

¿CÓMO Y CON QUÉ CALENTAR LAS LÍNEAS DE ASFALTO?

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y VARIABLES DE DECISIÓN

Paula Agustina Todesca, Juan Sebastián Villar Bru, Carolina Rafaela Rodriguez, Lucas Gabriel

Reboredo

TECNA Tecnología, Ingeniería y Construcción S.A.

ptodesca@tecna.com, jvillarbru@tecna.com, carrodriguez@tecna.com, lreboredo@tecna.com

Sinopsis

Dentro del proceso de refinación de crudo se encuentran las plantas de producción de asfaltos. Estas plantas reciben principalmente como materia prima el residuo correspondiente a la destilación al vacío (residuo de vacío).

Tanto esta materia prima como los productos son altamente viscosos por lo que presentan ciertas limitaciones en cuanto a la temperatura mínima y máxima de almacenamiento, despacho y/o circulación. Se tiene un límite inferior de temperatura asociado a la mínima temperatura requerida para el movimiento y un límite superior de temperatura con el fin de evitar la degradación de los productos y a la vez permitir su manejo en forma segura.

Con el fin de mantener la temperatura operativa dentro de los límites antes citados, las líneas y tanques de asfalto se encuentran aislados reduciéndose así la pérdida de calor hacia el ambiente. Cuando el fluido se encuentra circulando, la presencia de aislación es usualmente suficiente para conservar la temperatura operativa en valores aceptables.

Sin embargo, considerando que las operaciones realizadas en este tipo de plantas son generalmente del tipo batch (preparación de distintos productos-almacenamiento-despacho), gran número de líneas se mantienen bloqueadas quedando fluido estanco en un tramo de cañería. Esto último hace que se requiera del calentamiento de las líneas con el fin de compensar las pérdidas de calor hacia el exterior.

Existen distintas alternativas para el calentamiento de líneas: acompañamiento con aceite térmico, acompañamiento con vapor o tracing eléctrico.

La selección de la alternativa de calentamiento adecuada es función de múltiples variables como lo son la temperatura requerida, la disponibilidad de servicios auxiliares, el layout de las instalaciones y las ventajas y desventajas propias de cada una de las alternativas antes mencionadas.

En el presente trabajo se analizan técnicamente cada una de las alternativas antes mencionadas, exponiendo principalmente ventajas, desventajas, variables de decisión y limitaciones técnicas y/o de proceso a tener en cuenta para una adecuada selección del método de calentamiento a utilizar.

1 Introducción

En el presente trabajo técnico se analiza la necesidad de calentar las líneas, las posibles alternativas de calentamiento de las mismas y las variables a considerar para decidir la tecnología a adoptar.

El asfalto es uno de los productos obtenidos en el proceso de refinación del petróleo. Las materias primas para la producción de asfaltos se obtienen mayormente en la destilación al vacío y en el proceso de desasfaltado con propano (PDA – Propane Desasphalting). Las características del mismo quedan determinadas por factores tales como la naturaleza del crudo (parafínico o aromático) así como también la proporción de asfaltenos y resinas presentes.

Dentro de la familia de los asfaltos existen distintos tipos de productos tales como: asfaltos viales, cementos asfálticos modificados, asfaltos industriales, entre otros. En el presente trabajo técnico se toman como caso de estudio los asfaltos viales pero cabe destacar que las conclusiones obtenidas son básicamente las mismas para los cementos asfálticos modificados y asfaltos industriales.

Los asfaltos viales son sólidos a temperatura ambiente y son usados principalmente para la construcción de carreteras, impermeabilización de edificaciones, y como materiales de ingeniería civil. Para el desarrollo de este trabajo técnico se utiliza la clasificación de los asfaltos por viscosidad según la Norma IRAM 6835 “Asfaltos para uso vial. Clasificados por viscosidad – Requisitos”.

Características	Unidad	Clase de asfalto										Método de ensayo
		CA-5		CA-10		CA-20		CA-30		CA-40		
		mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	
Viscosidad a 60°C	dPa s (Pa s)	400 (40)	800 (80)	800 (80)	160 (160)	1600 (160)	2400 (240)	2400 (240)	3600 (360)	3600 (360)	4800 (480)	IRAM 6836 / IRAM 6837

Tabla 1. Clasificación de asfaltos viales de acuerdo con la viscosidad a 60°C
– Norma IRAM 6835.

2 Desarrollo

2.1 Consideraciones de partida

Existen básicamente dos razones por las cuales el calentamiento de las líneas de asfaltos es un requisito imprescindible a tener en cuenta en el proceso de producción:

- Límites de temperatura inferior y superior de operación del asfalto.
- Proceso de producción tipo batch, lo que produce la permanencia de fluido estanco en el interior de cañerías bloqueadas.

A continuación se desarrollan los puntos mencionados anteriormente.

2.1.1 Límite inferior y superior de temperatura de operación

Debido a características propias de los asfaltos existen limitaciones en cuanto a la temperatura mínima y máxima de almacenamiento, despacho y circulación.

Se tiene un valor mínimo asociado a la mínima temperatura de movimiento dado que se trata de un fluido altamente viscoso. En la industria, el límite inferior de temperatura para los asfaltos viales se fija generalmente alrededor de los 140°C y resulta de un análisis de los costos de bombeo.

En general, la viscosidad es fuertemente dependiente de la temperatura y, para la mayoría de los materiales, la misma disminuye exponencialmente en función de la temperatura. Tal es el caso de los asfaltos a alta temperatura.

Para mantener costos de bombeo razonables se determina la máxima viscosidad del fluido a bombear, fijando de este modo la mínima temperatura de operación.

A continuación se presentan curvas de viscosidad para distintos asfaltos viales. Dichas curvas se calculan a partir del método descrito en el norma ASTM D2493 “Standard Viscosity - Temperature Chart for Asphalts”.

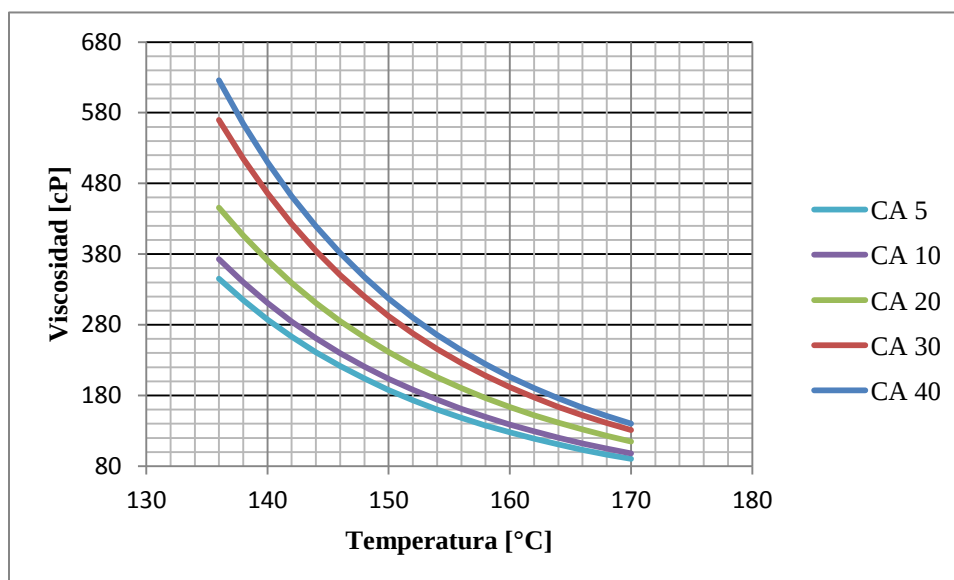


Figura 1. Perfil de viscosidades vs temperatura de diversos cementos asfálticos.

