

Metodología para el cálculo de pérdidas de calor en accesorios de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Alfonso García Gutiérrez¹, Rosember Ovando Castelar¹, Juan Ignacio Martínez Estrella¹, Ismael Canchola Félix², Carlos Miranda Herrera², Paul Jacobo Galván² y Othón Mora Pérez²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor. Correo: agg@iie.org.mx. ²Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, Mexicali, B.C.

Resumen

La red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) incluye 165 km de tuberías y un gran número de accesorios diversos como válvulas, bridas, soportes, etc., instalados a través de la misma. Al evaluar la eficiencia del proceso de transporte de vapor a través de la red y determinar las principales fuentes de pérdida energética que la impactan, se ha identificado que los accesorios de la red representan una fuente importante de pérdida de calor debido a que, a diferencia de las tuberías, no se encuentran aislados térmicamente. En este trabajo se presenta una metodología para cuantificar la pérdida de calor en los principales accesorios de la red de vaporductos del CGCP, la cual se apoya en la información geométrica de los diferentes tipos de accesorios existentes en la red, las ecuaciones básicas de transferencia de calor y el cálculo de la eficiencia en aletas. Los resultados obtenidos fueron comparados contra datos de temperatura superficial en accesorios medidos en campo con tecnología infrarroja, y contra los resultados que se obtienen al modelar estos accesorios con un programa computacional comercial basado en la técnica de elementos finitos para resolver las ecuaciones de transferencia de calor correspondientes.

Palabras clave: Campo Geotérmico de Cerro Prieto, accesorios, red de tuberías, pérdida de calor.

A methodology for estimating heat losses in fittings of the Cerro Prieto, BC, geothermal field steam pipeline network

Abstract

The Cerro Prieto geothermal field (CPGF) steam pipeline network comprises 165 km of pipes and a large number of fittings like valves, flanges, supports, etc., installed along the pipelines. When evaluating the efficiency of the steam transport process through the network and determine the main sources of energy losses that impact the network, fittings have been identified to represent an important source of heat loss since, unlike the pipes, they are not thermally insulated. In this work, a methodology for quantifying heat loss in the main fitting types installed in the CPGF pipeline network is described. This methodology is based on the geometry of the different installed fittings, basic convective heat transfer equations and fin efficiency calculations. The results were compared with field surface temperature measurements on fittings, carried out with infrared technology, and with results obtained from modeling these fittings with commercially-available software based on the technique of finite elements to solve the corresponding heat transfer equations.

Keywords: Cerro Prieto geothermal field, fittings, pipeline network, heat loss.

1. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), es el campo de líquido dominante más grande del mundo, con una capacidad instalada de 720 MWe. Opera con 13 unidades generadoras de tipo condensante (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2010), las cuales se alimentan con vapor que proviene de 165 pozos productores a través de una red de vaporductos de unos 140 kilómetros de longitud. Los vaporductos, de diámetros entre 8" y 46", están térmicamente aislados con una capa de material a base de lana mineral o fibra de vidrio, con una cubierta exterior de aluminio o hierro, y dispone de un gran número de accesorios diversos como válvulas, bridas, soportes, etc., instalados a lo largo de la red. Por razones prácticas y debido a la necesidad de aplicar mantenimiento periódico de la red, los accesorios no están aislados térmicamente, razón por la cual éstos representan una fuente importante de pérdida de calor en la red.

En los campos geotérmicos, las pérdidas de energía asociadas con el proceso de transporte de vapor desde los pozos hasta las centrales generadoras a través de una red de ductos, se deben principalmente a la fricción en las tuberías y accesorios, a la transferencia de calor hacia el medio ambiente, y a la condensación de vapor y drenado de líquido a través de las purgas.

El conocimiento de las pérdidas de calor en las tuberías y accesorios de la red asociadas a la condición del aislamiento, representa un aspecto muy importante en la evaluación de algunas áreas de oportunidad de mejora, puesto que permite determinar la magnitud relativa de estas pérdidas de energía, comparadas con otros mecanismos de pérdida, y con ello evaluar la conveniencia de mantener en buen estado el aislamiento de las tuberías y de sus accesorios en términos de costo-beneficio, por su impacto en la disminución de las pérdidas y en el incremento de la eficiencia del proceso de transporte de vapor.

Como parte de un estudio reciente sobre modelado y simulación numérica de la operación de la red de transporte de vapor del CGCP (Ovando Castelar *et al.*, 2009), se analizó el efecto de la condición física del aislamiento térmico sobre el coeficiente global de transferencia de calor utilizado en la simulación de la red completa de vaporductos, asumiendo condiciones promedio, tanto de operación de la red como ambientales. Se encontró que la transferencia de calor en un vaporducto sin aislamiento se incrementa en más de diez veces con respecto a la transferencia de calor en un vaporducto con buen aislamiento, de manera que el estado del aislamiento impacta directamente en la caída de temperatura a través de los ductos de vapor y en consecuencia determina la calidad del vapor que llega a las plantas generadoras y la eficiencia del sistema.

