

ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES SOBRE LAS PÉRDIDAS DE CALOR QUE SE PUEDEN PRESENTAR EN LA OPERACIÓN CONVENCIONAL DE UN GASODUCTO

Carlos Andres Bolaños Gutierrez ¹, Oscar Mauricio Paez Camacho², César Augusto Pineda Gómez³

RESUMEN

El estudio de la transferencia de calor es de particular interés en el transporte de gas natural para predecir el perfil de temperatura a lo largo del gasoducto, y así conocer los puntos críticos del sistema donde se pueden presentar diversos problemas operacionales ocasionados por esta transferencia, tales como la condensación de líquidos hidrocarburos y la formación de hidratos de gas, los cuales obstaculizan el paso efectivo del gas, afectan su calidad y promueven daños a la infraestructura.

En este estudio se evalúa el impacto de diversos parámetros relacionados con la tubería y el medio circundante, sobre la transferencia de calor, específicamente sobre el perfil de temperatura del gas, el calor transferido y el coeficiente global de transferencia de calor en un gasoducto. Se evalúan dos tipos de ambientes: gasoducto enterrado y gasoducto al aire libre.

Palabras claves: Transferencia de Calor, Modelo Térmico, Estado Estable, Estado Transiente, Sensibilidades, Simulación.

ABSTRACT

The study of the heat transfer is particularly interesting in the natural gas transport to predict temperature profile throughout gas pipeline, and know the critical points of the system where diverse operational problems can be presented, like condensation of hydrocarbon liquid and gas hydrate formation, which prevent the effective step of the gas, affect its quality and promote damages to infrastructure.

In this project it is evaluated the impact of diverse parameters related at the pipe and the environment in a gas pipeline, over the heat transference, specifically over gas temperature profile, the transferred heat and the global coefficient of heat transfer. Two types of environment: buried and above ground gas pipeline were evaluated.

Keywords: Heat transfer, thermal model, steady state, transient state, sensibilities, simulation.

¹Ingeniero de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

²Ingeniero de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

³Profesor, Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el aumento progresivo de la demanda del gas natural para cubrir las necesidades de la actividad industrial, residencial, de servicios y de transporte, así como para la generación e impulso del desarrollo económico, y de la infraestructura energética en general, representa una de las prioridades económicas y sociales de un país como Colombia.

El gas natural producido es transportado a los centros de consumo a través de una compleja red de gasoductos bajo diversas topografías y condiciones climatológicas. Para que este sistema funcione correctamente, es necesario evaluar periódicamente escenarios operacionales que puedan afectar la eficiencia de este transporte.

El objetivo de este estudio es identificar el impacto que tienen diversos parámetros presentes en el trazado de un gasoducto sobre la transferencia de calor hacia sus alrededores. Los parámetros evaluados son el tipo de suelo, profundidad de enterramiento y el diámetro de la tubería para gasoductos enterrados y la velocidad del aire para gasoductos que se encuentren al aire libre. Adicionalmente se analiza el efecto del tipo y espesor de aislantes para gasoductos con revestimiento térmico.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. Siempre que exista una diferencia de temperatura, la transferencia de calor se da desde el cuerpo que está a mayor temperatura (fuente), hacia el que se encuentra a menor temperatura (receptor). Si las diferencias de temperatura en los cuerpos no se mantienen por la adición o remoción de calor, la tendencia

es hacia un equilibrio de temperatura. Cuando se logra el equilibrio, la transferencia de calor se hace nula.

La transferencia de calor puede darse por tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Todos los procesos de transferencia de calor involucran una o más de estas formas.

La conducción se da cuando se presenta un gradiente de temperatura en un sólido, líquido o gas. Las moléculas en el área caliente incrementan la fuerza de sus vibraciones a medida que se calientan, chocando así con las moléculas vecinas que tienen una velocidad menor, transmitiendo parte de su energía. Este proceso continúa hasta que se alcanza el equilibrio térmico entre las dos moléculas. Las pérdidas de calor y de temperatura de flujo por efecto del mecanismo de conducción en un gasoducto, se presentan principalmente cuando éste se encuentra enterrado.

La transferencia de calor por convección se da cuando el calor se transfiere de una parte del fluido a la otra debido al movimiento de éste, ya sea por procesos de convección natural o de convección forzada. La transferencia por convección libre o natural se da cuando existe una diferencia de temperatura en el interior de un fluido produciendo un movimiento del mismo por la diferencia de densidades que resultan del gradiente de temperaturas. Este movimiento es el que transporta el calor de la fuente al cuerpo receptor. Cuando existe una fuerza motriz exterior, como el viento, y se mueva sobre una superficie a diferente temperatura, se producirá una transferencia de calor por convección forzada, aumentando ésta con el incremento de la velocidad del fluido. El análisis de las pérdidas de calor por convección forzada tiene mayor importancia que el análisis por convección natural debido a que su magnitud es mucho mayor. Las pérdidas de calor y de temperatura de flujo por acción del mecanismo de convección

en un gasoducto, se presentan principalmente cuando éste se encuentra expuesto al aire libre.

El calor también puede ser transferido por radiación, definida como la continua emisión de energía de la superficie de todos los objetos. Relativamente a las bajas temperaturas observadas en los gasoductos, típicamente menores de 160°F, el calor transferido por radiación es mínimo y no tiene mayor incidencia, por lo que a menudo se desprecia para los cálculos totales de la transferencia de calor. La radiación puede ser minimizada cuando la tubería está hecha con un material de baja emisividad.

MODELOS TÉRMICOS PARA EVALUAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN GASODUCTOS

Un modelo térmico constituye una forma de representar el fenómeno de la transferencia de calor por medio de gráficas y ecuaciones matemáticas que ayudan a conocer en mayor detalle el fenómeno para evaluarlo, analizarlo y estudiarlo con el fin de tomar las mejores decisiones en el diseño del gasoducto y en el control de las condiciones operacionales a lo largo de su vida útil. El interés primordial radica en obtener el perfil de temperatura del gas que fluye por la tubería y conocer el calor total transferido al ambiente en cualquier punto del sistema. Un modelo térmico se deriva de la solución simultánea de las ecuaciones de masa, energía y momento y su complejidad depende del detalle necesario que se quiera para una aplicación dada.

