

INYECCIÓN DE GASES CON ALTO PRHC AL SISTEMA DE TRANSPORTE

Dulce R. Gómez Penzo y Rodrigo A. de la Fuente
Transportadora de Gas del Sur S.A

1.- SINOPSIS

Debido a la declinación de algunos yacimientos y a la necesidad de proponer alternativas que flexibilicen las exigencias en la inyección de gas natural para satisfacer la creciente demanda, se realizaron estudios con el objeto de evaluar las condiciones en las que se podrían inyectar gases ricos en el sistema de transporte. Entendiéndose por gases ricos, aquellos gases que no cuentan con el acondicionamiento adecuado en lo que a punto de rocío de hidrocarburo (PRHC) se refiere.

Según lo indicado en la Resolución I-259/08, la especificación de calidad de gas exige (entre otras cosas) que los gases a ser inyectados al sistema de transporte tengan un PRHC menor a $-4\text{ }^{\circ}\text{C @ 5500 kPa (Abs)}$, evitando de esa manera la posible formación de líquidos en algún punto del recorrido.

En este trabajo se presenta un análisis teórico sobre dos gasoductos hipotéticos. Se analizaron diferentes escenarios, los cuales tienen en cuenta distintos tipos de terrenos y distintas temperaturas ambiente. Se simuló la inyección de un gas rico y se monitoreó, mediante la utilización de las herramientas de simulación, la posible formación de líquidos en algún punto del recorrido. Para aquellos casos en los que se manifestó la presencia de líquidos, se analizaron posibles soluciones para evitar dicho fenómeno.

Con este análisis se propone una alternativa de operación para ciertos períodos del año y para ciertas zonas a lo largo del recorrido del gasoducto, ya que del estudio se desprende que no hay formación de líquidos a pesar de que las inyecciones no respondan con la especificación de PRHC exigida por la Resolución I-259/08.

2.- INTRODUCCIÓN

2.1.- Configuración del sistema de transporte

En el *Gráfico 1* se representa un sistema de transporte hipotético. En el mismo se indican cada una de las inyecciones realizadas en el denominado gasoducto “Troncal”. Este gasoducto tiene una longitud total de 100 km y un diámetro nominal (DN) de 30”. En el tramo de gasoducto comprendido desde la cabecera hasta el Km. 75 no existen entregas zonales.

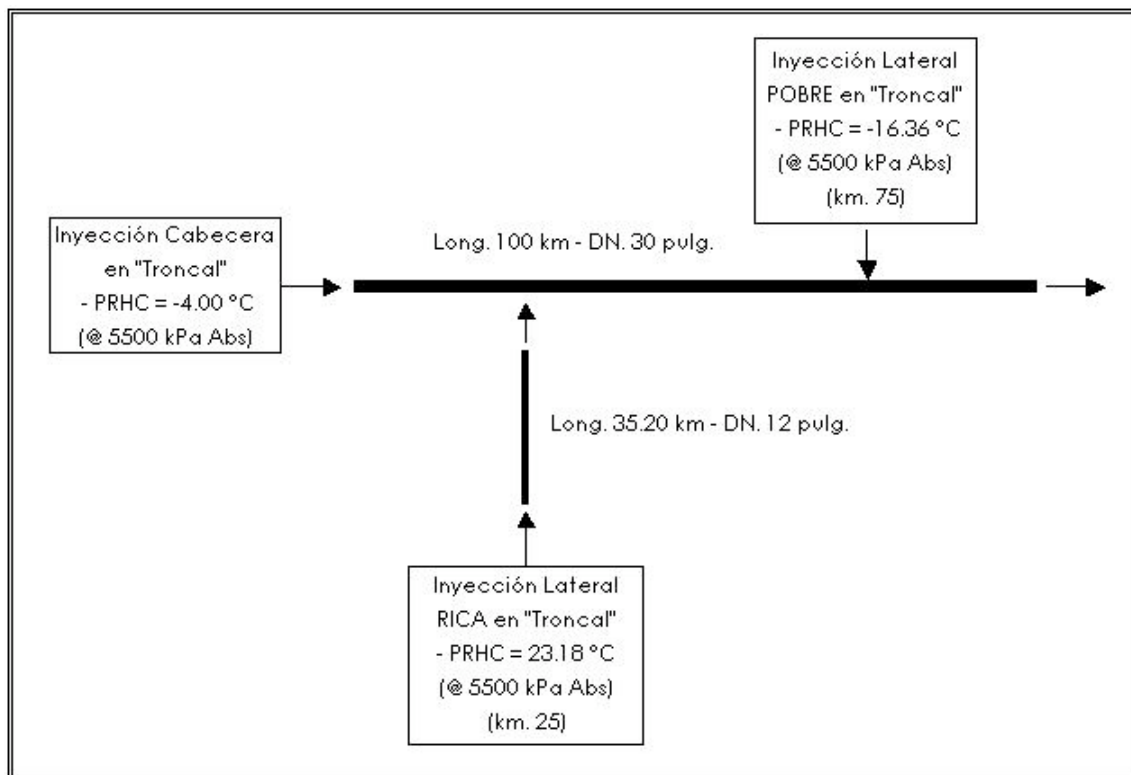
En la cabecera del mismo, se inyecta una corriente gaseosa con un PRHC de $-4.00\text{ }^{\circ}\text{C @ 5500 kPa (Abs)}$. Dicho valor de PRHC satisface lo exigido por la Resolución I-259/08, por lo tanto es factible su inyección al gasoducto “Troncal”.