Por otro lado, el cálculo de la transferencia de calor en los accesorios de la red de vaporductos del CGCP es una tarea compleja, tomando en cuenta los diferentes tamaños y geometrías de los accesorios, así como las distintas condiciones de operación de la red.

En este trabajo se presenta una metodología para determinar la pérdida de calor en los principales accesorios de la red de vaporductos del CGCP, la cual se apoya en la información geométrica de los diferentes tipos de accesorios existentes en la red, las ecuaciones básicas de transferencia de calor y el cálculo de la eficiencia en aletas. Los resultados obtenidos fueron comparados contra datos de temperatura superficial en accesorios medidos en campo con tecnología infrarroja, y contra los resultados que se obtienen al modelar estos accesorios con un programa computacional comercial basado en la técnica de elementos finitos para resolver las ecuaciones de transferencia de calor correspondientes.

2. Metodología utilizada en el cálculo de las pérdidas de calor en accesorios

Con base en información geométrica de los diferentes tipos de accesorios existentes en la red de vaporductos del CGCP, es posible establecer que el cálculo de la pérdida de calor en accesorios sin aislamiento debe separarse en dos partes (Ecuación (1)). Por un lado, se tiene que una porción del área superficial del accesorio (área base) pierde calor por mecanismo combinado convección-radiación en forma similar al caso de una tubería descubierta, y por otro lado, el resto del área de superficie (área secundaria) se comporta como una aleta, disipando calor hacia el medio ambiente por convección-radiación, pero con una determinada eficiencia.

$$q_{acc} = U_{me} A_d (T_w - T_{\infty}) + \eta_f U_{me} A_f (T_w - T_{\infty}) \quad \dots(1)$$

En lo referente al tratamiento de la pérdida de calor en el área base, el estudio de la transferencia de calor en tuberías sin aislamiento térmico para el CGCP fue descrito en detalle por Ovando Castelar *et al.* (2010), donde se realizó la evaluación del coeficiente global de transferencia de calor y el cálculo de las pérdidas de calor en tuberías con distinto estado de aislamiento (incluyendo el caso de tubería descubierta), para las condiciones de operación de la red con base en una fecha en específico. Las correlaciones y ecuaciones básicas usadas para la determinación de los coeficientes convectivos de transferencia de calor por convección tanto interno como externo, la conducción de calor a través de la pared de la tubería, el tratamiento de la radiación térmica y el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor también fueron descritas por Ovando Castelar *et al.* (2010).

Dado la amplia gama de diámetros de vaporductos, así como de las distintas condiciones de operación de la red (presiones y gastos máxicos de vapor), fue necesario realizar diferentes estimaciones de los coeficientes globales, tomando como referencia los datos del reporte de producción de pozos del CGCP y asumir un promedio anual para la temperatura y velocidad del aire ambiental medido en el campo. Para facilitar esta tarea, se desarrolló un programa de aplicación basado en MS Excel donde se automatizaron los cálculos del coeficiente global de acuerdo con las características que guarda la red de tuberías del CGCP.

Con relación al área secundaria de los accesorios, que pierden calor en forma semejante al caso de una aleta, el cálculo de la pérdida de calor se apoya tanto en el cálculo del coeficiente global en la superficie externa del accesorio, así como en la determinación de la eficiencia de la aleta. Incropera *et al.* (2006) presentan una tabla con las ecuaciones para el cálculo de la eficiencia y el área de superficie de diferentes configuraciones de aleta. Para aletas rectas de sección transversal rectangular, la eficiencia de la aleta está dada por la ecuación (2):

$$\eta_f = \frac{\tanh(m L_c)}{m L_c} \quad \dots(2)$$

donde:

$$m = (2h/kt)^{1/2}$$

$$L_c = L + (t/2)$$

En estas ecuaciones, L, h, t y k son la longitud, ancho, espesor y conductividad térmica de la aleta, respectivamente.