Los dos modelos térmicos con mayor desarrollo matemático y analítico conocidos para la evaluación de la transferencia de calor en gasoductos, son el modelo estable y el modelo transiente. Las expresiones matemáticas que describen estos modelos pueden observarse en detalle en las referencias 1, 4, 5, 6, 7, 11 y 16.

1. MODELO TÉRMICO EN ESTADO ESTABLE

Este modelo asume que las condiciones de entrada del gas como caudal, presión, temperatura y composición son constantes con el tiempo así como también las condiciones externas que rodean la tubería, como la temperatura del ambiente externo, el tipo de suelo y otros factores.

Debido a que en la realidad las condiciones operacionales y ambientales no son constantes, este es un modelo que puede dar resultados no exactos o del todo confiables dependiendo de las características del sistema. Sin embargo, es el modelo usado con mayor frecuencia para el diseño de gasoductos por su sencillez, menor requerimiento de parámetros y facilidad de manejo. Las expresiones empleadas en el cálculo del perfil de temperatura a partir de este modelo permiten considerar la temperatura ambiente constante o variable a lo largo de todo el sistema de tuberías.

La consideración de temperatura ambiente constante implica que para tuberías con longitudes demasiado extensas, la temperatura del gas logra temperaturas cercanas a la temperatura del ambiente. Incluso en algunos casos la temperatura del gas puede estar por debajo de la temperatura ambiente si existe una elevación drástica en el perfil topográfico del gasoducto. Esta suposición es válida para gasoductos de extensiones cortas o en lugares donde los cambios de temperatura de un lado a otro no son importantes. Para redes de transmisión con tuberías interconectadas de longitudes mayores a 40 Km, la temperatura del ambiente suele ser diferente, por lo que el modelo anterior puede aplicarse si se trabaja por tramos, considerando una temperatura promedio constante para cada sección.

Para el caso en el que la temperatura del ambiente cambia con respecto a la distancia, Boyun Guo⁶ propone el uso de un gradiente de temperatura ambiente que sea representativo del lugar. Sin embargo, considera que el valor del gradiente y por ende la temperatura del ambiente debe cambiar lo suficiente para poder aplicar este modelo. Por ejemplo, este cambio puede llegar a ser del orden de 0.0005°F/ft, lo que implica que en una longitud de 32.800 ft (10Km) la temperatura del ambiente puede variar alrededor de 16.4°F, caso aplicable para gasoductos donde el perfil topográfico cambia drásticamente en distancias cortas.

2. MODELO TÉRMICO EN ESTADO TRANSIENTE

Una situación no estable o transitoria surge normalmente cuando las variables incluidas en el problema de la transferencia de calor varían con el tiempo, además de la posición. Aunque ciertos problemas de flujo se han abordado mediante aproximaciones a partir del estado estable, las suposiciones allí involucradas generan inconsistencias e imprecisiones al confrontar resultados con datos reales, razón por la cual es necesario considerar siempre en el diseño del gasoducto los cambios que se pueden presentar en las condiciones de operación.

El perfil de temperatura en un gasoducto está en equilibrio todo el tiempo (es estable) si las condiciones operacionales y del ambiente circundante también lo son. Sin embargo, si se presenta por ejemplo un cambio en el caudal de entrada, se produce una alteración de la temperatura en cada punto del gasoducto, alteración que se seguirá presentando hasta que se alcance de nuevo una distribución de temperatura estable a través de todo el sistema de tuberías. Las eventualidades que se presentan con mayor frecuencia en la operación de un gasoducto, que hacen que las condiciones de trabajo varíen, son:

➤ Cambios en el caudal de entrada al sistema o paradas de flujo.

➤ Cambios de la temperatura del ambiente que rodea la tubería (aire, tierra, agua), ya que ésta depende en gran medida de las condiciones atmosféricas existentes, como presencia de lluvias o radiación solar, que pueden variar constantemente.

➤ En el caso de tuberías enterradas, se presenta variación de la conductividad térmica del suelo ya que ésta depende de la humedad del mismo, que a su vez depende de la presencia de lluvias.

➤ Cierre de bombas y compresores.

➤ Cambios en la composición y temperatura de del fluido de entrada al sistema.

Considerar el efecto de todos estos escenarios no solo es complejo sino poco práctico en la operación diaria, por lo que el modelo es difícil de representar matemáticamente y su uso termina limitado solo a algunos casos en particular. A continuación veremos dos casos particulares: reinicio de flujo después de una parada y cambio en el caudal de flujo.

Reinicio de flujo después de una parada

El suministro continuo de gas puede ser interrumpido temporalmente como consecuencia de problemas operacionales, como fallas en la producción del campo, problemas de taponamiento en secciones de la línea o daños en la tubería. En este proceso, el gasoducto no se vacía sino que el gas queda almacenado temporalmente, alcanzando incluso la temperatura del ambiente que lo rodea si la parada se extiende por largo tiempo. Cuando el flujo se reinicia el perfil de temperatura estable alcanzado por el gas, empieza a cambiar hasta estabilizarse en un nuevo perfil correspondiente

al nuevo caudal de entrada con el cual se reinicia el flujo. Este perfil se mantendrá hasta que se vuelva a presentar una nueva alteración del caudal en el sistema. En la figura 1 se puede observar este comportamiento.

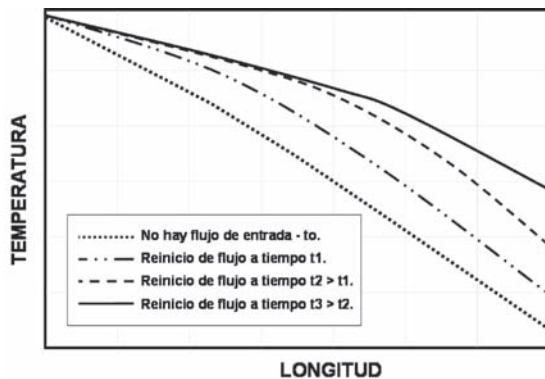


Figura 1. Perfil de temperatura en estado transitorio para un reinicio de flujo.