En el km. 25 de dicho gasoducto se pretende inyectar una corriente gaseosa “RICA” con un PRHC de $23.18\text{ }^{\circ}\text{C @ 5500 kPa (Abs)}$. Antes de ser inyectada al gasoducto “Troncal”, esta corriente debe recorrer un gasoducto de 35.20 km de longitud y 12” de DN. Deberá verificarse entonces, la posible existencia de líquidos en algún punto de su recorrido previa inyección al gasoducto “Troncal”, trabajando con distintos tipos de terreno y distintas temperaturas ambiente. Posteriormente, una vez inyectada la corriente “RICA” en el sistema de transporte, se repetirá el mismo análisis sobre el

gasoducto “Troncal”. Si se evidencia la presencia de líquidos, se analizara de que manera evitar dicho fenómeno.

En el km. 75 del gasoducto “Troncal”, se inyecta una corriente gaseosa “POBRE” con un PRHC de $-16.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ @ 5500 kPa (Abs).

Gráfico 1.- Configuración del sistema de transporte



2.2.- Características de los gasoductos y sus respectivos perfiles de altimetría

En la *Tabla 1* se resumen las características de los gasoductos a analizar, mientras que en los *Gráficos 2.a y 2.b*, se presentan sus respectivos perfiles de altimetría.

Tabla 1.- Características de los gasoductos

Características	Inyección Cabecera	Inyección Lateral Rica
Diámetro Nominal (pulg)	30.00	12.00
Diámetro Exterior (pulg)	30.00	12.75
Diámetro Exterior (mm)	762.00	323.85
Diámetro Interior (mm)	736.60	311.15
Espesor (mm)	12.70	6.35
Longitud (km)	100.00	35.20

Ambos gasoductos se consideran enterrados a una profundidad de 1.00 m.

Gráfico 2.a- Perfil de altimetría del gasoducto “Troncal”

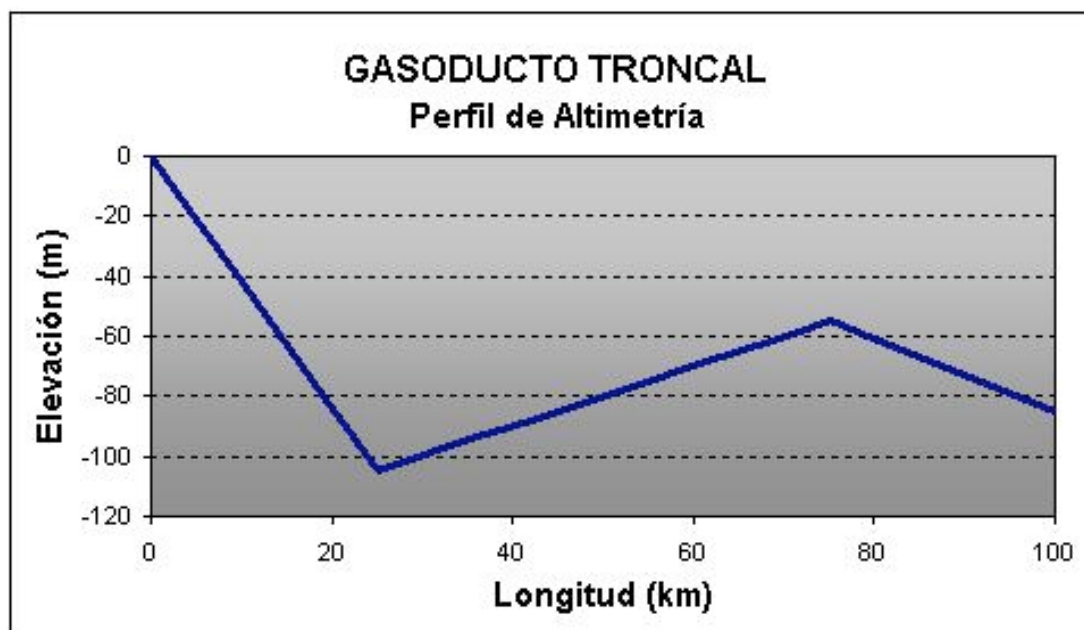
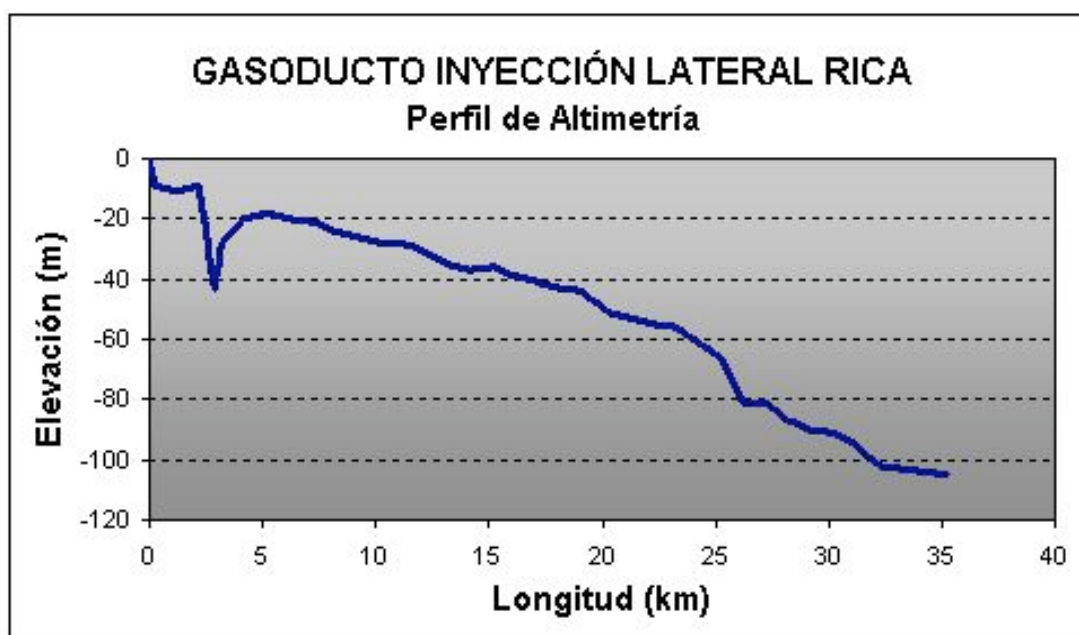