El límite superior se fija a fin de evitar la degradación térmica y para permitir el manejo en forma segura manteniendo un margen por debajo de la temperatura de flash point.

Al alcanzar cierto valor de temperatura se comienza a producir la degradación térmica del asfalto y la misma trae como consecuencia pérdida de masa en forma de compuestos volátiles. Según análisis termogravimétricos de descomposición, se encuentra que la temperatura máxima antes del proceso de la degradación térmica es aproximadamente 180°C. Este valor varía levemente según el contenido de asfaltenos de cada muestra.

Por otra parte, cabe destacar que la norma API RP 2023 “Guide for safe storage and handling of heated petroleum-derived asphalt products and crude-oil residua” recomienda tomar un margen de 28°C sobre el open cup Flash Point (punto de inflamación vaso abierto). Para los asfaltos considerados, el punto de inflamación se encuentra alrededor de los 230°C. Si se considera dicha recomendación, la máxima temperatura de operación es 202°C la cual resulta superior a la temperatura por degradación térmica.

Los límites de temperatura se resumen en la **Tabla 2**:

Límite	Temperatura [°C]	Causa
Inferior	140	Movimiento del fluido
Superior	180	Degradación Térmica
	202	Flash Point

Tabla 2. Límites superior e inferior de temperatura.

2.1.2 Proceso productivo batch

La alimentación, obtenida de la destilación al vacío y del proceso de desasfaltado con propano, ingresa a la planta productora y se dirige en primer lugar a los tanques de almacenamiento de materia prima, los cuales se encuentran calefaccionados mediante serpentines. Dado que los productos obtenidos deben cumplir con ciertos requisitos (viscosidad, índice de penetración, índice de durabilidad, entre otros) se miden en primer lugar las propiedades de las materias primas y se elabora una receta acorde a estos valores y a la disponibilidad de las mismas. Luego, siguiendo la receta, los productos se bombean a un tanque de preparación en el cual se realiza el mezclado (blending) hasta lograr las características y propiedades requeridas. Finalmente, se despacha el producto terminado mediante la carga de camiones o tambores.

Con el fin de mantener la temperatura operativa, las líneas y tanques se encuentran aislados a fin de reducir las pérdidas con el ambiente.

Considerando que las operaciones realizadas en este tipo de plantas son generalmente de tipo batch (preparación de distintos productos – almacenamiento – despacho), las líneas que conectan las entradas con los tanques como así también aquellas que conectan los tanques con las bombas de despacho pueden permanecer bloqueadas con fluido estanco en su interior.

La cañería, con fluido estanco en su interior, cede calor al ambiente. De esta manera, eventualmente la temperatura cae por debajo de la temperatura límite previamente definida.

El tiempo que la línea queda bloqueada depende en gran medida de la demanda de producto y del tiempo de llegada de los camiones para despacho.

A continuación se calcula el tiempo transcurrido hasta alcanzar el límite inferior de temperatura (140°C). Este cálculo ayuda a visualizar un orden de magnitud con el fin de comparar el tiempo de enfriamiento y el tiempo real de línea bloqueada.

El cálculo se realiza a partir de las siguientes condiciones y ecuaciones:

Variable	Valor	Comentarios
Tipo de Asfalto CA-5	-	Se consideran las propiedades del asfalto vial CA-5 (densidad, viscosidad, capacidad calorífica, conductividad, coeficiente de expansión térmica)
Temperatura del asfalto	160°C	Se considera una temperatura intermedia entre los límites máximo (180°C) y mínimo (140°C)
Diámetro Cañería	8 in Sch 40	D _o (diámetro externo) = 219,1 mm. D _i (diámetro interno) = 202,7 mm.
Espesor y conductividad de la aislación	60 mm / 0,065 W/m.K	Se considera la utilización de lana de vidrio
Condiciones ambientales (temperatura y velocidad del viento)	0°C y 3,2 m/s	Se consideran condiciones límite (condiciones de invierno)

Tabla 3. Consideraciones para el cálculo.

$$q = U_o A_o (T_{\text{asf}(n)} - T_{\text{amb}}) \quad (1)$$

$$q = \frac{M}{\Delta t} C_p (T_{\text{asf}(n)} - T_{\text{asf}(n+1)}) \quad (2)$$

Donde:

q = tasa de transferencia de calor por unidad de longitud;

U_o = coeficiente global de transferencia de calor de la línea hacia el ambiente

(basado en el área A_o);

A_o = área de transferencia de calor por unidad de longitud;

$T_{\text{asf}(n)}$ = temperatura del asfalto en el tiempo n . Para $n=0$, $T_{\text{asf}(n=0)}=160^\circ\text{C}$;

T_{amb} = temperatura ambiente;

M = masa contenida en la línea por unidad de longitud;

C_p = capacidad calorífica del asfalto;

Δt = intervalo de tiempo discreto.

El área de transferencia de calor por unidad de longitud está dada por:

$$A_o = \pi D_{ot} \quad (3)$$

Donde:

D_{ot} = es el diámetro externo de la línea incluyendo el espesor de aislación.

El coeficiente global de transferencia se obtiene de la siguiente relación:

$$\frac{1}{U_o D_{ot}} = R_{film} + R_{aislación} + R_{externa} \quad (4)$$

Donde:

R_{film} = resistencia a la transferencia de calor debido a la capa de fluido adyacente a la superficie interior de la pared de la cañería;

$R_{aislación}$ = resistencia a la transferencia de calor debido a la existencia de aislación en la cañería;

$R_{externa}$ = resistencia a la transferencia de calor debido a los alrededores de la cañería.

Las resistencias debido a ensuciamiento y a las paredes de cañería no se consideran en el cálculo dado que frente a las restantes resistencias son desestimables.

La resistencia R_{film} se calcula según la siguiente expresión:

$$R_{film} = \frac{1}{h_{icn} D_i} \quad (5)$$

Donde:

h_{icn} = coeficiente de convección natural para un fluido en el interior de un cilindro horizontal.

Se utiliza la ecuación de Evans y Stefany:

$$\frac{h_{icn} D_i}{k} = 0,53 (Gr Pr)^{1/4} \quad (6)$$

Donde:

Pr = número de Prandtl;

Gr = número de Grashof;

k = conductividad del asfalto.

Cabe destacar que para los rangos de temperatura considerados es admisible considerar la existencia de convección natural en el asfalto. Para temperaturas inferiores este fenómeno se ve afectado por el aumento de la viscosidad.

El cálculo del coeficiente de convección natural es iterativo dado que el adimensional Gr depende de la temperatura en la pared de la cañería la cual no es conocida. Además, el coeficiente varía según el asfalto se enfría dado que las propiedades son función de la temperatura.

La resistencia $R_{\text{aislación}}$ se calcula según la siguiente expresión:

$$R_{\text{aislación}} = \frac{1}{2k_a} \ln \left[1 + \frac{2t_a}{D_{ai}} \right] = 3,36 \frac{\text{mK}}{\text{W}} \quad (7)$$

Donde:

k_a = conductividad térmica de la aislación;

t_a = espesor de aislación;

D_{ai} = diámetro interno de la aislación.

Por último, la resistencia R_{externa} para el caso de cañerías aéreas se calcula según la ecuación de Hilpert:

$$R_{\text{externa}} = \frac{1}{k_{\text{aire}} C_1 \text{Re}_{\text{aire}}^n} = 0,19 \frac{\text{mK}}{\text{W}} \quad (8)$$

Donde:

$$\text{Re}_{\text{aire}} = \frac{D_{ot} V_{\text{aire}} \rho_{\text{aire}}}{\mu_{\text{aire}}} ;$$

k_{aire} = conductividad térmica del aire (0,0237 W/mK);

V_{aire} = velocidad del aire;

ρ_{aire} = densidad del aire (1,29 kg/m³);

μ_{aire} = viscosidad del aire (0,017 cP);

C_1 y n = parámetros que dependen de Re_{aire} .

