th
Lana Mineral	7 cm(4 pulg.)	0.1156 Kg/s	239 kW_th

- **Tubería de 40 pulg.**

Material Aislante	Espesor Recomendado	Flujo de Vapor Condensado	Calor Perdido
Silicato de Calcio	7 cm (4 pulg)	0.1127 Kg/s	232.78 kW_th
Lana Mineral	7 cm (4pulg.)	0.113 Kg/s	233.36 kW_th

- **Tubería de 48 pulg.**

Material Aislante	Espesor Recomendado	Flujo de Vapor Condensado	Calor Perdido
Silicato de Calcio	7 cm (4 pulg.)	0.1018 Kg/s	210.44 kW_th
Lana Mineral	7 cm(4 pulg.)	0.1055 Kg/s	217.96 kW_th

5.4. Resumen de análisis para tubería de líquido

- **Tubería de 16 pulg.**

Material Aislante	Espesor Recomendado	Temperatura Superficial	Calor Perdido	Caída de Temperatura en Aislante
Silicato de Calcio	2.5 cm (1 pulg.)	50.30 °C	688.87 kW_th	99.15. °C
Lana Mineral	2.5 cm(1 pulg.)	48.77 °C	638.25 kW_th	101.84 °C

- **Tubería de 20 pulg.**

Material Aislante	Espesor Recomendado	Temperatura Superficial	Calor Perdido	Caída de Temperatura en Aislante
Silicato de Calcio	4 cm (2 pulg.)	50.21 °C	463.25 kW_th	100.21°C
Lana Mineral	4 cm(2 pulg.)	48.41. °C	504.425 kW_th	103.14°C

- **Tubería de 24 pulg.**

Material Aislante	Espesor Recomendado	Temperatura Superficial	Calor Perdido	Caída de Temperatura en Aislante
Silicato de Calcio	5 cm (2 pulg.)	50.86°C	377 kW_th	99.38°C
Lana Mineral	5 cm(2 pug.)	48.99 °C	414.2 kW_th	102.6°C

Conclusiones

- Para espesores óptimos de aislamiento recomendados según el proceso de optimización realizado el flujo de condensado permitido en la tubería es de 0.1 kg/sy la pérdida de Calor en el rango de 200 kW_{th}.
- Los resultados muestran que para tubería de transporte de vapor de 36, 40 y 48 pulg. es recomendable en ambos materiales (silicato de calcio y Lana Mineral) un espesor de 7cm (3 pulg) para cumplir con los criterios definidos.
- Para el rango de espesores óptimos de tuberías para el transporte de líquido, la disminución en la temperatura hasta la superficie debe de ser aproximadamente de 110°C, para obtener un promedio de temperatura en superficie de 50°C.
- Para tubería de 16 pulg. en ambos materiales (silicato de calcio y Lana Mineral) un espesor de 2.5 cm (1 pulg.)
- Para tubería de 20 pulg. en ambos materiales (silicato de calcio y Lana Mineral) un espesor de 4cm.
- Para tubería de 24 pulg. en ambos materiales (silicato de calcio y Lana Mineral) un espesor de 5cm (2 pulg.)
- La caída de temperatura a través de los materiales aislantes de las tuberías utilizados es en promedio de 105°C al variar variando los espesores.
- Ambos aislamientos utilizados presentan características de aislamiento muy similares, presentando una resistencia de 2% más al flujo de calor el aislamiento de Lana Mineral.

Recomendaciones

- Para futuros proyectos, además de este análisis con criterios técnicos elaborar un análisis económico para complementar el análisis y tomar decisiones.
- Disminuir lo más que se pueda los accesorios de conexión en tuberías para evitar caídas de presión considerables.
- Hacer limpieza periódica al sistema de acarreo ayudara a minimizar las caídas de presión y minimizar los errores con los cálculos de fricción.
- La toma precisa los datos de temperatura y presión ayudaran a tener cálculos aceptables de análisis y resultados satisfactorios.
- En caso que se quiera seguir esta metodología de análisis para optimización energética, los programas en EES son flexibles para varias los criterios de diseño y variables de entrada.
- Este proyecto tiene un enfoque metodológico típico de un sistema geotérmico, que se puede tomar como base para recomendar ciertos parámetros para futuros proyectos en estado estable de operación.