Cambio en el caudal de flujo

En un gasoducto el comportamiento del flujo y la presión están regulados por la demanda periódica de gas, de forma que durante las horas de máxima demanda, la tubería se despresuriza (comportamiento conocido como vaciado), y en las horas de menor consumo se presuriza (comportamiento conocido como empaquetamiento). Así mismo, el caudal en cada tramo de la misma es diferente. No se deben ignorar las propiedades de compresibilidad del gas, pues en contraposición a lo ocurrido con otros fluidos, cualquier disturbio generado en algún punto del sistema, ya sea por el cierre de una válvula o cualquier otra variación en el flujo másico, tarda en transmitirse a lo largo de la línea. Los picos máximos representan las horas de mayor consumo, los cuales suelen ser en la madrugada, al mediodía y a primeras horas de la noche. Los picos mínimos representan las horas de menor consumo, es decir, en la mañana, en la tarde y pasadas las primeras horas de la noche.

Inicialmente el gas alcanza un perfil de temperatura estable, que se altera al ocurrir un cambio en el caudal de entrada. Esta alteración

seguirá hasta que se alcance un nuevo perfil de temperatura estable con el nuevo caudal existente en el sistema. En la figura 2 se ilustra el cambio en el perfil de temperatura causado por una disminución en el caudal de entrada. Se puede observar que al inicio (t_0) el perfil de temperatura era estable, pero al presentarse una disminución en el caudal de entrada este perfil empieza a cambiar con el tiempo ($t_0 < t_1 < t_2$). Por último, llega un momento (t_3), en el que se alcanza un nuevo perfil de temperatura estable.

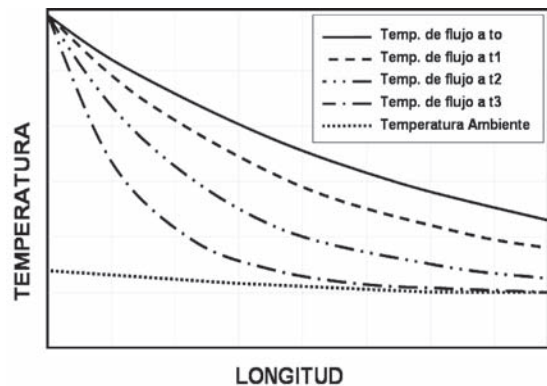


Figura 2. Perfil característico de temperatura en estado transitorio para una disminución en el caudal de entrada.

Se tiene entonces que una disminución en el caudal de entrada provoca que las pérdidas de calor en el gasoducto sean mayores, lo que conlleva a que las temperaturas del gas disminuyan, ubicando el nuevo perfil de temperatura por debajo del perfil inicial. Si hay un aumento en el caudal de entrada del gas se presentará el efecto contrario.

SELECCIÓN DEL MODELO TÉRMICO

Al comparar las expresiones matemáticas del modelo en estado estable con las del modelo transiente^{1, 5, 6, 16}, se encuentra que estas últimas presentan un mayor grado de complejidad, requieren una mayor cantidad de datos y solo pueden ser usadas para casos muy específicos, entre tantos otros que se pueden presentar en un gasoducto. Adicionalmente, los resultados

y las características propias que puede ofrecer el modelo en estado estable son acordes a las características del análisis planteado en este estudio, por lo tanto se opta finalmente por seleccionar este modelo térmico para el cálculo de la transferencia de calor en los diferentes escenarios planteados.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Los análisis se realizan sobre dos modelos de gasoductos, uno conceptual y uno real. Algunas de los parámetros empleados entre uno y otro modelo varían, debido a las diferencias entre sus dimensiones físicas. El modelo conceptual constituye un punto de partida para el análisis de resultados en el modelo real, teniendo en cuenta aspectos de diseño, que no pueden modificarse o analizarse en este último por carecer de sentido técnico y económico.

El análisis de sensibilidades se desarrolla con base en el perfil topográfico para los dos ambientes externos de transferencia de calor más comunes en Colombia, los cuales son un gasoducto enterrado y un gasoducto expuesto al aire libre. Para el gasoducto cuya tubería está enterrada se evalúan: tipo de suelo en que está enterrada la tubería, profundidad de enterramiento y diámetro de la tubería. Para un gasoducto expuesto al aire libre se evalúan la velocidad del aire y el diámetro de la tubería. Así mismo, para tuberías con aislamiento térmico, son evaluados el espesor y el tipo de aislante para los dos tipos de ambientes.

Para la evaluación de cada parámetro se toman cinco categorías diferentes del mismo, que obedecen a los rangos más empleados para una línea de transmisión de gas. Dependiendo del ambiente en el que se encuentre la tubería se deben especificar varios parámetros. Para tuberías enterradas se deben especificar el tipo de suelo y la profundidad de enterramiento; para tuberías al aire libre se deben especificar

propiedades como: densidad, viscosidad, conductividad, velocidad y capacidad calorífica del aire. Para cada parámetro se evalúa su impacto sobre la temperatura del gas, el calor transferido y el coeficiente global de transferencia de calor. Los datos obtenidos se presentan numérica y porcentualmente en forma tabular.

Para determinar una temperatura promedio del gas se toman cinco valores en el perfil de temperatura a diferentes distancias obteniéndose un valor que se toma como representativo de la línea. El perfil de temperatura del gas se grafica con respecto al perfil topográfico para cada uno de los parámetros que se evalúan. El calor transferido total es evaluado teniendo en cuenta las pérdidas desde el punto de entrada hasta el final del gasoducto.

Para la realización de este estudio se emplea la ecuación de estado de Peng & Robinson (PR)^{5, 10, 12} como modelo termodinámico, y la correlación mejorada de Beggs & Brill para realizar el análisis hidráulico^{4, 5, 12}.

El perfil topográfico del modelo conceptual se diseñó teniendo en cuenta la alta complejidad de la geografía del territorio colombiano y la variedad de condiciones climatológicas que se pueden presentar. Presenta tres secciones claramente diferenciadas, correspondientes a un ascenso, a un descenso brusco y a un sector relativamente plano. El gasoducto tiene una longitud total de 35.86 Km. La temperatura ambiente fue calculada con base en el perfil topográfico teniendo en cuenta la altura sobre el nivel del mar (Ver figura 3).