Gráfico 2.b- Perfil de altimetría del gasoducto “Inyección Lateral Rica”



2.3.- Características de las corrientes inyectadas en el gasoducto “troncal”

En la siguiente tabla se especifican las corrientes a ser inyectadas en el gasoducto “Troncal”.

Tabla 2.- Características de las corrientes inyectadas en el gasoducto "Troncal"

Características	Inyección Cabecera	Inyección Lateral Rica	Inyección Lateral Pobre
Caudal (Sm ³ /d)	10.000.000	1.000.000	3.000.000
N ₂	1.025	2.114	2.225
CO ₂	0.214	0.035	0.034
C ₁	87.757	90.346	93.536
C ₂	6.388	3.710	2.868
C ₃	2.741	1.738	0.748
iC ₄	0.428	0.581	0.199
nC ₄	0.907	0.676	0.207
iC ₅	0.245	0.238	0.069
nC ₅	0.245	0.201	0.053
C ₆	0.044	0.184	0.030
C ₇	0.004	0.137	0.021
C ₈ +	0.002	0.040	0.009
SG	0.647	0.633	0.594
PRHC @ 5500 kPa Abs (°C)	-4.00	23.18	-16.36
Poder Calorífico (Kcal/m ³)	10.140	9.827	9.255

3.- DESARROLLO

3.1.- Evaluación de la condensación de líquidos en los gasoductos

Para este análisis se analizaron diferentes escenarios, los cuales tienen en cuenta distintos tipos de terreno y distintas temperaturas ambiente.

3.1.1.- Tipos de Terreno

Los tipos de terreno fueron seleccionados en base a valores utilizados en simulaciones realizadas por Transportadora de Gas del Sur sobre sus respectivos gasoductos, siendo los mismos:

Tipo de Terreno	Conductividad Térmica
Arena limosa / Grava calcárea	0.50 W/mK
Roca caliza / Roca conglomerada con calcita	1.30 W/mK
Arena mal graduada con piedras y limo	2.50 W/mK

3.1.2.- Temperaturas Ambiente

Por otro lado, la selección de los valores de temperatura ambiente se basó en cubrir diferentes estaciones del año. Estos valores son *i)* 0.00 °C, *ii)* 5.00 °C, *iii)* 10.0 °C, *iv)* 15.00 °C, *v)* 20.00 °C y *vi)* 25.00 °C; *vii)* 30.00 °C.

3.2.- Gasoducto "Inyección Lateral Rica"

Este análisis se realiza sobre el gasoducto de 35.20 Km de longitud. El mismo se dividió en tres escenarios, dependiendo del tipo de terreno utilizado en la simulación. A su vez, para cada uno de ellos se varió la temperatura ambiente (según los valores indicados en el ítem 3.1.2) y la temperatura de entrada del gas al gasoducto en cuestión. Este último valor puede ser incrementado

mediante la ubicación de un calentador en la cabecera del mismo, con el único propósito de mantener la temperatura del gas por encima de su PRHC (a lo largo de todo el recorrido del gasoducto), evitando la condensación de líquidos. Según la Resolución I-259/08, la máxima temperatura del gas a ser inyectado en el gasoducto debe ser 50 °C.

ESCENARIO 1 – Conductividad térmica del terreno = 2.50 W/mK

Al trabajar en la simulación con este valor de conductividad térmica, la temperatura del fluido en el interior del caño alcanza rápidamente el valor de la temperatura ambiente, llegando (para temperaturas ambiente inferiores a 25°C) a temperaturas por debajo de su PRHC (a la presión del gasoducto en dicho punto), con la consiguiente condensación de líquidos.

En la *Tabla 3* se presentan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios. Independientemente que se lleve la temperatura del gas a la salida del calentador a los 50°C, es imposible evitar la condensación de líquidos para temperaturas ambiente inferiores a 25°C.

Cuando los valores de temperatura ambiente superen los 25°C, puede reducirse la temperatura del gas a la salida del calentador hasta los 30°C, sin perjuicio de que condensen líquidos en el gasoducto.