Bibliografía

- [1] Y.Cengel, *Fundamentos y Aplicaciones de Transferencia de Calor*, 4a Ed, McGraw Hill
- [2] A. Harvey, A. Brown, P. Hettiarachi y A. Inversin, *Micro-hydro Design Manual, A guide to Small-Scale water Power Schemes*. UK, ITDG Publishing, 1993, ISBN 1 85339 103 4
- [3] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos*, 6a Ed, Pearson Prentice Hall
- [4] J. Manville Industrial Insulation Group, *Carta Técnica de Lana Mineral y Silicato de Calcio*

Anexos

Anexo 1 – Programa EES para análisis de caída de presión

"Función para la caída de Presión"

{Ecuación de Colebrook}

Function DP (L,D,M,T,Dens,e,Visc)

IF (M>0.0) THEN

x1=0

g= 9.81

Dens := density(steam,x=x1,T=T)

V := M/(Dens*3.141516*(D)^2/4)

Re:= Dens*V*D/Visc

f := 1.325/(ln((e/1000)/(3.7*D)+5.74/Re^0.9))^2

Hf := f*(L/D)*(V^2)/(2*g)

DP := Hf*9.81*Dens/1e5

ELSE

DP :=0.0

ENDIF

End

"Factor de fricción de Darcy"

"Perdidas Primarias"

{Output DP en Bares}

Function V (D,M,Dens)

IF (M>0.0) THEN

V := M/(Dens*3.141516*(D)^2/4)

ELSE

V:= 0.0

ENDIF

End

{Parametros generales de tuberia}

Dpulg=20

D=Dpulg*25.4/1000

Fittings = 0.15

e = 0.05

L=L1+L2+L3

L1= 1500

L2=500

L3=500

"Diametro de tuberia"

"Rugosidad"

{Propiedades del fluido}

P1=6

x1=0 "x=0 para tuberías de agua y x=1 para tuberías de vapor"

T=T_sat(Water,P=P1)

Dens = density(steam,x=x1,T=T)

Visc = viscosity(steam,x=x1,T=T)

{M=340}

{Calculos de caída de presión}

{Linea de Vapor}

M1=M

Lt=L*(1+Fittings)

D1= D

DP1=DP (Lt,D1,M1,T,Dens,e,Visc)

V1 = V (D1,M1,Dens)

Anexo 2 – Programa EES para análisis de Transferencia de Calor

"TUBERIA DE VAPOR"
"DATOS DE ENTRADA"

D_interno=101.6 { [cm]}
m=85 {[Kg/s]} " FLUJO MASICO DE VAPOR"
Longitud=1500 {m}
T_superficie= 50{ [°C]}
T_ambiente=32 {[°C]}
T_prominterna=165 {[°C]}
"t_aislante=5"{cm}
t_tuberia=0.9525 {[cm]}"(3/8in)"
t_lamina=0.3 {[cm]}
v_aire=1 {[m/s]}
v_diseño=30 {[m/s]}

"PROCESAMIENTO"

D_externo=(D_interno+2*t_aislante+2*t_tuberia+2*t_lamina)/100 {[m]}
T_prom=(T_superficie+T_ambiente)/2 {[°C]}

r1=(D_interno/2)/100 {[m]}
r2=r1+t_tuberia/100 {[m]}
r3=r2+t_aislante/100 {[m]}
r4=r3+t_lamina/100 {[m]}

A=(pi*D_interno^2/4)/100^2 {[m2]}
Pr[1]=Prandtl(Air,T=T_prom)
k[1]=Conductivity(Air,T=T_prom) {[W/m°C]}
mu[1]=Viscosity(Air,T=T_prom)