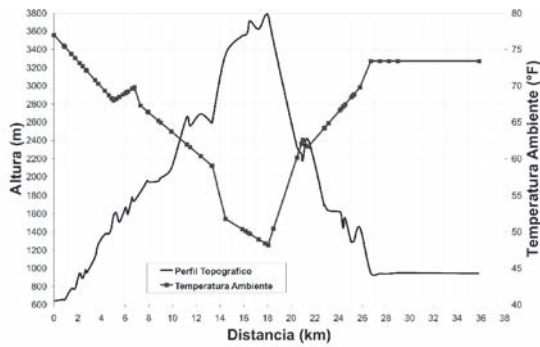


Figura 3. Perfil Topográfico Vs. Temperatura ambiente en el modelo conceptual.

El modelo del gasoducto real se seleccionó de una sección crítica del Sistema Nacional Colombiano a partir de las bajas temperaturas que se registran en algunas zonas del sistema y el alto volumen de gas transportado. Para ello se cuenta con toda la información referente a su perfil de elevación y su estructura (distancias, inclinaciones, elevaciones y condiciones ambientales medias). El gasoducto tiene una longitud de 86 Km, está enterrado en promedio a 1 metro de profundidad y la temperatura ambiente empleada corresponde a reportes climatológicos.

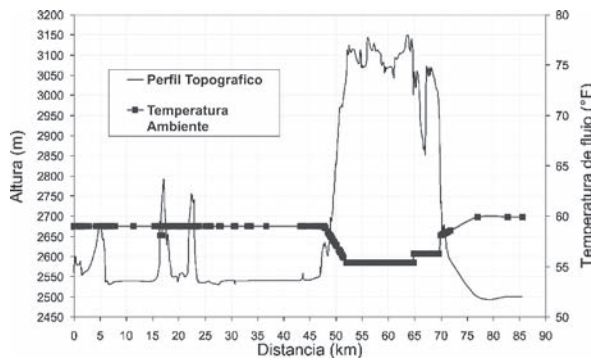


Figura 4. Perfil Topográfico Vs. Temperatura ambiente para el modelo real.

CONDICIONES OPERACIONALES

Las condiciones operacionales están divididas en dos grupos: el primero corresponde a las condiciones operacionales a la entrada del gasoducto, como son la temperatura, la presión y el caudal, cuyos valores fueron seleccionados

a partir de valores comúnmente utilizados en las operaciones del gasoducto real. Para el análisis desarrollado en este estudio estos valores permanecen constantes durante toda la simulación.

Tabla 1. Condiciones operacionales de entrada.

Gasoducto	Caudal (MMSCFD)	Presión (psia)	Temp. (°F)
Conceptual	108	912	120
Real	40.66	530	79.24

Las otras características del sistema tomadas como base para evaluar la incidencia de cada parámetro respecto al sistema, correspondientes a las propiedades de la tubería, del suelo y del aire circundante, se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la tubería y del medio en el modelo conceptual.

Tubería		
Conductividad Térmica	28	BTU/h ft °F
Diámetro Externo	20	In
Espesor	0.375	In
Terreno (Gasoducto enterrado)		
Terreno	Arena húmeda	
Conductividad Térmica	0.550	BTU/h ft °F
Profundidad de Enterramiento	3.281	ft
Aire (Gasoducto al aire libre)		
Densidad	0.072	lb/ft ³
Viscosidad dinámica	0.018	cp
Conductividad Térmica	0.015	BTU/h ft °F
Velocidad	6.56	ft/s

COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL GAS A MODELAR

Los datos composicionales del gas corresponden a una muestra representativa que se transporte en un gasoducto colombiano. La composición fue obtenida a partir de análisis cromatográficos que presentan al metano como componente principal y el resto a hidrocarburos desde C₂ a C₁₁₊, inorgánicos CO₂, O₂, y N₂.

Tabla 3. Composición del gas a modelar.

COMPONENTE	% MOLAR
Metano	78,1569
Etano	10,187
Propano	4,2106
i-Butano	0,6603
n-Butano	0,7051
Neo-Pentano	0,0062
i-Pentano	0,1368
n-Pentano	0,0813
2,2-Dimetilbutano	0,0015
Ciclopentano+2,3-Dimetilbutano	0,0069
Isohexano	0,0126
3-Metilpentano	0,0061
n-Hexano	0,0094
Otros componentes hidrocarburos	0,0335
Dióxido de Carbono	5,2396
Oxígeno	0,005
	0,5412

En la composición no se incluye el contenido de agua, ya que su porcentaje en la mezcla es insignificante comparado con la reglamentación establecida en la normatividad colombiana, es decir, muy inferior a 6 lb/MMPCS, y no es un factor relevante en los análisis de resultados.

Tabla 4. Propiedades Físico-Químicas del gas a las condiciones de entrada.

PROPIEDADES FISICO - QUIMICAS			
Propiedad	Modelo Conceptual	Modelo Real	Unidad
Temperatura	120	80	°F
Presión	912	530	Psia
Peso Molecular	20,9333	20,9333	lb/lbmol
Factor de Compresibilidad	0.8518	0.8823	
Densidad Molar	0.1721	0.1039	lbmol/ft ³
Densidad Másica	3.603	2.174	lb/ft ³
Viscosidad Cinemática	0.2410	0.3522	est
Viscosidad Dinámica	1.391x 10 ⁻²	1.227x 10 ⁻²	cp
Conductividad del Gas	2.25 x 10 ⁻²	1.927 x 10 ⁻²	BTU/h ft °F
	0.5868	0.5345	

PARÁMETROS A EVALUAR

Los parámetros a evaluar se detallan a continuación.