Tabla 3.- Resultados obtenidos trabajando con un terreno cuya conductividad térmica es igual a 2.50 W/mK

Temperatura del ambiente	(°C)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
Temperatura de salida del calentador	(°C)	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	30.00	30.00
Presión de entrada al ducto	(kg/cm ² M)	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Temperatura de salida del ducto	(°C)	-0.04	4.95	9.95	14.94	19.93	24.95	29.95
Presión de salida del ducto	(kg/cm ² M)	58.44	58.35	58.25	58.15	58.06	58.42	58.35
Caudal de líquidos formado	(m ³ /d)	30.64	22.68	15.56	9.08	3.10	0.00	0.00

ESCENARIO 2 - Conductividad térmica del terreno = 1.30 W/mK

En este caso, a pesar de tener un terreno cuya conductividad térmica es inferior al del ESCENARIO 1, también existirá condensación de líquidos en algún punto del recorrido.

En la *Tabla 4*, se presentan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios.

En este caso, si bien la cantidad de líquidos generados es inferior, se puede apreciar que la tendencia en los resultados obtenidos es la misma al del caso anterior.

Tabla 4.- Resultados obtenidos trabajando con un terreno cuya conductividad térmica es igual a 1.30 W/mK

Temperatura del ambiente	(°C)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
Temperatura de salida del calentador	(°C)	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	30.00	30.00
Presión de entrada al ducto	(kg/cm ² M)	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Temperatura de salida del ducto	(°C)	0.54	5.43	10.34	15.25	20.17	24.97	29.93
Presión de salida del ducto	(kg/cm ² M)	58.39	58.31	58.23	58.16	58.15	58.41	58.35
Caudal de líquidos formado	(m ³ /d)	29.68	21.97	15.03	8.69	2.81	0.00	0.00

ESCENARIO 3 - Conductividad térmica del terreno = 0.50 W/mK

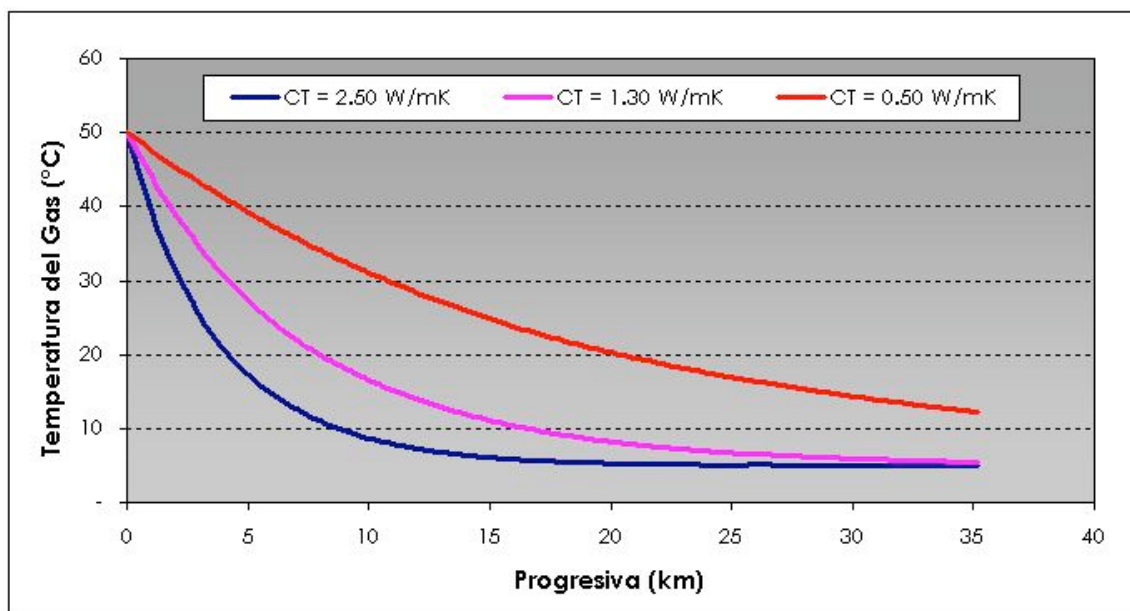
Al trabajar con este valor de conductividad térmica del terreno la velocidad a la cual la temperatura del gas alcanza la temperatura ambiente disminuye en comparación con los otros dos casos. Sin embargo, siguen generándose líquidos para temperaturas ambiente inferiores a 25°C.

Tabla 5.- Resultados obtenidos trabajando con un terreno cuya conductividad térmica es igual a 0.50 W/mK

Temperatura del ambiente	(°C)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
Temperatura de salida del calentador	(°C)	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	30.00	30.00
Presión de entrada al ducto	(kg/cm ² M)	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Temperatura de salida del ducto	(°C)	8.19	12.19	16.22	17.43	21.34	25.61	29.85
Presión de salida del ducto	(kg/cm ² M)	58.25	58.22	58.20	58.18	58.28	58.39	58.35
Caudal de líquidos formado	(m ³ /d)	17.99	12.57	7.49	6.04	1.44	0.00	0.00