P[1]=1 {[bar]}
rho[1]=Density(Air,T=T_prom,P=P[1])
vis[1]=mu[1]/rho[1] { [m2/s]}
{calculo de conductividad}
{CALCULO DE K_acero}{[W/m.°K]}
"Para 20 °C - T < 800 °C "
k_acero=54 - 0.0333*(T_prominterna) {[W/m.°C]}
{CALCULO DE K_lamina}{[W/m.°K]}
k_lamina= -0.138*(T_superficie)+273.5
{ CALCULO DEL k_aislamiento}{[W/m.°K]}
"k_aislamiento=0.000178*(T_prominterna)+0.024"" (LANA MINERAL)"
k_aislamiento=0.000129*(T_prominterna)+0.044 "(SILICATO DE CALCIO)"
l=1 {[m]}
Pr[2]=Prandtl(Steam_IAPWS,T=T_prominterna,x=1)
k[2]=Conductivity(Steam_IAPWS,T=T_prominterna,x=1) { [W/m.°C]}
mu[2]=Viscosity(Steam_IAPWS,T=T_prominterna,x=1)
rho[2]=Density(Steam_IAPWS,T=T_prominterna,x=1){ [kg/m3]}
cp[2]=Cp(Steam_IAPWS,T=T_prominterna,x=1) {[J/Kg°C]}
vis[2]=mu[2]/rho[2] {[m2/s]}
h_g=Enthalpy(Steam_IAPWS,T=T_prominterna,x=1)
h_l=Enthalpy(Steam_IAPWS,T=T_prominterna,x=0)

"Entalpia de vaporizacion"
h_fg=h_g-h_l

$m = \rho [2] \cdot A \cdot v_{prom}$
 $Re_{convext} = v_{aire} \cdot D_{externo} / \nu [1]$
 {"Se considera la ecuacion de numero de Nusselt promedio en lo relativo a flujo cruzado sobre un cilindro propuesta por Churlill y Bernstein"}
 $Nu_{convext} = 0.3 + (0.62 \cdot Re_{convext}^{1/2} \cdot Pr[1]^{1/3}) / (1 + (0.4 / Pr[1])^{1/4})^{1/4} \cdot (1 + (Re_{convext} / 28000)^{5/8})^{4/5}$
 $h_{convext} = k[1] / D_{externo} \cdot Nu_{convext}$ { [W/m²C] }
 {"Considerando un Flujo Turbulento completamente desarrollado en todo el tubo y se determina con la siguiente expresion"}
 $Re_{convinter} = v_{prom} \cdot D_{interno} / \nu [2]$
 $Nu_{convinter} = 0.023 \cdot Re_{convinter}^{0.8} \cdot Pr[2]^{0.4}$
 $h_{convinter} = k[2] / D_{interno} \cdot Nu_{convinter}$ { [W/m²C] }
 $A1 = 2 \cdot \pi \cdot r1 \cdot l$

$h_{rad} = (1) \cdot \sigma \cdot ((T_{superficie} + 273)^2 + (T_{ambiente} + 273)^2) \cdot ((T_{superficie} + 273) + (T_{ambiente} + 273))$
 $R1_{conv} = 1 / h_{convinter} \cdot A1$ { [°C/W] }
 $R2_{conduc} = \ln(r2/r1) / (2 \cdot \pi \cdot k_{acero} \cdot l)$ { [°C/W] }
 $R3_{conduc} = \ln(r3/r2) / (2 \cdot \pi \cdot k_{aislamiento} \cdot l)$ { [°C/W] }

$R4_{conduc} = \ln(r4/r3) / (2 \cdot \pi \cdot k_{lamina} \cdot l)$ { [°C/W] }
 $A2 = 2 \cdot \pi \cdot r4 \cdot l$ { [m²] }
 $R5_{rad} = 1 / h_{rad} \cdot A2$
 $R6_{conv} = 1 / h_{convext} \cdot A2$ { [°C/W] }
 "Resistencia de conveccion exterior y radiacion en paralelo"
 $1/R_{eq} = 1/R5_{rad} + 1/R6_{conv}$
 $R_{total} = R1_{conv} + R2_{conduc} + R3_{conduc} + R4_{conduc} + R_{eq}$ { [°C/W] }
 $Q = (T_{prominterna} - T_{ambiente}) / R_{total}$ { [W/L] } "PERDIDAS DE CALOR"
 $Q_{total} = Q \cdot Longitud$
 $r_{critico} = k_{aislamiento} / h_{convext}$ "RADIO CRITICO"
 $Q_{total} = m_{condensado} \cdot (h_{fg} \cdot 1000)$ "FLUJO MASICO DE CONDENSADO"
 $Q_{perdido} = Q_{total} / 1000$