Tipo de suelo

El tipo de suelo tiene un impacto directo en la transferencia de calor debido al efecto de su conductividad térmica. Esta propiedad

define la cantidad de energía térmica que un suelo es capaz de conducir por unidad de longitud y temperatura. Se ve influenciada por la saturación de aire o agua en el suelo. Además la conductividad térmica depende también de la distribución del tamaño de grano, densidad del suelo seco, textura del suelo y la composición mineral. Los valores característicos establecidos para las conductividades dependiendo del tipo de suelo se presentan en la tabla 5.

Las condiciones climáticas como la presencia de lluvias juegan un papel muy importante en la conductividad del suelo causando que esta no sea constante con respecto al tiempo, aspecto que suele producir errores en los cálculos de la transferencia de calor. Para este estudio se escogieron cinco tipos de suelos que se pueden encontrar en la geografía del territorio colombiano; estos son: arena seca, arena húmeda, arena mojada, arcilla húmeda y arcilla mojada.

Tabla 5. Conductividad térmica para diversos tipos de suelo.

TIPO DE SUELO	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA BTU/h ft
Turba seca	0.094
Turba Húmeda	0.310
Arena seca	0.325
Arena Húmeda	0.550
Arena Mojada	1.125
Arcilla Seca	0.250
Arcilla Húmeda	0.450
Arcilla Mojada	0.750
Grava	0.550
Grava Arenosa	1.451
Caliza	0.750
Arenisca	1.071

Profundidad de enterramiento

La profundidad de enterramiento es medida desde la superficie del suelo hasta la línea del centro de la tubería. Los valores típicos pueden variar entre 1.968

y 16.4 ft (0.6 y 5 m). En terrenos donde se presenta alta erosión es recomendable enterrar la tubería a profundidades mayores, causando costos adicionales al diseño del proyecto. Las 5 profundidades seleccionadas para este estudio fueron 1.968 ft, 2.62 ft, 3.28 ft, 6.56 ft y 9.84 ft (0.6, 0.8, 1, 2 y 3 mts, respectivamente).

Velocidad del aire

Es el valor medido de la velocidad del aire que cruza la parte externa de la tubería. Este factor es decisivo para el cálculo del coeficiente convectivo externo en tuberías al aire libre y determina el proceso por el cual se da la transferencia de calor: convección forzada si existen velocidades medias o altas y convección natural cuando las velocidades son mínimas.

Cuando se presenta convección forzada, el calor transferido es mayor, razón por la cual, en un gasoducto al aire libre se alcanzan mayores reducciones en la temperatura del gas. Los valores de la velocidad evaluados son: 0.328 ft/s, 3.28 ft/s, 6.56 ft/s, 9.84 ft/s y 13.12 ft/s (0.1, 1, 2, 3 y 4 m/s).

Espesor y Tipo de aislante

El aislamiento térmico tiene como objetivo minimizar las pérdidas de calor en la línea de transporte. El aislante escogido para realizar el análisis del espesor es la espuma de PVC cuya conductividad térmica es de 0,023 BTU/hrft°F. Se seleccionaron cinco espesores de este aislante para ser evaluados: 0.25 in, 0.5 in, 1in, 1.5 in y 1.75 In. Así mismo, el espesor elegido para realizar el análisis del tipo de aislante es de 1 in. En este caso se seleccionaron cinco aislantes usados comúnmente: polietileno, polipropileno, poliuretano, espuma de PVC y espuma de Poliuretano. Los resultados obtenidos son comparados con los de una tubería que no presenta aislamiento.

Tabla 6. Conductividad térmica para diversos tipos de aislantes.

TIPO DE AISLANTE	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA BTU/hr ft °F
Concreto	0.172
Fibra de vidrio	0.023
Neopreno	0.145
Poliestireno	0.090
Poliestireno Espuma	0.018
Polietileno	0.210
Polipropileno	0.130
Poliuretano	0.070
Poliuretano Espuma	0.017
PVC	0.110
PVC Espuma (Foam)	0.023

Diámetro y espesor de la tubería

El impacto del diámetro se ve reflejado en el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor tanto interno como externo. Una variación en el diámetro interno modifica el área transversal de flujo de gas modificando por lo tanto la velocidad del gas. En el caso del efecto sobre el coeficiente externo, se tiene que el diámetro modifica el área externa por el cual la tubería transfiere el calor al ambiente.

Los diámetros de un gasoducto son seleccionados de acuerdo al caudal de entrada al sistema durante las proyecciones de vida útil del mismo. Los diámetros seleccionados son: 16 in, 20 in y 24 in. Se evalúan también dos espesores de tubería, que corresponden a un valor máximo y un valor mínimo de 0.180 in y 1.969 in, respectivamente.

RESULTADOS OBTENIDOS

En este punto se presentan los resultados obtenidos de la simulación, con el fin de analizar el impacto de las diferentes variables sobre las pérdidas de calor que se pueden presentar en un gasoducto, específicamente sobre la variación en

el coeficiente global de transferencia de calor (U), la temperatura de flujo (T) y las pérdidas totales de calor (Q). El énfasis de las observaciones se centra en el modelo conceptual de un gasoducto enterrado, el mismo gasoducto al aire libre y la validación del caso más relevante a través del modelo real para el caso de un gasoducto enterrado.

Modelo Conceptual: Gasoducto enterrado

Los resultados para el modelo conceptual del gasoducto enterrado se presentan en las tablas 7, 8, 9 y 10. Se pueden observar tanto el valor numérico como la desviación porcentual respecto al parámetro tomado como referencia base en cada propiedad evaluada en el sistema. Esto también puede apreciarse en las figuras 5 y 6, en el caso del efecto del tipo de terreno y del tipo de aislante, respectivamente.

En la tabla 7 se evidencia que el tipo de suelo en el que se encuentre la tubería tiene una marcada influencia en las pérdidas de calor del sistema. Se comprueba que a mayor conductividad térmica del suelo mayor es la transferencia de calor al ambiente, como en el caso de la arena mojada, donde el valor del coeficiente global de transferencia de calor es 3.4 veces mayor que el de la arena mojada, por ejemplo, lo que implica un aumento del 86 % en el calor transferido al ambiente.

Tabla 7. Efecto del tipo de suelo.