Para las condiciones analizadas $\text{Re}_{\text{aire}} \approx 80.000$:

Re_{aire}	C_1	n
40.000 – 250.000	0,0239	0,805

El procedimiento de cálculo se ejemplifica a partir del siguiente diagrama:

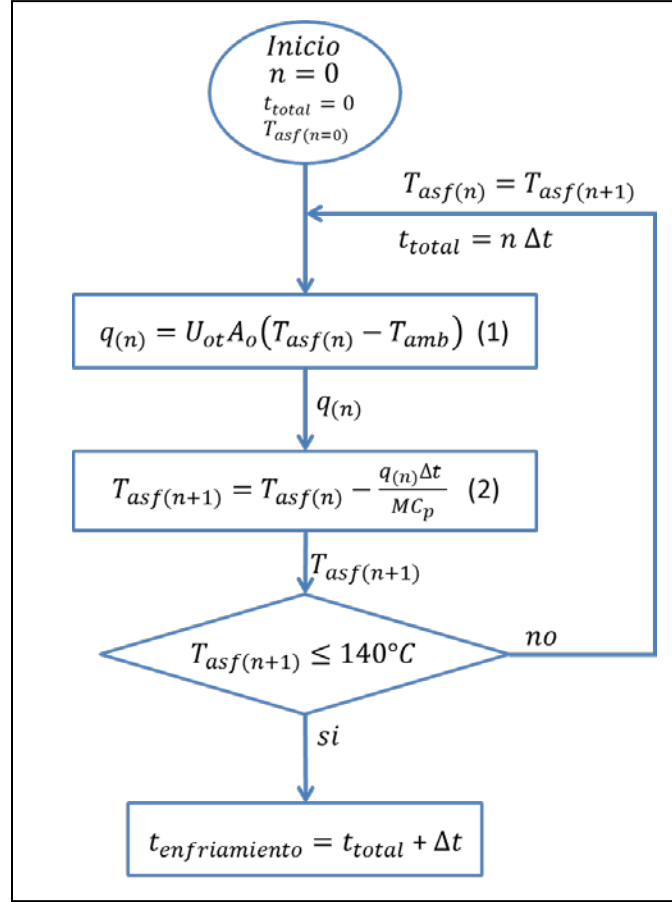


Figura 2. Procedimiento de cálculo del tiempo de enfriamiento.

Finalmente, luego de efectuar el procedimiento se obtiene que el tiempo transcurrido ($t_{\text{enfriamiento}}$) para que el asfalto se enfríe desde 160°C hasta 140°C es de aproximadamente 3 hs.

Este valor resulta ser pequeño teniendo en cuenta que en operación normal las líneas de la planta podrían permanecer estancas durante períodos de tiempo mucho mayores. Estos tiempos que pueden depender de la demanda de un producto determinado, el tiempo de llegada de los camiones, entre otros, pueden ser alrededor de días. Por lo tanto, el tiempo de enfriamiento encontrado justifica la necesidad del traceado de las cañerías con el fin de compensar las pérdidas hacia el exterior.

Sin embargo, cabe destacar que mientras exista circulación de fluido por las líneas, la aislación es suficiente para conservar la temperatura en valores aceptables.

Para validar esta afirmación se calcula la temperatura al final de un tramo de 100 m de longitud. Esta longitud es representativa de las distancias dentro de una planta productora de asfaltos.

Para realizar el cálculo se asumen las consideraciones de la **Tabla 3** y un caudal de circulación de 90 m³/h, para el cual el régimen de circulación resulta ser laminar ($Re \approx 1100$).

En líneas generales, el cálculo de transferencia de calor se basa en las siguientes ecuaciones:

$$Q = U_o A_o \frac{(T_{asf\ 2} - T_{amb}) - (T_{asf\ 1} - T_{amb})}{\ln \frac{(T_{asf\ 2} - T_{amb})}{(T_{asf\ 1} - T_{amb})}} \quad (9)$$

$$Q = \dot{m} C_p (T_{asf\ 1} - T_{asf\ 2}) \quad (10)$$

Donde:

Q = tasa de transferencia de calor;

$T_{asf\ 1}$ = temperatura de entrada del asfalto a la cañería;

$T_{asf\ 2}$ = temperatura de salida del asfalto de la cañería;

$\dot{m}$ = caudal másico.

Para un largo particular de cañería L, el área de transferencia está dada por:

$$A_o = \pi D_{ot} L \quad (11)$$

El coeficiente global de transferencia (U_o) se obtiene de la ecuación (4).

En este caso, la resistencia R_{film} se calcula según la siguiente expresión:

$$R_{film} = \frac{1}{h_{icf} D_i} \quad (12)$$

Donde:

h_{icf} = coeficiente de convección forzada entre el fluido circulante y la pared interior de la cañería.

Para este caso particular, donde el régimen de flujo es laminar ($Re < 2100$), se utiliza la ecuación de Sieder y Tate corregida por Kern y Othmer:

$$\frac{h_{icf} D_i}{k} = 1,86 \left(Re \ Pr \frac{D_i}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-1/4} \frac{2,25 \left(1 + 0,01 \ Gr^{1/3} \right)}{\log(Re)} \quad (13)$$

Donde:

μ = viscosidad del asfalto;

μ_w = viscosidad del asfalto evaluada a la temperatura de la pared.

Entonces, considerando que la temperatura del asfalto dentro de la línea aislada es aproximadamente constante en una longitud de 100 m, R_{film} resulta ser:

$$R_{\text{film}} = 0,25 \frac{\text{mK}}{\text{W}}$$

Las restantes resistencias no presentan cambios y se calculan a partir de las ecuaciones (7) y (8).

El coeficiente global de transferencia resulta ser:

$$U_o = 0,77 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Finalmente, de las ecuaciones (9), (10) y (11) se obtiene la temperatura del fluido al final del tramo de 100m.

$$T_{\text{asf } 2} = T_{\text{amb}} + (T_{\text{asf } 1} - T_{\text{amb}}) e^{-\frac{U_o A_o}{\dot{m} C_p}}$$

$$T_{\text{asf } 2} = 159,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tal como se puede observar en los resultados obtenidos, mientras haya circulación de asfalto por la línea, la caída de temperatura es del orden de los 0,3°C/100m. Es por esto que se puede afirmar que la presencia de aislación es suficiente para mantener la temperatura dentro de valores aceptables.

2.2 Métodos de calentamiento de líneas y cálculos requeridos

De lo anteriormente descrito se concluye que al quedar una línea bloqueada con asfalto en su interior durante cortos períodos de tiempo (alrededor de 3 hs), la temperatura cae por debajo del límite inferior (140°C) provocando inconvenientes a la hora de bombear. En caso de permanecer bloqueada durante períodos de tiempo mayores el asfalto puede solidificar tapando el paso del fluido.

Las posibles soluciones a este problema son:

- Drenar las líneas luego de ser usadas. Esta técnica no resulta práctica dado que conduciría a altas cargas de trabajo y pérdidas de tiempo ya que las líneas son utilizadas con frecuencia.
- Mantener las líneas con asfalto fluyendo continuamente recirculando desde los tanques calefaccionados. Esta técnica implica la utilización en forma continua de bombas dedicadas a esta tarea. Esto resulta impracticable dado que normalmente existen grupos de tanques que comparten posiciones de bombeo, con lo cual mientras se despacha alguno de los productos contenido en un tanque o se realiza la preparación de alguna de las recetas, el fluido contenido en las líneas que no participan de la tarea no podrían encontrarse en movimiento. Además, no es recomendable ya que una eventual falla de la bomba o parada por mantenimiento puede conducir al enfriamiento del asfalto y consecuente atasco de la línea.
- Mantener la temperatura del asfalto mediante el calor aportado por una fuente externa. A esta técnica se la llama traceado y es la solución recomendable en este tipo de plantas.