"TUBERIA DE AGUA"
 "DATOS DE ENTRADA"

$D_{interno} = 50.8$ { [cm] }
 $m = 340$ { [Kg/s] } " FLUJO MASICO DE VAPOR "
 $Longitud = 2500$ { [m] }
 $T_{superficie} = 50$ { [°C] }
 $T_{ambiente} = 32$ { [°C] }
 $T_{prominterna} = 165$ { [°C] }
 $t_{aislante} = 5$ { [cm] }
 $t_{tuberia} = 0.9525$ { [cm] } " (3/8in) "
 $t_{lamina} = 0.3$ { [cm] }
 $v_{aire} = 1$ { [m/s] }
 $v_{diseño} = 2$ { [m/s] }

"PROCESAMIENTO"

$D_{externo} = (D_{interno} + 2 \cdot t_{aislante} + 2 \cdot t_{tuberia} + 2 \cdot t_{lamina}) / 100$ { [m] }
 $T_{prom} = (T_{superficie} + T_{ambiente}) / 2$ { [°C] }
 $r1 = (D_{interno} / 2) / 100$ { [m] }
 $r2 = r1 + t_{tuberia} / 100$ { [m] }
 $r3 = r2 + t_{aislante} / 100$ { [m] }
 $r4 = r3 + t_{lamina} / 100$ { [m] }

$A = (\pi \cdot D_{\text{interno}}^2 / 4) / 100^2$ $\{[m^2]\}$
 $Pr[1] = \text{Prandtl}(\text{Air}, T = T_{\text{prom}})$
 $k[1] = \text{Conductivity}(\text{Air}, T = T_{\text{prom}})$ $\{[W/m^{\circ}C]\}$
 $\mu[1] = \text{Viscosity}(\text{Air}, T = T_{\text{prom}})$
 $P[1] = 1$ $\{[bar]\}$
 $\rho[1] = \text{Density}(\text{Air}, T = T_{\text{prom}}, P = P[1])$
 $\text{vis}[1] = \mu[1] / \rho[1]$ $\{[m^2/s]\}$

{calculo de conductividad}

{CALCULO DE K_acero}{[W/m.°K]}
 "Para 20 °C - T < 800 °C "
 $k_{\text{acero}} = 54 - 0.0333 \cdot (T_{\text{prominterna}})$ $\{[W/m.°C]\}$
 {CALCULO DE K_lamina}{[W/m.°K]}
 $k_{\text{lamina}} = -0.138 \cdot (T_{\text{superficie}}) + 273.5$

{ CALCULO DEL k_aislamiento}{[W/m.°K]}
 "k_aislamiento=0.000178*(T_prominterna)+0.024" (LANA MINERAL)"
 $k_{\text{aislamiento}} = 0.000129 \cdot (T_{\text{prominterna}}) + 0.044$ "(SILICATO DE CALCIO)"
 $l = 1$ $\{[m]\}$
 $Pr[2] = \text{Prandtl}(\text{Steam_IAPWS}, T = T_{\text{prominterna}}, x = 0)$
 $k[2] = \text{Conductivity}(\text{Steam_IAPWS}, T = T_{\text{prominterna}}, x = 0)$ $\{[W/m.°C]\}$
 $\mu[2] = \text{Viscosity}(\text{Steam_IAPWS}, T = T_{\text{prominterna}}, x = 0)$
 $\rho[2] = \text{Density}(\text{Steam_IAPWS}, T = T_{\text{prominterna}}, x = 0)$ $\{[kg/m^3]\}$
 $cp[2] = \text{Cp}(\text{Steam_IAPWS}, T = T_{\text{prominterna}}, x = 0)$ $\{[J/Kg^{\circ}C]\}$
 $\text{vis}[2] = \mu[2] / \rho[2]$ $\{[m^2/s]\}$
 $m = \rho[2] \cdot A \cdot v_{\text{prom}}$
 $Re_{\text{convext}} = v_{\text{aire}} \cdot D_{\text{externo}} / \text{vis}[1]$