Tipo de Suelo	K (BTU/h ft °F)	U (BTU/h ft ² °F)	T (°F)	Q (BTU/h)	U (%)	T (%)	Q (%)
Arena Seca	0.325	0.1900	90.4	3'270.280	-40.8	6.9	-28.2
Arcilla Húmeda	0.450	0.2629	86.9	4'050.000	-18.1	2.7	-11
Arena Húmeda	0.550	0.3211	84.6	4'551.920	0	0	0
Arcilla Mojada	0.750	0.4372	80.8	5'286.500	36.2	-4.5	16.1
Arena Mojada	1.125	0.6540	75.9		103.7		33.91

Como se denotó anteriormente la conductividad térmica depende principalmente del contenido de agua del suelo (mayor contenido de agua equivale a mayor conductividad térmica), por

lo tanto es importante que las condiciones climatológicas (precipitaciones) sean consideradas en el trazado del gasoducto.

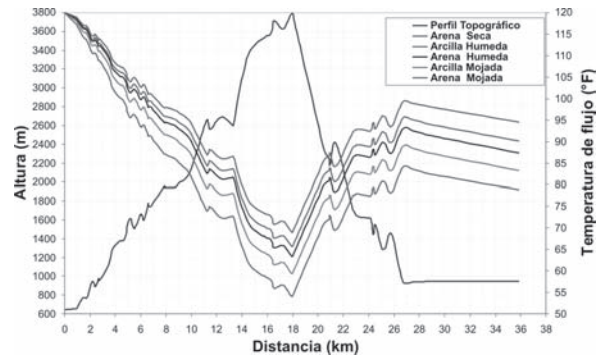


Figura 5. Perfil de Temperatura Vs. Tipo de Suelo.

En cuanto a la profundidad de enterramiento se observa que un aumento de esta provoca una menor pérdida de calor en el gasoducto. Si se comparan los resultados obtenidos en la tabla 8, el valor de U es 2.4 veces mayor para un gasoducto que se encuentra a 1.968 ft (0.6 m) comparado con uno a 9.840 ft (3 m). Desde este punto de vista, todo gasoducto debe estar enterrado la mayor profundidad posible para minimizar las pérdidas de temperatura del fluido hacia los alrededores.

Tabla 8. Efecto de la profundidad de enterramiento.

Profundidad de enterramiento H (ft) – (m)	U (BTU/h ft ² °F)	T (°F)	Q (BTU/h)
1.97 – 0.6	0.5050	79.0	5'709.900
2.62 – 0.8	0.3762	82.7	4'939.300
3.28 – 1	0.3211	84.6	4'551.920
6.56 – 2	0.2390	88.0	3'820.920
9.84 – 3	0.2082	89.5	3'489.080
H (%)	U (%)	T (%)	Q (%)
-40	57.3	-6.6	25.4
-20	17.2	-2.2	8.50
0	0	0	0
100	-25.6	4	-16.1
200		5.8	

En la tabla 9, se observa que la presencia de un aislamiento térmico en una tubería enterrada

disminuye naturalmente las pérdidas de calor, sin embargo, este valor no es tan representativo en comparación con su posible costo económico. En este caso, si se instalara un aislante térmico tipo PVC Espuma (utilizado como aislante base en el análisis de sensibilidad) a lo largo de todo el gasoducto, la disminución en las pérdidas de calor que se generarían en el sistema con un valor superior a 1 in de espesor, no es tan considerable, en comparación con los costos de su instalación.

Tabla 9. Efecto del espesor del aislante en tuberías enterradas.

Espesor Aislante (in)	U (BTU/h ft ² °F)	T (°F)	Q (BTU/h)	U (%)	T (%)	Q (%)
0	0.3211	84.6	4'551.920	0	0	0
0.25	0.2457	87.5	3'949.110	-23.5	3.4	-13.2
0.50	0.1982	89.5	3'486.950	-38.3	5.8	-23.4
1.00	0.1416	92.3	2'834.000	-55.9	9.1	-37.7
1.50	0.1092	94.1	2'400.080	-66.0	11.2	-47.3
2.00	0.0883	95.3	2'091.570	-73	13	-54.0

De la misma forma el uso de diversos tipos de aislantes no contribuyen en gran medida a minimizar las pérdidas de calor en un gasoducto enterrado; así la tubería se encuentre aislada térmicamente con un aislante de buena calidad como la espuma de poliuretano, la temperatura del gas se ve aumentada solo en 9.1 °F. Al comparar las tablas 8 y 9 se puede observar que para minimizar las pérdidas de calor en el gasoducto se obtiene el mismo efecto si se entierra la tubería a una profundidad de 9.84 ft o si se aísla con una espuma de PVC con espesor 0.5 in.

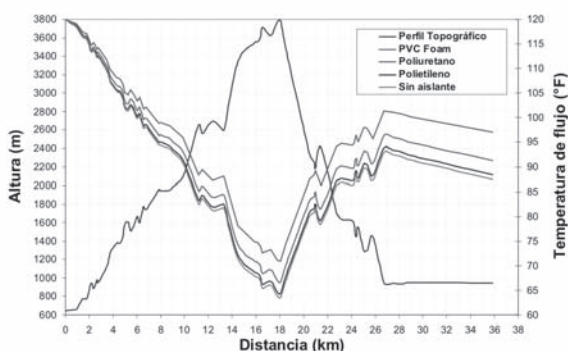


Figura 6. Perfil de Temperatura Vs. Tipo de Aislante en tuberías enterradas.

Tabla 10. Efecto del tipo de aislante en tuberías enterradas.

Tipo de Aislante	U (BTU/h ft ² °F)	T (°F)	Q (BTU/h)	U (%)	T (%)	Q (%)
Sin Aislante	0.3211	84.6	4'551.920	0	0	0
Polietileno	0.2719	85.6	4'375.940	-15.3	1.2	-3.9
Polipropileno	0.2542	86.2	4'208.870	-20.8	1.9	-7.5
Poliuretano	0.2217	87.8	3'870.960	-31.0	3.8	-15
PVC Foam	0.1416	92.3	2'834.000	-55.9	9.1	-37.7
Poliuretano Espuma	0.1190	93.7	2'479.540	-62.9	10.8	-45.5

Gasoducto al aire libre

Las variables analizadas fueron la velocidad del aire (ver figura 7), el espesor (ver figura 8) y el tipo de aislante. De acuerdo con los datos de la tabla 11, el efecto generado por la velocidad del aire en la medida en que el efecto generado por la convección forzada es mayor, hace que el gasoducto experimente las temperaturas más bajas de los diferentes casos evaluados. Así mismo, se evalúa el efecto de una velocidad mínima con el objetivo de crear un escenario de convección natural.