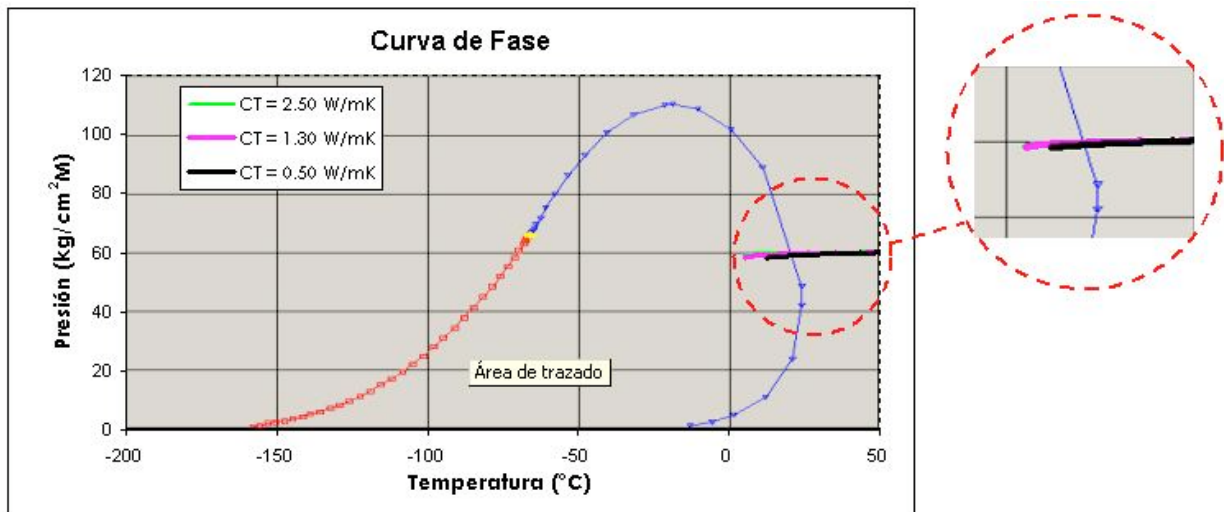
En el *Gráfico 3*, se representa la evolución del perfil de temperatura del gas en el interior del gasoducto para diferentes tipos de terreno, trabajando con un valor de temperatura ambiente igual a 5°C. Queda evidenciado que el tiempo para que el gas alcance la temperatura ambiente depende entre otras cosas del tipo de terreno. Es decir, a mayor conductividad térmica del terreno, menor es el tiempo para alcanzar la temperatura ambiente.

Gráfico 3.- Evolución del perfil de temperatura del gas en el interior del gasoducto para diferentes tipos de terreno. Temperatura ambiente = 5.0 °C.



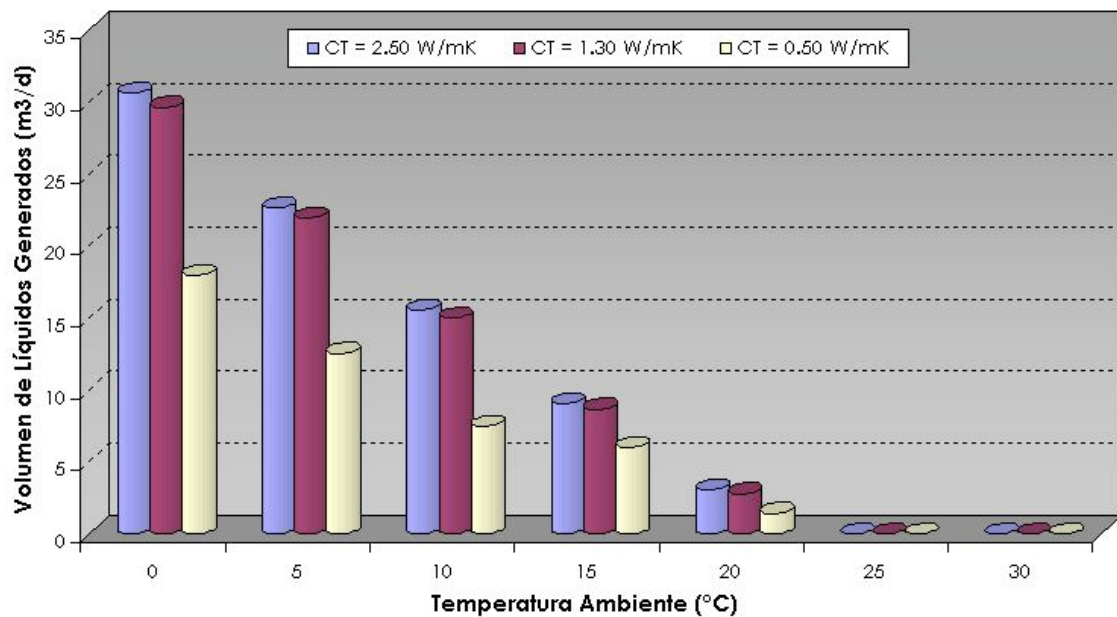
En el *Gráfico 4*, se presenta el diagrama de fases del gas analizado, en el cual se evidencia la existencia de líquidos al final del recorrido del gasoducto para cada tipo de terreno.

Gráfico 4.- Curva de operación del fluido dentro del ducto “Inyección Lateral Rica”, variando el tipo de terreno. Temperatura ambiente = 5.0 °C.



En el *Gráfico 5*, quedan evidenciados los volúmenes de líquidos obtenidos trabajando sobre diferentes tipos de terreno y temperaturas ambiente.

Gráfico 5.- Caudal de líquidos formados en el gasoducto para diferentes tipos de terreno y temperaturas ambiente.



Como conclusión podemos decir que, para determinar mediante la simulación la posible formación de líquidos en algún punto del gasoducto, es importante conocer el tipo de terreno que atraviesa el mismo, y las temperaturas ambiente imperantes en la zona.