En esta sección se describen los posibles medios calefactores para llevar a cabo el traceado de las líneas.

Básicamente, el calefaccionar las líneas de asfalto implica suplir el calor perdido al ambiente mediante un medio calefactor tal como se muestra en la **Figura 3**.

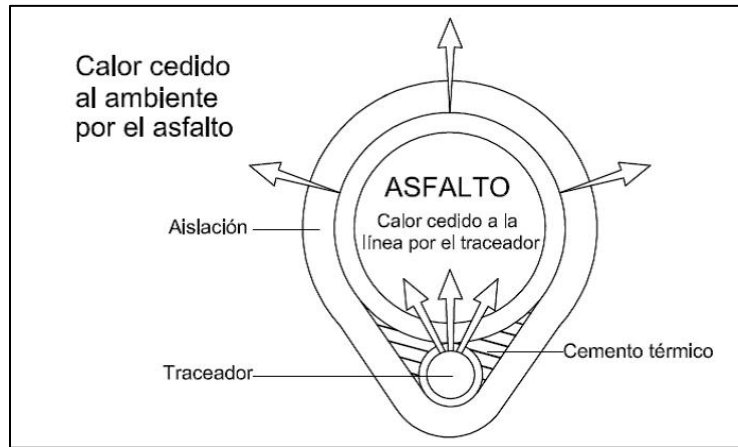


Figura 3. Calor perdido y ganado por la línea.

Los posibles medios calefactores son:

- Vapor
- Aceite Térmico
- Traceado eléctrico

Llamaremos traceador al medio calefactor que acompaña longitudinalmente a la cañería principal, ya sea a través de tubing (casos de vapor y aceite térmico) o de cable (caso de traceado eléctrico).

En general, para líneas horizontales los traceadores se ubican en la parte baja de la cañería dado que de esta forma favorecen la convección natural del asfalto. No obstante, muchas veces, su ubicación está limitada por el espacio disponible y facilidad de acceso a los mismos, razón por cual no se considera taxativa esta recomendación.

Los traceadores, ya sean cables o tubing, se unen a la cañería principal mediante bandas de acero o alambres. A este método de unión se lo denomina “bare tracer”.

En el caso de utilizar tubing, existe un método mejorado de montaje con la utilización adicional de cemento térmico. El mismo consiste en la unión del tubing a la pared del caño principal mediante un cemento que posee una alta conductividad térmica y que aumenta la superficie de contacto entre el traceador y la línea a calefaccionar. De esta manera se mejora entre 6 y 7 veces el coeficiente de intercambio comparado con el bare tracing y, en consecuencia, disminuye el número de traceadores a instalar por línea. Además, el cemento mejora el contacto en la superficie entre el traceador y la línea incluso en los codos. Este método es usado en aquellos procesos en los que se requieren altas potencias de calentamiento, tal como el analizado en el presente estudio. Es por esta razón que para los cálculos se supone la unión de traceadores mediante cemento térmico.

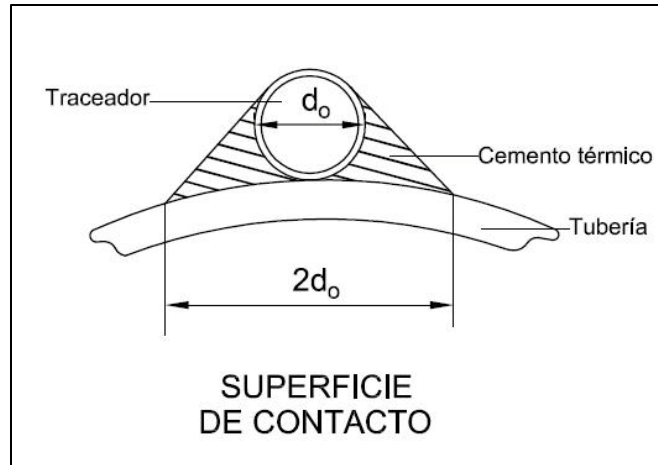


Figura 4. Instalación del traceador con cemento térmico.

El número de traceadores a instalar en paralelo por longitud traceada depende del diámetro de la línea a tracear, la temperatura de mantenimiento requerida por el proceso, las condiciones climáticas y la eficacia del aislamiento. En un principio se asume para el cálculo un número de traceadores en paralelo; según los resultados obtenidos, este número puede ajustarse.

El requerimiento de vapor, aceite térmico o potencia eléctrica se obtiene igualando el calor perdido hacia al ambiente y el calor aportado por el medio calefactor.

Si se desea mantener un valor de temperatura constante a lo largo de toda la longitud traceada se debe utilizar traceado con vapor saturado o traceado eléctrico, dado que dentro de ciertos límites de longitud, se puede considerar que los mismos proporcionan calor constante.

A diferencia del vapor, que entrega calor latente, el aceite térmico transmite calor sensible. Por esta razón, a lo largo del traceador la temperatura del aceite térmico disminuye y, como consecuencia, la temperatura de mantenimiento del asfalto también varía.

A continuación se muestran los cálculos necesarios para el diseño de los sistemas de calentamiento para las distintas alternativas de traceado.

2.2.1 Vapor

En general, el traceado con vapor se realiza a través de tubing de $\frac{1}{2}$ in. Por los mismos circula vapor saturado, el cual condensa a temperatura constante a medida que entrega calor a la cañería principal.

Las ecuaciones de cálculo se presentan a continuación:

$$q = U_o A_o (T_{asf} - T_{amb}) \quad (14)$$

$$q = HTCA_{int} (T_{asf} - T_{med-cal}) \quad (15)$$

La ecuación (14) expresa el calor perdido hacia el ambiente por la línea y la ecuación (15) expresa el calor cedido por el traceador a la línea.

Donde:

T_{asf} = temperatura de mantenimiento del asfalto deseada;

$T_{\text{med-cal}}$ = temperatura del medio calefactor, en este caso vapor, por lo cual se llama, a partir de ahora, T_{vap} ;

HTC = coeficiente global de transferencia de calor del traceador hacia la línea (basado en A_{int});

A_{int} = área de transferencia del traceador por unidad de longitud.

La temperatura de mantenimiento (T_{asf}) se desea fijar en 160°C (valor intermedio entre límites máximo y mínimo).

El coeficiente global de transferencia de la línea (U_o) se obtiene de la ecuación (4) y cada una de las resistencias involucradas se obtienen de las ecuaciones (5), (7) y (8).

El área de transferencia del traceador por unidad de longitud está dada por:

$$A_{\text{int}} = \pi d_o N \quad (16)$$

Donde:

d_o = diámetro externo del tubing;

N = número de traceadores a instalar en paralelo.

El coeficiente global de transferencia del traceador se obtiene de la siguiente relación:

$$\frac{1}{\text{HTC } d_o} = R_{\text{film med-cal}} + R_{\text{cemento térmico}} + R_{\text{film asfalto}} \quad (17)$$

Donde:

$R_{\text{cemento térmico}}$ = resistencia a la transferencia de calor debido al cemento térmico.

La resistencia $R_{\text{film med-cal}}$ se calcula según la siguiente expresión:

$$R_{\text{film vapor}} = \frac{1}{h_{\text{ivap}} d_i} \quad (18)$$

Donde:

h_{ivap} = coeficiente de condensación del vapor. El mismo se asume en un valor de 8500 W/m²K;

d_i = es el diámetro interno del traceador.

La resistencia $R_{\text{film asfalto}}$ se calcula a partir de las ecuaciones (5) y (6).