En resumen, las consideraciones básicas que se tomaron en cuenta para realizar el cálculo de la pérdida de calor en los accesorios de la red de vaporductos del CGCP, se indican a continuación:

- a) Todos los accesorios disponen de un área base (A_d), la cual pierde calor por mecanismo combinado convección-radiación. Además, existe un área secundaria (A_f) la cual pierde calor como si fuera una aleta;
- b) El aire ambiental tiene una temperatura constante, igual al promedio anual de temperatura de bulbo seco, medido en el campo durante el periodo de julio de 2008 a junio de 2009;
- c) Por conservadurismo, se asumió que cada accesorio tiene una temperatura superficial igual que la temperatura de saturación a la presión a la que opera este accesorio; esta temperatura se tomará como la temperatura de la base de la aleta;
- d) El coeficiente global de cada accesorio es el mismo que se calculó con el programa de aplicación en Excel, para las condiciones de operación del vaporducto asociado a este accesorio (con base en su diámetro);
- e) La conductividad térmica del material de construcción del accesorio se tomó igual que la de la tubería desnuda asociada a este accesorio, para las mismas condiciones de operación (programa de aplicación basado en MS Excel);

El cálculo basado en la ecuación (1) permite determinar la pérdida de calor para cada tipo de accesorio (según su diámetro) y de acuerdo con sus condiciones de operación promedio. La pérdida de calor total de los accesorios de la red tendrá que evaluarse multiplicando esta pérdida de calor por el número total de accesorios de las mismas características que existen en la red completa.

Para una mejor estimación de las pérdidas en accesorios, éstos se agruparon con base en el tipo de separación (simple y doble) y posteriormente se separaron en vaporductos de Alta, Media y Baja presión. Se contabilizó el número de accesorios por cada tipo de separación y el número total de vaporductos por tipo de separación y por el nivel de presión fue determinado con base en el reporte de producción de vapor y agua, basado en la fecha de referencia del cálculo. Con todo esto, se determinaron las pérdidas totales de calor en los accesorios de la red.

3. Resultados de los cálculos teóricos

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron para las pérdidas de calor por tipo de accesorio, y las pérdidas totales en accesorios agrupados por tipo de separación y por el nivel de presión de los vaporductos del CGCP.

a. Pérdidas de calor por tipo de accesorio

Tomando en cuenta las dimensiones genéricas de cada accesorio, se programaron ecuaciones para el cálculo de la pérdida de calor por tipo de accesorio con ayuda de MS Excel. Estas ecuaciones dependen de las dimensiones geométricas de cada accesorio y de las condiciones de operación del vaporducto asociado a cada accesorio (presión y flujo másico de vapor).

En la Tabla 1 se muestra la pérdida de calor en bridas y bridas ciegas de la red de vaporductos, para condiciones de operación típicas de la red de vaporductos.

Tabla 1. Pérdidas de calor en las bridas y bridas ciegas de la red de vaporductos del CGCP

Pérdida de calor en Bridas																
Diámetro	Clase	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	r_{2c} [m]	m	C_2	p [barg]	T_{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	T_a [°C]	η [%]	A_f [m ²]	A_d [m ²]	q_t [W]
10	300	0.137	0.222	0.048	0.246	3.909	1.665	3.935	151.4	49.603	18.101	23.8	92.462	0.475	0.429	2005.546
10	900	0.137	0.273	0.070	0.308	3.232	1.108	3.935	151.4	49.603	18.101	23.8	86.839	0.901	0.429	2797.867
16	300	0.203	0.324	0.057	0.352	3.393	1.445	4.314	154.2	49.598	16.316	23.8	89.999	1.084	0.638	3434.042
16	300	0.203	0.324	0.057	0.352	3.828	1.280	12.961	195.0	48.339	20.239	23.8	87.656	1.084	0.638	5501.815
20	300	0.254	0.387	0.064	0.419	3.086	1.481	4.494	155.5	49.665	15.020	23.8	90.114	1.280	0.798	3860.300
20	300	0.254	0.387	0.064	0.419	3.460	1.321	12.750	194.3	48.506	18.439	23.8	87.926	1.280	0.798	6045.064
24	150	0.305	0.406	0.048	0.430	3.854	1.715	12.755	194.3	48.607	17.240	23.8	91.624	1.059	0.958	5666.051
24	300	0.305	0.457	0.070	0.492	3.187	1.281	12.755	194.3	48.607	17.240	23.8	87.107	1.626	0.958	6977.609

Pérdida de calor en Bridas Ciegas																
Diámetro	Clase	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	r_{2c} [m]	m	C_2	p [barg]	T_{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	T_a [°C]	η [%]	A_f [m ²]	A_d [m ²]	q_t [W]
40	300	0.508	0.619	0.114	0.676	2.538	2.008	11.348	189.3	48.395	17.821	23.8	93.507	2.419	1.609	11417.540

Pérdida de calor en Brida Ciega Inferior																
Diámetro	Clase	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	r_{2c} [m]	m	C_2	p [barg]	T_{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	T_a [°C]	η [%]	A_f [m ²]	A_d [m ²]	q_t [W]
12	300	0.162	0.260	0.051	0.286	3.985	1.466	3.139	145.0	49.413	19.935	23.8	90.368	0.716	0.591	2991.131
12	300	0.162	0.260	0.051	0.286	4.063	1.438	6.881	169.9	48.869	20.487	23.8	90.034	0.716	0.591	3698.604
12	300	0.162	0.260	0.051	0.286	4.265	1.370	11.779	190.9	48.250	22.291	23.8	89.144	0.716	0.591	4579.435

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para la pérdida de calor hacia el medio ambiente en el registro-hombre de los separadores de vapor, para las tres presiones de separación típicas del CGCP (alta presión, baja presión y presión media en CPU). En la Tabla 3 se muestran los resultados de los cálculos de pérdidas de calor en las válvulas de mariposa y en las válvulas de esfera del CGCP.