3.3.- Metodología para la verificación de la condensación de líquidos en gasoductos

Para poder realizar una verificación de la condensación de líquidos en un gasoducto es necesario confeccionar un modelo de simulación que pueda representar este fenómeno. A continuación se describe la metodología adoptada:

1. Caracterizar el gasoducto en cuestión (perfil de altimetría, longitud, diámetros, espesores, etc),
2. Recopilar información propia del fluido que atravesará el ducto: *a) caudal, b) composición, c) presión y temperatura de entrada,*
3. Recopilar información de la temperatura ambiente
4. Verificar si el valor de conductividad térmica del terreno es conocida,
5. De lo contrario, con los datos recopilados en los puntos 1 a 3, ajustar (mediante la simulación), el valor de la conductividad térmica del terreno,
6. Una vez ajustado, verificar si para las condiciones dadas existe condensación de líquidos,
7. De ser así, analizar posibles soluciones para evitar dicho fenómeno. Una de las posibilidades podría ser colocar un calentador en la cabecera del mismo.

3.4.- Gasoducto “Troncal”

Este análisis se realizó a partir del Km. 25 del Gasoducto “Troncal”, donde se realiza la “Inyección Lateral Rica” y hasta el Km. 75 en donde se realiza la “Inyección Lateral Pobre”. Para el análisis se supuso una temperatura ambiente de 5°C, dado que este valor es favorable para una posible condensación de líquidos en el gasoducto “Troncal”.

Se analizó como variaba la curva de operación del fluido dentro del gasoducto “Troncal”, para distintos tipos de terreno. Por lo tanto las condiciones de entrada de la corriente “Inyección Lateral Rica”, serán las indicadas en las tablas del ítem 3.2.

La mezcla de las corrientes “Inyección Cabecera” e “Inyección Lateral Rica”, da un PRHC @ 5500 kPa que depende del tipo de terreno, es decir:

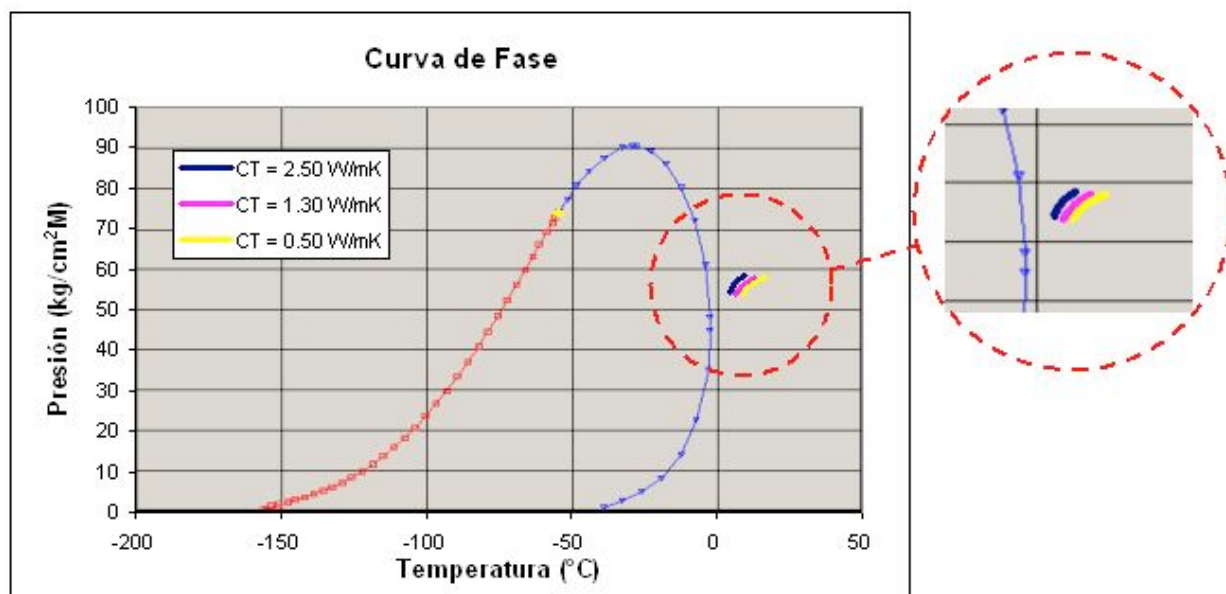
	CT = 2.50 W/mK	CT = 1.30 W/mK	CT = 0.50 W/mK
PRHC (@ 5500 KPa) – (°C)	-3.082	-3.025	-2.091

Estos valores son superiores al –4.00 °C exigido por la Resolución I-259/08. Con lo cual estas mezclas estarían fuera de especificación.

A partir del estudio realizado, se puede demostrar que a pesar de estar la mezcla fuera de especificación, e independientemente del terreno en el cual se haya instalado el gasoducto “Troncal”, no existe condensación de líquidos, debido a que la temperatura mínima que alcanza el fluido en cada punto del gasoducto, es superior al PRHC para las condiciones de presión en cada uno de dichos puntos.

En el *Gráfico 6* se representan las condiciones operativas del gasoducto desde el km. 25 (posterior al ingreso de la corriente “Inyección Lateral Rica”) y el km. 75 (previo al ingreso de la corriente “Inyección Lateral Pobre”), para diferentes tipos de terreno.