La resistencia $R_{\text{cemento térmico}}$ se calcula según la siguiente expresión:

$$R_{\text{cemento térmico}} = \frac{\pi}{h_c 2 d_o N} \quad (19)$$

Donde:

h_c = coeficiente de transferencia del cemento térmico. Este valor, según lo informado

por los proveedores, varía entre 114 y 227 W/m.K. Se considera un valor promedio igual

a 170 W/m.K.

Entonces, se supone inicialmente una cantidad de traceadores por línea, y a partir de las ecuaciones (14) y (15), se obtiene la temperatura del vapor (T_{vap}) necesaria. Dado que el vapor se encuentra saturado, para mejorar la transferencia, se determina la presión de vapor necesaria. En caso que la misma sea demasiado elevada se supone una cantidad mayor de traceadores y se recalcula. El cálculo del consumo de vapor se determina según la siguiente ecuación:

$$q = \dot{m}_{\text{vap}} \lambda \quad (20)$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{vap}}$ = flujo másico de vapor por unidad de longitud;

λ = calor de condensación del vapor.

2.2.2 Resistencia eléctrica

El método de traceado mediante resistencia eléctrica consiste en la disipación de la energía eléctrica en forma de calor en la resistencia propia del cable. Existen distintas variantes, ya sean sistemas con circuitos de resistencias en paralelo o circuitos de resistencias en serie. Ambos tienen sus ventajas y limitaciones. Se describen a continuación los sistemas más utilizados disponibles en el mercado:

- **Calentadores auto-reguladores:** se trata de dos cables alojados dentro de un núcleo de polímero conductor que sirve como calefactor.

El principio de funcionamiento consiste en que el polímero conductor varía su resistencia en función de la temperatura. Al aumentar la temperatura, su resistencia aumenta. El efecto es una disminución de la potencia entregada para un incremento de temperatura dado.

Este método de calentamiento tiene como ventaja la eliminación de la posibilidad de rotura del calentador debido a la imposibilidad de disipar el calor generado internamente ya que por su principio de funcionamiento está limitado. Además, estos sistemas pueden ser cortados y terminados a medida durante su aplicación en campo. Es decir, no dependen de la longitud a tracear. Como desventaja, tienen un rango de temperatura de operación limitado (hasta 186°C) y es por esta razón que en general su aplicación no es apta para asfalto.

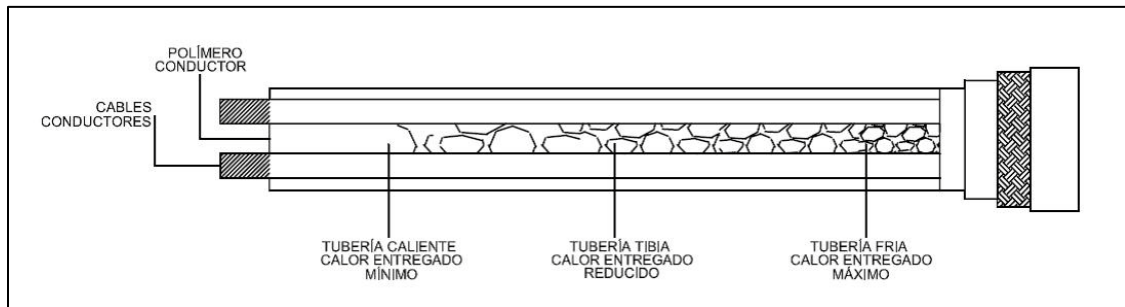


Figura 5. Calentadores auto-reguladores.

La potencia requerida por unidad de longitud se obtiene de la ecuación (14). En función de este dato y de la tensión disponible, se define el cable calefactor requerido mediante el uso de catálogos de los proveedores.

- **Cable Calefactor Paralelo:** se trata de dos conductores paralelos aislados sobre los cuales se enrolla el cable calefactor. Dicho cable hace contacto con los conductores a distancias predeterminadas conformando un circuito en paralelo.

Desestimando la caída de tensión en los conductores paralelos, la tensión aplicada en cada resistencia es constante.

Como ventaja, estos sistemas pueden ser cortados y terminados a medida durante su aplicación. Además, al tratarse de resistencias en paralelo, ante la falla individual de un elemento calefactor el sistema queda protegido. El rango de temperatura de operación es superior a los sistemas auto-regulados, pudiendo alcanzar los 500°C. Como desventaja principal, este sistema tiene la posibilidad de quemarse debido a la imposibilidad de disipar el calor generado internamente. Además son más susceptibles a daños por impacto.

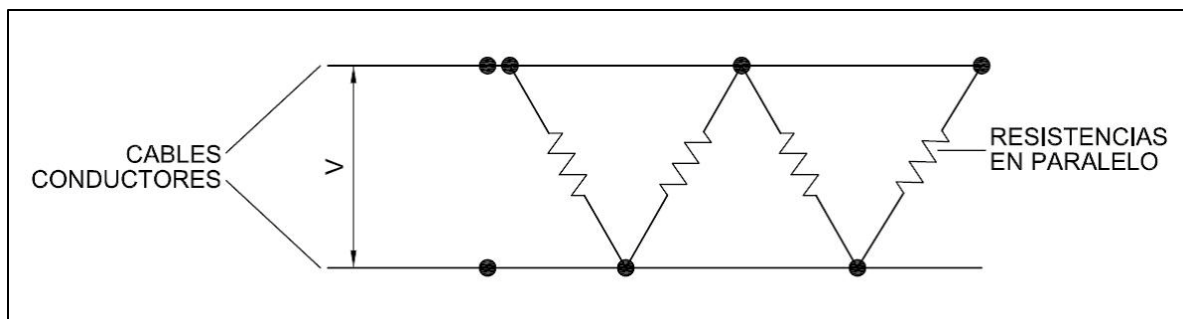


Figura 6. Cable calefactor paralelo.

Al igual que en el caso de los calentadores auto-reguladores, la selección del cable calefactor se realiza a partir de tablas de proveedores.

- **Cable Calefactor Serie:** comercialmente conocidos como Mineral Insulated (MI) Cable. Se trata de un cable calefactor que actúa como una resistencia en serie entregando potencia constante a lo largo de la longitud a trazar.

Su principal ventaja es la robustez mecánica del sistema y su capacidad de entregar alta potencia de calentamiento para aplicaciones de alta temperatura (hasta 800°C).

En contraposición, y a diferencia de los otros sistemas descritos, los cables calefactores serie deben ser confeccionados a medida y no se pueden realizar modificaciones en campo. Adicionalmente, un daño en el cable causa la caída de todo el sistema, ya que el mismo es un sistema en serie. Además, puede fallar debido a la imposibilidad de disipar el calor generado internamente; ésta es una falla típica en las zonas en las que el cable se solapa como, por ejemplo, en el traceado de válvulas o bridas.

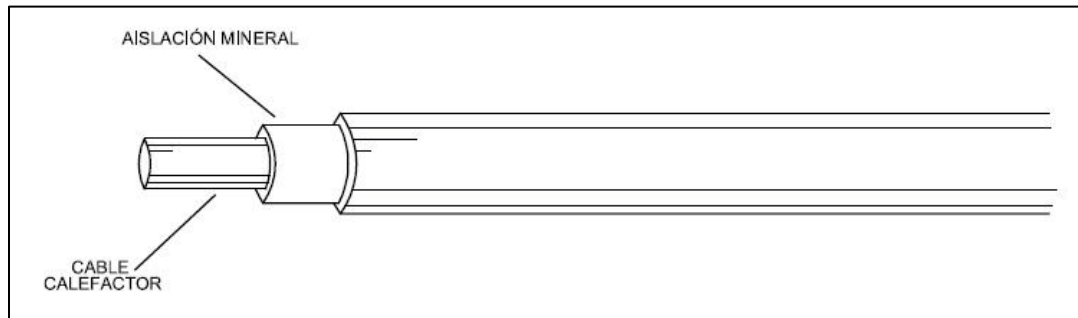


Figura 7. Cable calefactor serie.