Tabla 2. Pérdidas de calor en los registros-hombre de los separadores de vapor del CGCP

Pérdida de calor en Registro-Hombre																
Diámetro	Clase	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	r_{2c} [m]	m	C_2	p [barg]	T_{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	T_a [°C]	η [%]	A_f [m ²]	A_d [m ²]	q_t [W]
24	300	0.305	0.457	0.070	0.492	2.517	1.622	4.017	152.1	50.257	11.119	23.8	91.483	1.750	0.875	3531.679
24	300	0.305	0.457	0.070	0.492	2.826	1.445	6.867	169.8	49.546	13.815	23.8	89.532	1.750	0.875	4925.744
24	300	0.305	0.457	0.070	0.492	3.179	1.284	12.784	194.4	48.618	17.163	23.8	87.158	1.750	0.875	7028.338

Tabla 3. Pérdidas de calor en válvulas de mariposa y válvulas de esfera de la red de vaporductos del CGCP

Pérdida de calor en Válvula de Mariposa																
Diámetro	Clase	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	r_{2c} [m]	m	C_2	p [barg]	T_{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	T_a [°C]	η [%]	A_f [m ²]	A_d [m ²]	q_t [W]
20	300	0.254	0.387	0.064	0.419	3.086	1.481	4.494	155.5	49.665	15.020	23.8	90.114	1.280	1.164	4583.922
20	300	0.254	0.387	0.064	0.419	3.460	1.321	12.750	194.3	48.506	18.439	23.8	87.926	1.280	1.164	7194.727

Pérdida de calor en Válvula de Esfera																
Diámetro	Clase	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	r_{2c} [m]	m	C_2	p [barg]	T_{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	T_a [°C]	η [%]	A_f [m ²]	A_d [m ²]	q_t [W]
36	300	0.457	0.635	0.111	0.691	1.620	2.106	4.017	152.1	50.800	7.417	23.8	94.500	2.860	0.243	2802.918
12	300	0.162	0.260	0.051	0.286	3.697	1.580	4.017	152.1	49.617	17.227	23.8	91.582	0.716	0.186	1859.974
																4662.892
36	300	0.457	0.635	0.111	0.691	1.896	1.800	6.867	169.8	50.081	10.013	23.8	92.642	2.860	0.243	4228.854
12	300	0.162	0.260	0.051	0.286	3.933	1.485	6.867	169.8	49.032	19.269	23.8	90.591	0.716	0.186	2348.011
																6576.865
36	300	0.457	0.635	0.111	0.691	2.247	1.519	12.784	194.4	49.033	13.773	23.8	90.007	2.860	0.243	6619.217
12	300	0.162	0.260	0.051	0.286	4.184	1.396	12.784	194.4	48.299	21.479	23.8	89.501	0.716	0.186	3029.354
																9648.571

En el caso de los soportes o silletas de las tuberías, la estimación de la pérdida de calor se realizó aplicando un procedimiento similar al que se usó para los accesorios de la red. Las silletas fueron tratadas como aletas rectas de longitud finita, usando la temperatura de saturación del vapor como temperatura de su base. El coeficiente global se obtuvo del programa de aplicación en MS Excel, apoyado en los resultados obtenidos para el cálculo de la pérdida de calor en vaporductos desnudos. Los vaporductos se clasificaron con base en el diámetro nominal en tuberías de pozos, subcolectores y ramales, y el número de silletas se determinó dividiendo la longitud total de cada vaporducto entre la distancia de separación típica entre silletas (7 m). Las dimensiones geométricas genéricas usadas para los soportes se basan en el diámetro nominal de los vaporductos. La Tabla 4 muestra los resultados de las pérdidas de calor en los soportes de vaporductos típicos del CGCP.