Gráfico 6.- Curva de operación del fluido dentro del ducto “Troncal”, variando el tipo de terreno.
Temperatura ambiente = 5.0 °C.



Si bien en este caso no habría problemas para inyectar gases con un alto PRHC en el gasoducto “Troncal”, debido a que quedo demostrado que independientemente del tipo de terreno que atravesase el caño y trabajando con temperaturas de terreno muy bajas, no existe presencia de líquidos a lo largo de todo el recorrido, a continuación se proponen posibles soluciones para evitar la condensación de líquidos en el interior del gasoducto.

3.5.- Soluciones para evitar la condensación de líquidos en algún punto del gasoducto

Como se puede apreciar, cuando se inyecta un cierto caudal de un gas rico al sistema de transporte, existe la posibilidad de condensación de líquidos debido a que la temperatura del fluido dentro del gasoducto puede estar próxima (para ciertas condiciones de temperatura de terreno y coeficientes de conductividad térmica), a su PRHC.

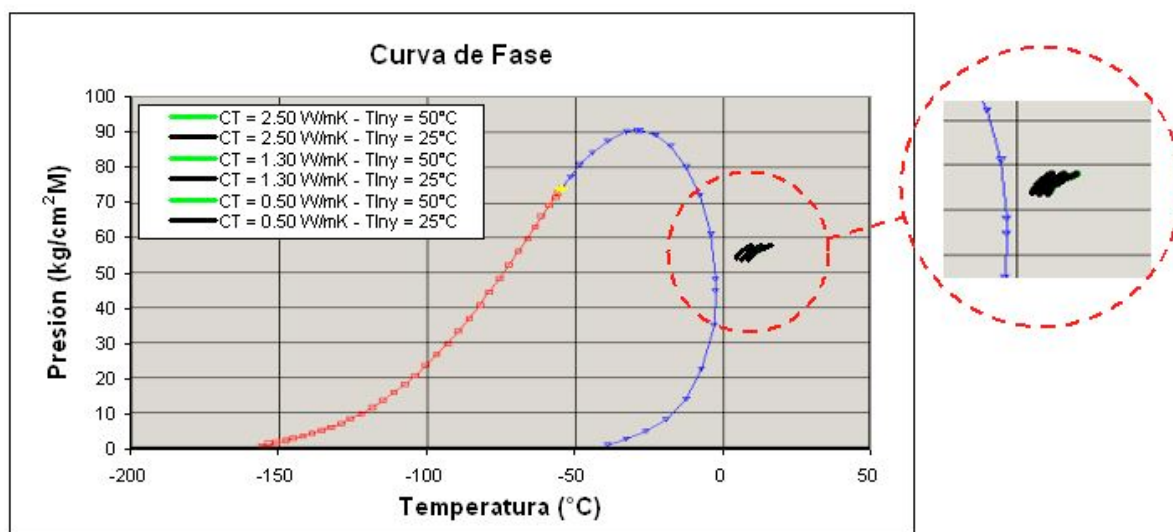
Para evitar esto, se pueden adoptar dos formas de trabajo:

1. Aumentando la temperatura del gas rico antes de ser inyectado en el gasoducto troncal (máximo 50°C). Esto se logra: **a)** *aumentando la temperatura de salida del calentador en la cabecera del mismo, o b)* *en caso de no requerir de un calentador en la cabecera del ducto, colocar uno a la salida del mismo.*

En el Gráfico 7, se representan las diferentes curvas de operación del fluido dentro del gasoducto “Troncal”, para diferentes temperaturas de entrada de la corriente gaseosa rica. Los valores de temperatura indicados se deben fundamentalmente a la utilización o no de un calentador en la cabecera del ducto de 35.20 km.

Debido a que el caudal de la corriente rica es muy bajo (1.000.000 Sm³/d), en comparación con la corriente de cabecera (10.000.000 Sm³/d), es evidente que con este tipo de solución no se alcanzará un aumento significativo de la temperatura de la mezcla en el interior del caño. Con lo cual esta forma de trabajo no parece ser la más apropiada al trabajar con caudales en las proporciones indicadas.

Gráfico 7.- Curvas de operación del fluido dentro del gasoducto “Troncal”, variando el tipo de terreno, la temperatura de inyección del fluido con alto PRHC Temperatura ambiente = 5.0 °C.