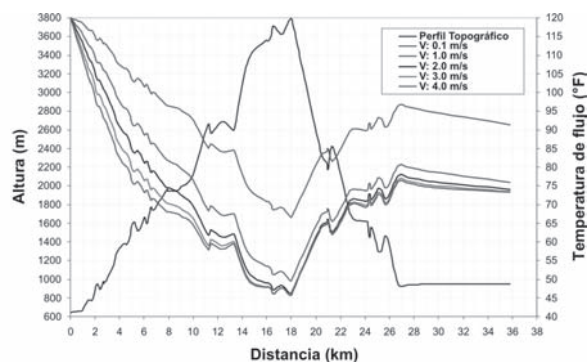


Figura 7. Perfil de Temperatura Vs. Velocidad del aire.

Si se comparan las pérdidas de calor entre un gasoducto al aire libre con un gasoducto enterrado, considerando por ejemplo el caso base en cada modelo (enterramiento de 1m y velocidad del aire de 2m/s) y las demás variables constantes, la transferencia de calor Q aumenta 52.1% y el coeficiente U es mayor 5 veces en el primer caso. Esto indica que la transferencia de calor en un gasoducto al aire libre es mucho mayor a la que se presenta en un gasoducto enterrado.

Tabla 11. Efecto de la velocidad del aire.

Velocidad del aire (ft/s)	U (BTU/h ft ² °F)	T (°F)	Q (BTU/h)	% V	U (%)	T (%)	Q (%)
0.328	0.2422	87.9	3'854.040	-95.0	-84.9	28.7	-44.3
3.280	0.9637	71.9	6'616.800	-50.0	-39.8	5.3	-4.5
6.560	16.013	68.3	6'925.370	0	0	0	0
9.840	22.020	67.0	6'988.640	50.0	37.5	-1.9	0.9
13.120	27.556	66.5	7'404.050	100	72.1	-2.6	6.9

En el caso del efecto del aislamiento térmico, este es más relevante en un gasoducto al aire libre. En la tabla 12 se puede observar por ejemplo que una capa de aislante de espesor 1 in disminuye las pérdidas en un 43.5 %. Por lo tanto, es recomendable el uso de un aislamiento térmico en aquellas secciones de un gasoducto que estén al aire libre.

Tabla 12. Efecto del espesor del aislante.

Espesor Aislante (in)	U (BTU/h ft ² °F)	T (°F)	Q (BTU/h)	U (%)	T (%)	Q (%)
0	16.013	68.3	6'925.370	0	0	0
0.25	0.6463	75.8	6'127.100	-59.6	11.0	-11.5
0.50	0.4020	81.3	5'216.160	-74.9	19.0	-24.7
1.00	0.2254	87.6	3'910.800	-85.9	28.3	-43.5
1.50	0.1546	91.1	3'125.900	-90.3	33.4	-54.9
2.00	0.1166	93.2	2'611.040	-92.7	36.5	-62.3

Tabla 13. Efecto del tipo de aislante.

Tipo de Aislante	U (BTU/h ft ² °F)	T (°F)	Q (BTU/h)	U (%)	T (%)	Q (%)
Sin Aislante	16013	68.3	6'925.370	0	0	0
Polietileno	0.9495	71.2	6'693.130	-40.7	4.2	-3.4
Polipropileno	0.7638	73.2	6'302.930	-52.3	7.2	-9
Poliuretano	0.5304	77.3	5'898.990	-66.9	13.2	-14.8
PVC espuma	0.2254	87.6	3'910.800	-85.9	28.3	-43.5
Poliuretano espuma	0.1731	90.4	3'278.870	-89.2	32.4	-52.7

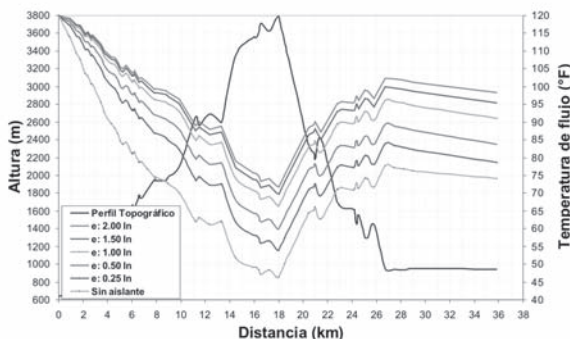


Figura 8. Perfil de Temperatura Vs. Espesor del aislante en tuberías al aire libre.

Evaluación de otros parámetros

Otros parámetros que se analizaron fueron el espesor y el diámetro de la tubería. En síntesis se determinó que estos no presentan un efecto significativo en las pérdidas de calor del sistema

En el caso del diámetro de la tubería, es interesante comprobar que se presenta un efecto diferente para los dos tipos de ambientes, como se muestra en la tabla 14, para el caso del coeficiente global de transferencia de calor U. Un aumento del diámetro causa una disminución en el coeficiente convectivo interno y un aumento del coeficiente convectivo externo, debido a que el área de transferencia se hace mayor. En el gasoducto enterrado el coeficiente convectivo interno es el que domina por lo que el valor de U disminuye; caso contrario sucede en un gasoducto al aire libre en el que el coeficiente convectivo externo es el que domina causando que el valor de U aumente a medida que se aumente el diámetro.

Tabla 14. Efecto del diámetro en el coeficiente global de transferencia de calor.

Diámetro (in)	U (BTU/h ft ² °F) - T. enterrada	U (BTU/h ft ² °F) - T. al Aire libre
16	0.3613	15.337
20	0.3211	16.013
24	0.2947	16.816

Respecto al espesor de la tubería se observó que este parámetro no tiene un efecto considerable en las pérdidas de calor mientras el gasoducto se mantenga en operación, pues la alta velocidad de flujo del gas no permite que el efecto de conductividad entre la pared interna y externa sea relevante. Esta suposición no es válida cuando no hay flujo en el sistema.