Tabla 4. Pérdidas de calor en soportes de vaporductos típicos del CGCP

Pérdida de calor en silletas														
Diámetro	L [m]	w [m]	t [m]	L _c [m]	m	p [barg]	Tsat [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	Ta [°C]	η [%]	A _f [m ²]	q _t [W]	m _v [Ton/hr]
16	0.052	0.700	0.010	0.057	8.182	6.895	169.9	49.325	16.361	23.8	93.330	0.081	180.579	0.0003
	0.203	0.697	0.006				T(x)	155.367				0.285	614.164	0.0010
	0.052	0.700	0.010	0.057	8.182		155.4	49.325	16.361	23.8	93.330	0.080	160.307	0.0003
	0.203	0.697	0.006				T(x)	142.251				0.285	552.936	0.0009
20	0.248	0.706	0.006	0.251	9.837	6.665	168.7	49.422	15.183	23.8	39.951	0.709	622.945	0.0011
	0.184	0.446	0.006	0.187	9.837	6.665	168.7	49.422	15.183	23.8	51.613	0.334	379.802	0.0007
	0.510	0.750	0.006				T(x)	48.213	68.590			0.781	410.224	0.0007
26	0.286	0.706	0.006	0.289	10.053	6.881	169.9	49.201	15.789	23.8	34.233	0.816	644.196	0.0012
	0.213	0.578	0.006	0.216	10.053	6.881	169.9	49.201	15.789	23.8	44.901	0.499	516.976	0.0009
	0.642	0.750	0.006				T(x)	39.774	56.738			0.981	378.544	0.0006
32	0.324	0.706	0.006	0.327	9.500	6.881	169.9	49.385	14.150	23.8	32.079	0.923	612.216	0.0011
	0.241	0.710	0.006	0.244	9.500	6.881	169.9	49.385	14.150	23.8	42.262	0.694	606.361	0.0011
	0.774	0.750	0.006				T(x)	36.878	52.211			1.180	346.356	0.0006

b. Pérdida de calor total en accesorios por tipo de separación

En la red de vaporductos del CGCP existe una amplia variedad de tamaños de ductos y una multiplicidad de condiciones de operación de la red de vaporductos del CGCP, motivo por el cual el cálculo de la pérdida de calor total en los accesorios de la red se convierte en una tarea sumamente compleja y tediosa.

Con la finalidad de simplificar el cálculo de la pérdida de calor total, se decidió agrupar los accesorios de la red con base en el tipo de separación (separación simple y doble separación) y asumir un conjunto de accesorios estándar para cada tipo de separación. Asimismo, para tener una mejor estimación del impacto de las condiciones de operación de la red en el cálculo de la pérdida de calor en accesorios de la red, estos se agruparon con base en el nivel de presión de operación de la red en vaporductos de Alta, Media y Baja presión. La categoría de media presión corresponde a los vaporductos de Cerro Prieto Uno (CPU). Finalmente, para el cálculo total de las pérdidas de calor, se determinó el número de total accesorios por cada tipo de separación, mientras que el número total de vaporductos por tipo de separación y por nivel de presión fue determinado con base en el reporte mensual de producción de agua y vapor de la fecha de referencia del estudio.

El calor perdido hacia el medio ambiente a través de los accesorios desnudos de los vaporductos del CGCP, se traduce eventualmente en la condensación de vapor en el interior de los vaporductos y una consecuente reducción del vapor enviado a las plantas de generación, resultando esto en una

disminución de la potencia generada por las unidades. La tasa de vapor que se condensa en los vaporductos de la red se puede calcular a partir de la ecuación (3):

$$m_{cond} = \frac{3.6 q}{h_{fg}} \quad \dots(3)$$

donde:

- m_{cond} = Tasa de vapor condensado;
- q = Pérdida de calor hacia el medio ambiente;
- h_{fg} = Entalpía de condensación

Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos para la pérdida de calor total en los accesorios de la red y de las condiciones de operación (presión) de la red en la fecha de referencia, se calculó la tasa de vapor condensado debido a la pérdida de calor en los accesorios.

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la tasa de condensación de vapor debido a las pérdidas de calor totales en los accesorios de CPU para un esquema de simple separación. En la Tabla 6 se muestran los cálculos de pérdidas de calor totales en accesorios (expresada en términos de la tasa de condensación de vapor) para vaporductos de alta presión y baja presión del CGCP, para cada tipo de separación (simple o doble). Las condiciones de operación de cada accesorio fueron obtenidas a partir de un promedio en presión y flujo másico de los vaporductos del mismo diámetro que corresponden a cada tipo de separación, con base en el reporte de operación de la fecha de referencia.