Para seleccionar el cable a utilizar, en primer lugar se debe definir la longitud de los tramos a tracear. En este caso se selecciona como longitud representativa 100 m de largo.

Se tiene que:

$$R = \frac{V^2}{q L} \quad (21)$$

Donde:

R = resistencia del cable;

V = tensión de alimentación;

L = longitud a tracear.

De los catálogos de los proveedores se puede seleccionar el cable adecuado para el sistema. Como dato de entrada se requiere la resistencia por unidad de longitud (R/L) y a partir de tablas se encuentra el material y diámetro del cable requerido.

2.2.3 Aceite Térmico

Tal como se describe anteriormente, los aceites térmicos transmiten calor sensible. Por lo tanto, la temperatura del aceite térmico disminuye a lo largo del traceador y como consecuencia la temperatura de mantenimiento del asfalto también varía. Es por esto que para diseñar el sistema debe existir un rango de temperaturas de mantenimiento; en este caso, dicho rango varía entre 180°C y 140°C. La longitud del traceador debe ser tal que en uno de sus extremos no se supere el límite superior y en el otro extremo no se obtengan temperaturas por debajo del límite inferior de temperatura de mantenimiento.

Es importante considerar las distintas condiciones climáticas, como ser invierno y verano, ya que se debe verificar que en ninguna de las condiciones se excedan los límites de temperaturas requeridos. Dichas condiciones climáticas impactan tanto en el coeficiente global de transferencia de la línea (U_o) como en la temperatura ambiente (T_{amb}).

Al igual que en los sistemas de traceado con vapor, en general, el aceite térmico se hace circular por tubing de ½ in de diámetro.

Los cálculos requeridos para el diseño del sistema de traceado con aceite térmico se realizan en diferenciales de área, dentro de los cuales se suponen propiedades promedio uniformes.

Se realiza un balance térmico en estado estacionario, es decir, cuando el flujo de calor entre la línea y el ambiente y el flujo de calor entregado por los traceadores a la línea son iguales y constantes en el tiempo. Esto es consecuencia de un bloqueo en las líneas prolongado en el tiempo.

Como supuesto inicial se fija un caudal circulante de aceite térmico por cada traceador tal que se alcance régimen turbulento. De esta forma se evita caer en zonas de transición en las cuales no es preciso el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor. Al igual que en los sistemas de vapor, inicialmente se debe suponer un número de traceadores y luego el mismo se ajusta según los resultados obtenidos.

Para el dimensionamiento se utilizan las ecuaciones (14), (15) y se adiciona la ecuación (22):

$$q = N \dot{m}_{ac-tér} C_p \Delta T \quad (22)$$

Donde:

$\dot{m}_{ac-tér}$ = flujo másico de aceite térmico por unidad de longitud de un traceador;

ΔT = diferencia de temperatura del aceite térmico en una longitud dada.

El coeficiente global de transferencia del traceador (HTC) se obtiene de la ecuación (17).

En este caso, la resistencia $R_{film\ med-cal}$ se calcula según la siguiente expresión:

$$R_{film} = \frac{1}{h_{i\ ac-tér} d_i} \quad (23)$$

Donde:

$h_{i\ ac-tér}$ = coeficiente de convección forzada entre el aceite térmico y la pared interior del tubing.

Para este caso particular se utiliza la ecuación de Gnielinski:

$$\frac{h_{i\ ac-tér} d_i}{k} = \frac{(f/2)(Re-1000) Pr}{1+12,7(f/2)^{1/2}(Pr^{2/3-1})} k \quad (24)$$

Donde:

f = factor de fricción de Fanning.

Como primer paso de cálculo, a partir de la ecuación (14), se calcula el calor perdido al ambiente cuando la temperatura del asfalto es 180°C (límite superior, $T_{\text{asf } i=0}$). Luego, mediante la ecuación (15) se puede deducir la temperatura requerida de suministro del aceite térmico ($T_{\text{ac-tér } i=0}$) para la cantidad de traceadores supuestos.

Conociendo estos valores iniciales, se puede ejecutar el siguiente procedimiento de cálculo:

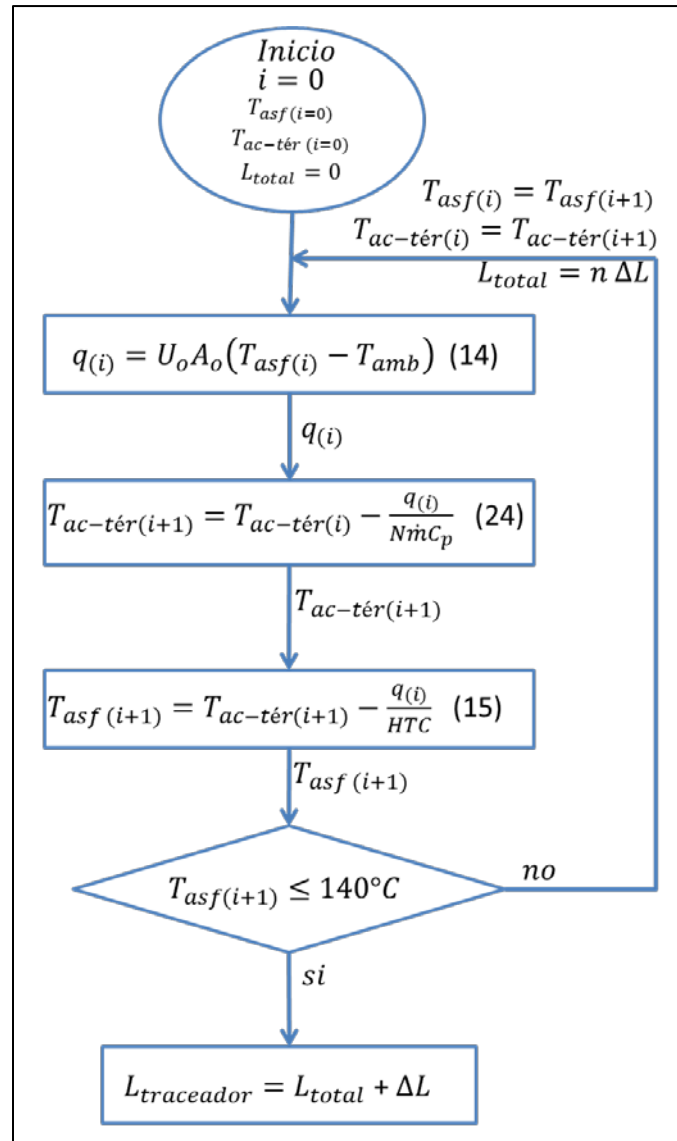


Figura 8. Procedimiento de cálculo del largo máximo del traceador de aceite térmico.

2.3 Resumen de resultados

Considerando lo antes desarrollado para las distintas alternativas se procede a ejemplificar el diseño de las mismas para las siguientes condiciones:

- Se considera asfalto CA-5
- Cañería de diámetro 8 in Sch 40
- Aislación de la lana de vidrio de 60 mm de espesor
- Condiciones ambientales en la ubicación de la planta:
 - Máxima de verano: temperatura ambiente 38°C y 1,6 m/s velocidad del viento
 - Mínima de invierno: temperatura ambiente 0°C y 3,2 m/s velocidad del viento

Según las disponibilidades específicas de cada planta (temperatura del aceite térmico, presión de vapor, tensión eléctrica) los diseños se adaptan y se estudia la viabilidad y adaptabilidad del uso de cada alternativa.