{"Se considera la ecuacion de numero de Nusselt promedio en lo relativo a flujo cruzado sobre un cilindro propuesta por Churlill y Bernstein"}

$Nu_{\text{convext}} = 0.3 + (0.62 \cdot Re_{\text{convext}}^{1/2} \cdot Pr[1]^{1/3}) / (1 + (0.4 / Pr[1])^{2/3})^{1/4} \cdot (1 + (Re_{\text{convext}} / 28000)^{5/8})^{4/5}$
 $h_{\text{convext}} = k[1] / D_{\text{externo}} \cdot Nu_{\text{convext}}$ $\{[W/m^2^{\circ}C]\}$

{"Considerando un Flujo Turbulento completamente desarrollado en todo el tubo y se determina con la siguiente expresion"}

$Re_{\text{convinter}} = v_{\text{prom}} \cdot D_{\text{interno}} / \text{vis}[2]$
 $Nu_{\text{convinter}} = 0.023 \cdot Re_{\text{convinter}}^{0.8} \cdot Pr[2]^{0.4}$
 $h_{\text{convinter}} = k[2] / D_{\text{interno}} \cdot Nu_{\text{convinter}}$ $\{[W/m^2^{\circ}C]\}$
 $A1 = 2 \cdot \pi \cdot r1 \cdot l$
 $h_{\text{rad}} = (1) \cdot \sigma \cdot ((T_{\text{superficie}} + 273)^2 + (T_{\text{ambiente}} + 273)^2) \cdot ((T_{\text{superficie}} + 273) + (T_{\text{ambiente}} + 273))$
 $R1_{\text{conv}} = 1 / h_{\text{convinter}} \cdot A1$ $\{[^{\circ}C/W]\}$
 $R2_{\text{conduc}} = \ln(r2 / r1) / (2 \cdot \pi \cdot k_{\text{acero}} \cdot l)$ $\{[^{\circ}C/W]\}$
 $R3_{\text{conduc}} = \ln(r3 / r2) / (2 \cdot \pi \cdot k_{\text{aislamiento}} \cdot l)$ $\{[^{\circ}C/W]\}$
 $R4_{\text{conduc}} = \ln(r4 / r3) / (2 \cdot \pi \cdot k_{\text{lamina}} \cdot l)$ $\{[^{\circ}C/W]\}$
 $A2 = 2 \cdot \pi \cdot r4 \cdot l$ $\{[m^2]\}$
 $R5_{\text{rad}} = 1 / h_{\text{rad}} \cdot A2$

$R6_{\text{conv}} = 1 / h_{\text{convext}} \cdot A2$ $\{[^{\circ}C/W]\}$
 "Resistencia de conveccion exterior y radiacion en paralelo"

$1/R_{eq}=1/R5_{rad}+1/R6_{conv}$
 $R_{total}=R1_{conv}+R2_{conduc}+R3_{conduc}+R4_{conduc}+R_{eq} \{ [^{\circ}C/W] \}$
 $Q=(T_{prominterna}-T_{ambiente})/R_{total} [W/L]$ "PERDIDAS DE CALOR"
 $Q_{total}=Q \cdot Longitud$
 $r_{critico}=k_{aislamiento}/h_{convext}$ "RADIO CRITICO"
 $Q_{perdido}=Q_{total}/1000$
 $Caida_Temperatura_Tuberia=Q \cdot (R2_{conduc})$
 $Caida_Temperatura_Aislamiento=Q \cdot (R3_{conduc})$

Anexo 3 – Diagrama de Moody