Tabla 5. Pérdidas de calor totales en los accesorios de los vaporductos de CPU

Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos CPU						
	Punto de Medición		Pierna Condensado	Entronque		
No. Pozos	Brida 20-300 [Ton/hr]	Brida 4-300 [Ton/hr]	bridas + tuberías [Ton/hr]	brida + válvula [Ton/hr]	Total [Ton/hr]	Total CPU [Ton/hr]
15	0.0077	0.0020	0.0077	0.0265	0.0440	0.6596

Tabla 6. Pérdidas de calor totales en accesorios de los vaporductos de CPD, CPT y CPC

Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos Sencillos Alta Presión CPDTC									
	Punto de Medición		Pierna Condensado	Entronque					
No. Pozos	Brida 20-300 [Ton/hr]	Brida 4-300 [Ton/hr]	bridas + tuberías [Ton/hr]	brida + válvula [Ton/hr]	Total [Ton/hr]	Total CPDTC [Ton/hr]			
82	0.0113	0.0026	0.0106	0.0394	0.0639	5.2417			
Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos Dobles Alta Presión CPDTC									
	Punto de Medición AP		Pierna Condensado-AP	Entronque-AP	Punto de Medición BP	Pierna Condensado-BP	Entronque-BP		
No. Pozos	Brida 20-300 [Ton/hr]	Brida 4-300 [Ton/hr]	bridas + tuberías [Ton/hr]	brida + válvula [Ton/hr]	Brida 10-150 [Ton/hr]	bridas + tuberías [Ton/hr]	brida + válvula [Ton/hr]	Total [Ton/hr]	Total CPDTC [Ton/hr]
60	0.0111	0.0025	0.0105	0.0388	0.0031	0.0033	0.0078	0.0771	4.6253
Pérdida de Calor en Accesorios de Vaporductos Sencillos BP CPDTC (Sitios)									
	Punto de Medición		Pierna Condensado	Entronque					
No. Pozos	Brida 20-300 [Ton/hr]	Brida 4-300 [Ton/hr]	bridas + tuberías [Ton/hr]	brida + válvula [Ton/hr]	Total [Ton/hr]	Total CPDTC [Ton/hr]			
20	0.0065	0.0017	0.0065	0.0221	0.0368	0.7352			

Tomando en cuenta el consumo específico de vapor de cada una de las centrales generadoras de energía para la fecha de referencia del estudio, se calculó la potencia eléctrica que se pierde debido a la transferencia de calor hacia el medio ambiente a través de los accesorios de los vaporductos de la red. Los resultados obtenidos se presentan en forma resumida en la Tabla 7 (expresada en MWt, MWe y en términos de la tasa de vapor condensado).

Tabla 7. Pérdidas de calor totales en accesorios de los vaporductos del CGCP

	q [MWt]	m [Ton/hr]	q [MWe]
TOTAL CPU:	0.375	0.660	0.066
TOTAL CPDTC AP:	4.911	9.020	1.187
TOTAL CPDTC BP:	0.925	1.583	0.208
TOTAL CP:	6.211	11.262	1.461

En la Tabla 8 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para la pérdida de calor total (expresada en MWt, MWe y en términos de la tasa de vapor condensado) en los soportes de los vaporductos para las redes de alta y baja presión.

Tabla 8. Pérdidas de calor totales en soportes de los vaporductos del CGCP

	q [MWt]	m [Ton/hr]	q [MWe]
TOTAL CPU:	2.737	4.693	0.618
TOTAL CPDTC AP:	16.658	29.028	3.820
TOTAL CPDTC BP:	7.708	13.134	1.728
TOTAL CP:	27.103	46.855	6.165

Realizando una comparación de estos resultados con una estimación de las pérdidas totales de energía que ocurren en el transporte de vapor en la red de vaporductos del CGCP (García-Gutiérrez *et al.*, 2009), se puede apreciar que las pérdidas de calor hacia el medio ambiente debidas a los accesorios y soportes sin aislamiento de la red de alta presión del CGCP representan aproximadamente el 19.5% de la pérdida total de energía, mientras que la pérdida en los accesorios y soportes de la red de baja presión representa alrededor del 16.2%.

Estas pérdidas de calor y la condensación de vapor resultante se traducen en una pérdida de potencia equivalente a 7.63 MWe o al 1.1% de la potencia total instalada en el CGCP.

4. Validación contra mediciones en campo de temperatura superficial

Se efectuaron mediciones de temperatura de superficie en bridas de distinto diámetro de la red de vaporductos del CGCP, las cuales fueron tomadas utilizando una cámara termográfica. Se efectuaron mediciones de la temperatura de superficie y de la base de la brida, así como de la temperatura ambiente. Las condiciones de operación del vaporducto asociado corresponden con lo indicado en el reporte de producción de vapor y agua para la fecha de la realización de las mediciones.