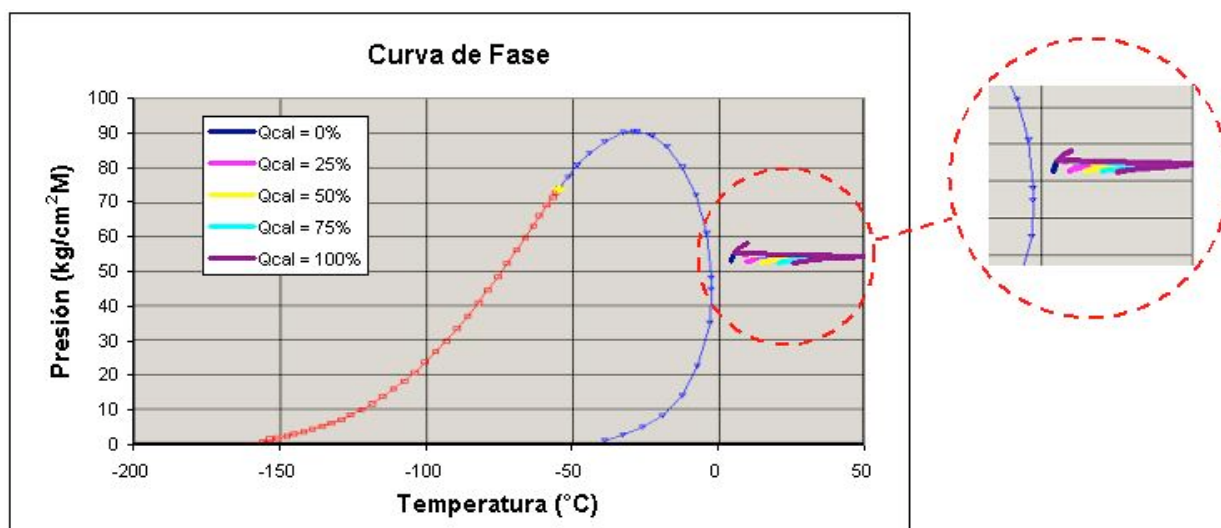


2. Extrayendo total o parcialmente el caudal de la mezcla resultante “Inyección Cabecera” e “Inyección Lateral Rica”, en algún punto del recorrido del ducto. Calentar nuevamente la mezcla (hasta una temperatura máxima de 50°C) y re-inyectarla al troncal.

En el Gráfico 8, se representan las diferentes curvas de operación del fluido dentro del gasoducto “Troncal”, para diferentes porcentajes de caudal procesados en el calentador intermedio, trabajando con un terreno de conductividad térmica igual a 2.50 W/mK.

Esta forma de trabajo, en comparación con la presentada en el ítem 1 (del punto 3.5), deja una clara evidencia de que colocando un calentador en algún punto intermedio del recorrido se favorece en mayor medida el alejamiento del fluido de su condición de punto de rocío.

Gráfico 8.- Curvas de operación del fluido dentro del ducto “Troncal”, variando el caudal a procesar en el calentador intermedio. Terreno de conductividad térmica igual a 2.50 W/mK. Temperatura ambiente = 5.0 °C



4.- CONCLUSIONES

1. Podemos afirmar que es posible la inyección de gases con alto PRHC (mayor a $-4.00\text{ }^{\circ}\text{C}$) al sistema de transporte, siempre y cuando se tengan bien controlados ciertos parámetros de importancia, a saber: *a) Temperatura ambiente / terreno, b) Conductividad térmica del terreno,*
2. Para verificar la condensación de líquidos en los gasoductos es necesario tener valores confiables de:
 - ☐ *Temperatura ambiente / terreno*
Estos valores pueden obtenerse monitoreándose periódicamente la temperatura del ambiente y del terreno en distintos puntos del recorrido del ducto. Esto puede realizarse en forma manual, con personal midiendo in situ dichos valores ó colocando sensores de temperatura en puntos preestablecidos pudiendo los mismos ser relevados on line.
 - ☐ *Conductividad térmica del terreno*
Se puede proceder de dos maneras: *i) conociendo las características del terreno es posible conocer su conductividad térmica o ii) una vez recopilados los datos de temperatura ambiente y del terreno, ajustar (mediante la simulación), el correspondiente valor de la conductividad térmica.*
Estos tres parámetros son fundamentales para confeccionar el modelo de simulación que pueda representar la operación diaria del gasoducto.
3. El control periódico de los parámetros indicados anteriormente junto con la verificación de las condiciones para las cuales podría existir presencia de líquidos en algún punto del recorrido del gasoducto, permite dar una idea de la ubicación y la estación del año en los cuales conviene inyectar un determinado gas “RICO”.
4. Para evitar la condensación de líquidos en los gasoductos puede optarse por dos formas de trabajo:
 - ☐ Aumentando la temperatura del gas antes de ser inyectado en el gasoducto troncal (máximo 50°C).
 - ☐ Extrayendo total o parcialmente el caudal que atraviesa el gasoducto, en algún punto del recorrido del mismo. Recalentarlo y volverlo a inyectar.
5. El análisis presentado en este informe se realizó para el caso de un tramo de gasoducto hipotético sin puntos de entrega en su recorrido. En el caso que los hubiera, sería necesario analizar la posibilidad de condensación en dichos puntos.

5.- CURRICULUM VITAE DE LOS AUTORES

AUTOR: Dulce Gómez Penzo

Título Académico:

- ☐ Ingeniera Química. Universidad Nacional del Sur (UNS) – Bahía Blanca - (2002).

Experiencia Laboral:

- ☐ De Julio de 2005 a la Fecha.
Transportadora de Gas del Sur S.A
Gerencia: Desarrollos Técnicos.
Dirección: Operaciones.
- ☐ De Marzo 2002 a Julio de 2005.
Solvay Indupa, Bahía Blanca.
Dirección: Ingeniería Área de Procesos.

AUTOR: Rodrigo A. de la Fuente

Título Académico:

- ☐ Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería. Universidad Buenos Aires (UBA) - (2005).

Experiencia Laboral:

- ☐ Del 1 de Agosto de 2006 a la Fecha.
Transportadora de Gas del Sur S.A
Gerencia: Desarrollos Técnicos.
Dirección: Operaciones.
- ☐ Del 9 de Mayo de 2005 al 30 de Julio de 2006.
Carboclor S.A.
Gerencia: Producción de Solventes Oxigenados y Mejoradores Octánicos.
Dirección: Operaciones.