En particular, en este caso se seleccionan los siguientes diseños luego de realizar distintas optimizaciones:

Traceado de línea de diámetro 8 in			
	Vapor	Aceite Térmico	Eléctrico
Longitud máxima traceable [m]	60 (valor recomendado para evitar acumulación de condensado)	70	A definir por el proveedor
Temperatura de mantenimiento @ máx. cond. de verano [°C]	162	180 - 155 (Ver Figura 10)	160°C (Mediante control automático de temperatura)
Temperatura de mantenimiento @ mí. Cond. de invierno [°C]	158	174 - 140 (Ver Figura 9)	160°C (Mediante control automático de temperatura)
Consumo	0,24 [kg/h.m]	2,86 [m3/h.m]	130 [W/m]
Condiciones de entrada del servicio auxiliar a los traceadores	Vapor saturado @ 178°C y 9,6 bar	Aceite Térmico @ 196°C	-
Cantidad de traceadores en paralelo	1	2	A definir por el proveedor
Cantidad de estaciones de traceado por cada 100 m de línea a trazar	1,7 (una estación de 60 m y una segunda de 40m)	1,4 (una estación de 70 m y una segunda de 30m)	A definir por el proveedor

Tabla 4. Resultados obtenidos para cada una de las alternativas de traceado.

A continuación se muestra el perfil longitudinal de temperatura tanto del aceite térmico como del asfalto para la mínima condición de invierno. Se observa que al finalizar el tramo de 70 m se alcanza el límite inferior de temperatura (140°C):

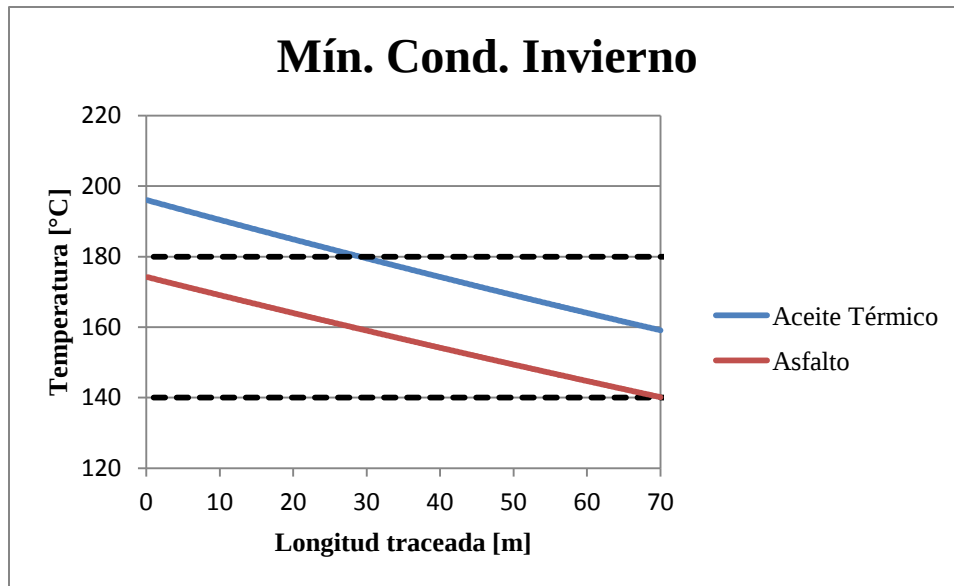


Figura 9. Perfil longitudinal de temperaturas para mínima condición de invierno.

Para la máxima condición de verano se observa que al inicio del tramo traceado se alcanza el límite superior de temperatura (180°C):

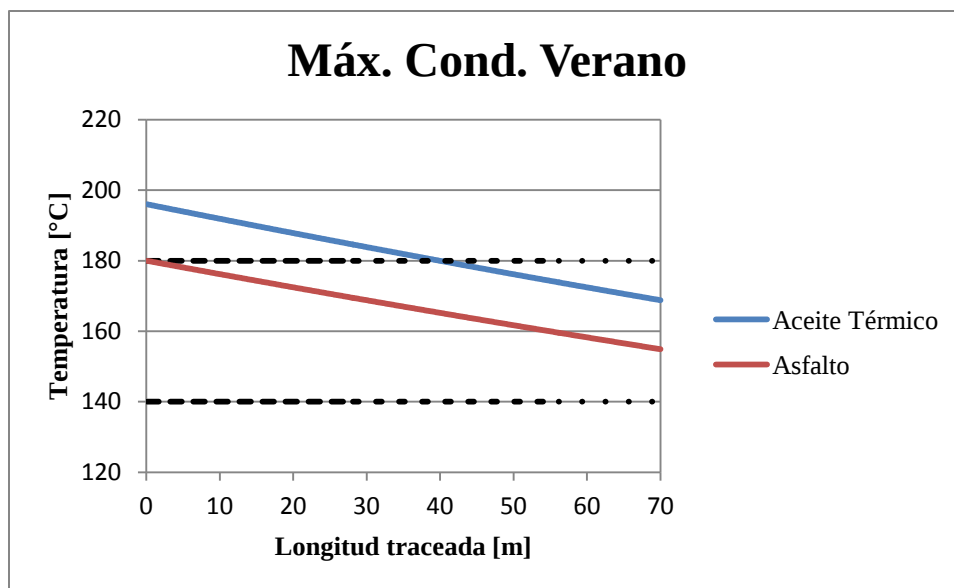


Figura 10. Perfil longitudinal de temperaturas para máxima condición de verano.

2.3 Comparativa de las alternativas

A continuación se presenta una breve descripción comparativa entre las alternativas disponibles y ventajas y desventajas de cada una de ellas.

- **Disponibilidad:**

La disponibilidad de los servicios es una de las principales variables de decisión para la selección de alguna de las alternativas. Para la alternativa de traceado con vapor, es importante destacar que el vapor de baja presión, comúnmente utilizado para el traceado de

líneas, no puede utilizarse para plantas de asfalto dada su baja temperatura. Es por esta razón que se requiere la utilización de vapor de media presión. En general, en las refinerías, el servicio de vapor de media presión se encuentra disponible. No obstante, si la planta no cuenta con dicho suministro puede no resultar económico la implantación de un sistema de generación de vapor que tenga como función principal el traceado de líneas. Lo mismo ocurre con la disponibilidad de aceite térmico. La energía eléctrica, en general, se encuentra disponible. Sin embargo, en caso de revamping de plantas es fundamental contar con información de las capacidades disponibles de los transformadores y tableros dado que el consumo de potencia eléctrica no es menor.

- **Instalaciones:**

Traceado con Vapor: Además de los traceadores, un sistema de traceado con vapor consiste en líneas de suministro, por las cuales se transporta el vapor desde las instalaciones donde el mismo se genera hasta la planta, trampas de vapor, para remover el condensado y contener el vapor, cabezales de distribución (o manifolds) y un sistema de recuperación de condensado (en el pasado el condensado simplemente se desechaba pero el aumento en el costo de la energía y las normativas ambientales hacen que la tendencia actual sea la de recuperarlo). En las líneas de suministro y distribución de vapor se deben instalar estaciones de trapeo, de forma tal que el condensado generado a lo largo de las líneas pueda ser retirado y recuperado.

Traceado Eléctrico: El suministro de electricidad al traceador usualmente se lleva a cabo mediante un tablero de distribución y bandejas de cable. Así mismo debe tenerse en cuenta el cableado hasta la (o las) sub-estaciones eléctricas, que pueden encontrarse a distancias considerables. Dependiendo del tamaño del sistema de traceado y de la capacidad instalada del sistema eléctrico, puede requerirse un transformador adicional. Opcionalmente puede incorporarse un sistema de control y monitoreo de temperaturas.

Traceado con Aceite Térmico: Principalmente se debe contar con un calentador (ya sea eléctrico u horno convencional), una bomba para mantener el aceite fluyendo dentro del circuito y un tanque de expansión, que provee espacio para expansión del fluido. Se debe instalar líneas de distribución del aceite caliente y líneas de retorno de aceite frío que pueden estar a una distancia considerable. Para la distribución de los traceadores, al igual que en los sistemas de vapor, se requieren cabezales o manifolds.