A partir de los datos de las condiciones de operación de la red, se realizaron simulaciones con el programa de aplicación basado en MS Excel para determinar el coeficiente global de transferencia de calor de la superficie externa del vaporducto asociado. Finalmente, a partir de la ecuación para

determinar la distribución de temperaturas en aletas circunferenciales, se determinó la temperatura de la superficie externa de la brida y se comparó contra los datos de medición en campo.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la evaluación de la pérdida de calor en bridas de 10 y 20" de diámetro nominal para un pozo de doble separación del CGCP. En esta tabla también se presentan los cálculos teóricos para las dimensiones típicas de las bridas y los parámetros necesarios para el cálculo de la pérdida de calor. En la Tabla 10 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en forma teórica para la temperatura superficial de estas bridas, así como los datos de la medición en campo para la temperatura de superficie del vaporducto y de la brida correspondiente. En esta tabla se indica también el error relativo (en %) de los resultados obtenidos para el cálculo teórico de la temperatura de superficie de cada brida, con relación a la medición en campo.

Tabla 9. Pérdidas de calor totales en bridas del punto de medición (cálculo teórico)

Pérdida de calor en Bridas																
Diámetro	Clase	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	r_{2c} [m]	m	C_2	p [barg]	T_{sat} [°C]	k [W/(m·°C)]	h [W/(m ² ·°C)]	T_a [°C]	η [%]	A_f [m ²]	A_d [m ²]	q_t [W]
10	300	0.137	0.222	0.048	0.246	3.738	1.742	4.309	154.2	49.068	16.372	29.0	93.056	0.475	0.429	1785.305
10	900	0.137	0.273	0.070	0.308	3.232	1.108	3.935	151.4	49.603	18.101	23.8	86.839	0.901	0.429	2797.867
16	300	0.203	0.324	0.057	0.352	3.828	1.280	12.961	195.0	48.339	20.239	23.8	87.656	1.084	0.638	5501.815
20	300	0.254	0.387	0.064	0.419	3.349	1.365	11.721	190.7	48.741	17.360	29.0	88.588	1.280	0.798	5421.989
24	150	0.305	0.406	0.048	0.430	3.854	1.715	12.755	194.3	48.607	17.240	23.8	91.624	1.059	0.958	5666.051
40	300	0.508	0.619	0.114	0.676	2.538	2.008	11.348	189.3	48.395	17.821	23.8	93.507	128.581	1050.367	3452633.875

Tabla 10. Comparación de resultados para la temperatura de superficie en bridas del punto de medición (cálculo teórico vs medición en campo)

	Pozos de CPDTC AP y BP			
	138	138	138	138
Diámetro Nom	20	20	10	10
T_{prom} (campo) [°C]	188.7	162.3	157.2	137.2
p (dato sumvapor) [barg]	11.721	11.721	4.309	4.309
T_{sat} (cálculo) [°C]	190.7	190.7	154.2	154.2
T_w (cálculo) [°C]	169.5	165.3	127.7	142.4
T_a (campo) [°C]	29.0	29.0	29.0	29.0
h [W/(m ² ·°C)]	18.037	17.360	17.171	16.372
Error Relativo (%)		1.818		3.765
	Tubería	Brida	Tubería	Brida

5. Comparación de resultados mediante la modelación de accesorios usando software comercial para el cálculo de transferencia de calor

Se realizaron comparaciones de los resultados obtenidos de las pérdidas de calor en algunos accesorios de la red, al aplicar el método teórico descrito en este trabajo, contra los datos que se obtienen al realizar una modelación de estos accesorios utilizando un software comercial de libre distribución, el cual permite realizar cálculos de transferencia de calor en sólidos mediante la técnica de elemento finito.

El primer caso de comparación consistió en modelar una brida de 10" clase 300, localizada en el punto de medición de un vaporducto de baja presión. Las dimensiones de la brida y de los birlos de sujeción fueron reproducidos a escala en el software comercial, mediante una geometría axisimétrica, y se aplicaron las condiciones de frontera de temperatura de pared constante en la superficie interna de la brida ($T = T_{sat}$) y frontera convectiva para la superficie externa de la brida ($h = U_{me}$). Los resultados

que se obtuvieron para la distribución de temperaturas en la brida y la pérdida de calor hacia el medio ambiente, se muestran en la Figura 1. En la parte baja de esta figura se anexa una tabla que muestra los resultados de los cálculos de las pérdidas de calor en la brida de 10" obtenidos al aplicar el método teórico descrito en la sección 3 de este trabajo. La diferencia relativa entre ambos cálculos es de 1.2 %.