MODELO REAL

En este caso se muestra la evaluación realizada sobre diferentes tipos de terreno, debido a

su sensibilidad a la frecuente variación en las condiciones climatológicas (precipitaciones) que alteran las propiedades del terreno.

Como se puede apreciar en la tabla 15, el perfil de temperatura del gas sigue los mismos patrones que los del modelo conceptual. Los porcentajes no son los mismos debido a que en este caso, la temperatura de entrada del gas es muy cercana a la temperatura ambiente y por lo tanto el calor transferido es mucho menor que en el modelo conceptual. Sin embargo, en todas las evaluaciones realizadas se observaron las mismas tendencias y congruencia en los resultados.

Tabla 15. Efecto del tipo de suelo para el modelo real.

Tipo de suelo	K (BTU/h ft °F)	U (BTU/h ft2 °F)	T (°F)	Q (BTU/h)	U (%)	T (%)	Q (%)
Arena Seca	0.1894	62.3	666.420	-40.9	-40.6	1.8	-29.4
Arcilla Húmeda	0.2616	61.8	830.210	-18.2	-18	1.0	-12.1
Arena Húmeda	0.3191	61.2	944.500	0	0	0	0
Arcilla Mojada	0.4335	60.2	1'107.814	36.4	35.9	-1.6	17.3
Arena Mojada	0.6457	59.4	1'180.635	104.5	102.4	-2.9	25

CONCLUSIONES

La mayoría de los parámetros analizados, como el tipo de suelo, la profundidad de enterramiento, la velocidad del aire, el espesor y tipo de aislante, tienen una alta influencia en las pérdidas de calor de un gasoducto. En cambio, parámetros como el espesor y el diámetro de la tubería tienen un efecto mínimo. Aunque la composición del gas no incide directamente en la transferencia de calor, si juega un papel trascendental en el momento de evitar la presencia de problemas operacionales por condensación o presencia de hidratos¹⁴.

El ambiente externo en el que se encuentre la tubería tiene una gran influencia sobre el perfil de temperatura del gas. Para un gasoducto al

aire libre, las pérdidas son mucho mayores que para un gasoducto enterrado. Las condiciones climatológicas, específicamente la presencia de lluvias, deben ser consideradas en gasoductos enterrados ya que a mayor cantidad de agua, la conductividad del suelo se incrementa y por lo tanto las pérdidas del sistema.

En un gasoducto al aire libre, la velocidad del aire es el parámetro de mayor impacto sobre la transferencia de calor, causando que la convección forzada sea el mecanismo predominante por el cual se transfiere el calor del gas al ambiente.

Aunque la tubería cuente con aislamiento térmico, las pérdidas de calor siguen siendo considerables para varios tipos de aislante y varios espesores analizados. La ventaja que se obtiene en cuanto a minimizar las pérdidas de temperatura no es muy notable sobre todo para gasoductos enterrados.

Se considera que estos análisis pueden ser utilizados satisfactoriamente como referencia para el diseño, construcción y/o la evaluación de las condiciones operacionales de un gasoducto.

RECOMENDACIONES

Promover la investigación de estudios más detallados de la transferencia de calor a través del modelo en estado transitorio, hacia a una mejor interpretación de este fenómeno en los diferentes escenarios comprometidos con la industria del gas natural.

Debido al creciente hallazgo de reservorios de gas en aguas costa afuera y a la implementación de líneas para su transporte en ambientes más severos como las bajas temperaturas en aguas profundas, se sugiere que este estudio sea efectuado para tuberías sumergidas en ambientes marinos.

REFERENCIAS

1. Adewumi, M.A. & Zhou, J., Predicting flowing gas temperature and pressure profiles in buried pipelines. SPE 38460. 1997.
2. Alves, I.N. & Shoham, O., A unified model for predicting flowing temperature distribution in wellbores and pipelines. SPE 20632. 1992.
3. Barrera, J.J., Modelagem transiente da transferencia de calor em dutos de petróleo ou gas térmicamente isolados. Tesis de Grado. PUC, Rio de Janeiro. 2005.
4. Beggs, H & Brill, J. A Study of Two Phase Flow in Inclined Pipes. Journal of Petroleum Engineering. SPE 4007. 1973.
5. Bolaños, C. & Paez, O. Análisis de sensibilidad de los parámetros que influyen en la transferencia de calor en gasoductos. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2006.
6. Boyun, G. & Shengkai, D., A simple model for predicting heat loss and temperature profiles in thermal injection lines and wellbores with insulations pipelines. SPE 86983. 2004.
7. Brown, T.S. & Clapham, J., Application of a transient heat transfer model for bundled, multiphase pipelines. SPE 36610. 1996.
8. Donald, W., et al. A tutorial on pipe flow equations. Stoner Associates Inc. 2000.
9. Erickson, D., et al. A transient multiphase temperature prediction program. SPE 24790. 1992.
10. Eun, L.L. & Seung, Y.C., A comparative study of statistical and mathematical methods for natural gas pipeline network analysis. SPE 50335. 1998.
11. Modisette, J.L., Pipeline thermal models. Transient and succession of steady states pipelines flow models. Energy Solutions International. 2001.
12. Pineda, César, et al. Evaluación del impacto de las propiedades termodinámicas del gas natural sobre la condensación de fluidos en el sistema de gasoductos colombiano. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Pág. 135-146. Julio de 2006.
13. Romero, N.M. & Peralta, O., Natural gas network optimization and sensibility analysis. SPE 74384. 2002.
14. Sadegh, A. & Adewumi, M.A., Temperature distribution in natural gas condensate pipelines using a hydrodynamic model. SPE 97978. 2005.
15. Santos, S.P., Transient analysis in gas pipeline design. PSIG. 1997.
16. Towler, B.F. & Mokhatab, S., New method developed for sitting line heaters on gas pipelines. Oil and Gas Journal, March 15, 2004; p.56-59.