- **Lay Out:**

En cuanto al lay out de las instalaciones hay ciertas cuestiones a tener en cuenta. En general, los sistemas de traceado de vapor se justifican cuando las longitudes a tracear son extensas. Esto ocurre dado que el suministro de vapor no suele estar en las inmediaciones de la planta y el costo del tendido de las líneas de vapor hasta la planta es aproximadamente el mismo si se trata de pequeñas o grandes longitudes a tracear. Para plantas de asfalto pequeñas podría resultar sencillo y económico la utilización de traceado eléctrico.

Por su parte, el horno de aceite térmico debe implantarse a una distancia de seguridad tanto de los tanques de almacenamiento de asfalto, como de la sala de control. Por lo tanto, deben analizarse las distancias existentes entre la bomba de circulación de aceite térmico y la línea

más alejada de la planta para analizar las pérdidas de carga en el sistema y en consecuencia la distribución del aceite térmico en todas las ramificaciones.

- **Mantenimiento:**

El mantenimiento de los sistemas de vapor suele ser mayor al de los sistemas de aceite térmico y de traceado eléctrico. Esto se debe al mantenimiento que debe realizarse sobre las trampas de vapor que deben ser periódicamente revisadas y reemplazadas en caso que fallen. La falla de las trampas implica grandes pérdidas de energía por fugas de vapor. Es por esto que se deben prever planes de mantenimiento de las mismas.

En contraposición a las restantes dos alternativas, los sistemas de traceado eléctrico no involucran la circulación de un fluido, razón por la cual, se evitan los costos mantenimiento debido a fugas.

- **Control:**

Los sistemas de traceado con vapor se caracterizan por tener un control pobre de la temperatura de mantenimiento. Esto es debido a que dependiendo de la calidad de vapor disponible, y la calidad de vapor requerida por el proceso, se puede regular la temperatura de ingreso del vapor pero no es posible hacer un control fino. Tal como se observa en la **Tabla 4**, entre las dos condiciones extremas de diseño (invierno-verano) se encuentra que para la misma presión de vapor de suministro, la temperatura de mantenimiento del asfalto está dentro de las especificaciones. Es por esto que el control no es un limitante para la selección de la alternativa.

Por su parte, los sistemas de traceado eléctrico cuentan con la posibilidad de inclusión de termostatos por medio de los cuales se puede realizar un control eficiente de temperatura de las líneas. De todas formas, puede no implementarse un control en esta alternativa, dado que se cuenta con un rango de temperatura de 40°C dentro del cual se debe mantener el asfalto (180°C-140°C). El sistema puede dimensionarse para verificar en las condiciones extremas de diseño (invierno-verano).

Para el caso de los sistemas de traceado con aceite térmico, el control no es sencillo dado que para asegurar que el caudal circulante de aceite térmico por traceadores sea el de diseño, debe instalarse algún elemento de control de caudal en cada una de las ramificaciones. Esto aumenta los costos y genera una instalación más compleja. En caso de no realizarse control podrían generarse puntos fríos y calientes en las líneas.

- **Confiabilidad y reputación:**

Los primeros sistemas para traceado eléctrico tenían altas tasas de falla: sin embargo, los mismos fueron mejorados con el tiempo y se introdujeron nuevas tecnologías. Pero a pesar de esto, debido a las fallas en el pasado, aún existe cierta resistencia a su uso.

En cambio, los sistemas de traceado con vapor son una tecnología conocida por los operadores y el hecho de estar familiarizados con ella reduce la posibilidad de fallas por errores de operación.

- **Falla:**

Es importante destacar que la falla en los sistemas de traceado trae como consecuencia bloqueos por solidificación del producto. El bloqueo saca de operación dicha línea, a la cual se le debe desmantelar la aislación, el traceador para calentar externamente con algún método seguro. Es por esto que el sistema debe tener una baja tasa de falla.

La falla más común en un sistema de traceado con vapor es la rotura o mal funcionamiento de una trampa de vapor. Sin embargo, las trampas comúnmente fallan abiertas permitiendo la continua circulación de vapor por el traceador por lo que no se pierde la capacidad de calentamiento pero no se realiza un uso eficiente de la energía.

En cuanto al sistema de traceado con aceite térmico, la confiabilidad depende en mayor medida del funcionamiento de las bombas. Al ser éste un punto crítico, por lo general, se dispone de una configuración de bomba con reserva.

La confiabilidad del traceado eléctrico depende del tipo de cable utilizado. Tal como se explica previamente, la falla del cable calefactor serie saca de servicio a todo el traceador. Por su parte, el cable calefactor paralelo elimina esta contingencia por su principio de funcionamiento, sacando de servicio únicamente al tramo dañado. No obstante, es más susceptible a daño mecánico.

- **Acondicionamiento de las utilidades:**

Tanto para los sistemas de aceite térmico como de vapor, la utilidad se dispone a condiciones que en general no son las requeridas por el diseño del traceado. Es decir, se dispone de vapor a mayor presión que la requerida o de aceite térmico a mayor temperatura. Por lo tanto, la instalación debe considerar las adaptaciones necesarias para el atemperamiento a las condiciones necesarias.

En los sistemas de aceite térmico se realiza una integración energética mezclando aceite térmico caliente de la salida del horno y aceite frío del retorno. Para ello se requiere de una bomba adicional.

En los sistemas de vapor se realiza el acondicionamiento mediante una válvula atemperadora que reduce la presión al valor deseado e inyecta parte del condensado para de-sobrecalentar el vapor.

3 Conclusiones

Se ha desarrollado el método para determinar los requerimientos para tres posibles alternativas de traceado: con vapor, con aceite térmico y eléctrico.

Como principal conclusión se puede indicar que las tres alternativas de traceado propuestas son aptas para el servicio de asfalto. Por lo tanto, la selección de la tecnología se basa en las condiciones particulares de cada planta.

En general resulta conveniente realizar un estudio de evaluación económica que contemple no sólo el costo de capital de las instalaciones sino también el costo operativo de las mismas.

4 Bibliografía

1. Juliana Pueblo Méndez (Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias), Natalia Afanasjeva (Universidad del Valle, Cali), Mario Álvarez Cifuentes (Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga) (2013) “*Análisis de la degradación térmica de asfaltos mediante termogravimetría*”; Asfaltos y Pavimentos Edición No 26 Enero-Junio 2013.
2. Perry, R.H. and Green, D.W “*Perry’s Chemical Engineers’ Handbook*”; 8th Edition October 2007 McGraw-Hill.
3. Chet Sandberg, Joseph T. Lonsdale, J.Erickson “Heat-Tracing of Piping Systems” en Mohinder L. Nayyar (7th Edition) *Piping Handbook*, McGraw-Hill, (p B.241 – p B.286).
4. ASTM D4311/D4311M-09 “*Standard Practice for Determining Asphalt Volume Correction to a Base Temperature*”.
5. ASTM D2493 “*Standard Viscosity - Temperature Chart for Asphalts*”.
6. IRAM 6835 “*Asfaltos para uso vial. Clasificados por viscosidad*”.
7. API RECOMMENDED PRACTICE 2023 “*Guide for Safe Storage and Handling of Heated Petroleum-Derived Asphalt Products and Crude-Oil Residua*”.

5 Curriculum Vitae

Paula Agustina Todesca

Ingeniera Química, Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.

Tecna – Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.

Ingeniera de Procesos.

Juan Sebastián Villar Bru

Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.

Tecna – Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.

Ingeniero de Equipos Mecánicos.

Carolina Rafaela Rodriguez

Ingeniera Química, Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.

Tecna – Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.

Ingeniera de Procesos.

Lucas Gabriel Reboredo

Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.

Tecna – Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.

Jefe de Procesos.