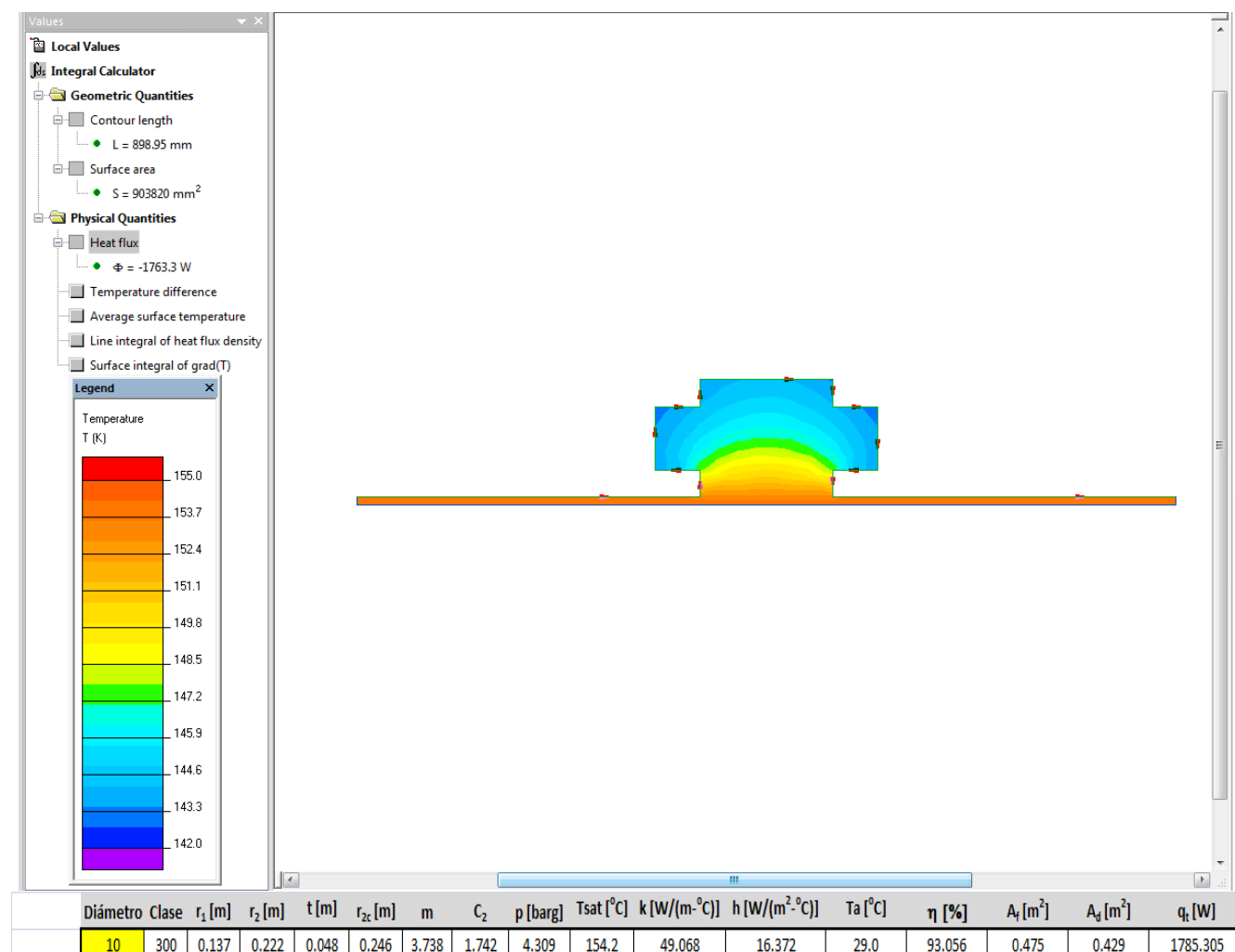


Figura 1. Comparación de resultados del cálculo teórico para la pérdida de calor en una brida de 10" clase 300 y el valor reportado al modelar el accesorio mediante software comercial

El segundo caso de comparación corresponde con una brida ciega de 40" clase 300 de un vaporducto de alta presión. En forma similar que el caso anterior, las dimensiones de la brida y de sus elementos de sujeción fueron utilizados para realizar un modelo axisimétrico de transferencia de calor en un software comercial. Los resultados obtenidos de las pérdidas de calor desde la superficie externa de la brida, así como su distribución de temperaturas se muestran en la Figura 2. También se anexa en la parte baja de esta figura una tabla con los resultados obtenidos de las pérdidas de calor hacia el medio ambiente utilizando el cálculo teórico. Rápidamente se puede apreciar que la diferencia relativa entre los resultados de ambos métodos de solución es de 10 %.

5. Conclusiones

Se describieron las bases de un método para el cálculo de las pérdidas de calor en los accesorios y soportes de la red de vaporductos del CGCP. Con base en este método, se realizó la evaluación de las pérdidas de calor totales asociadas a los accesorios y soportes desnudos de la red de vaporductos del CGCP. El estudio se basó en un inventario de accesorios típicos, clasificados con base en el tipo de separación (sencilla y doble) y la presión de operación de la red (baja, media y alta presión). Se tomaron en cuenta las condiciones de operación de la red para una fecha dada.

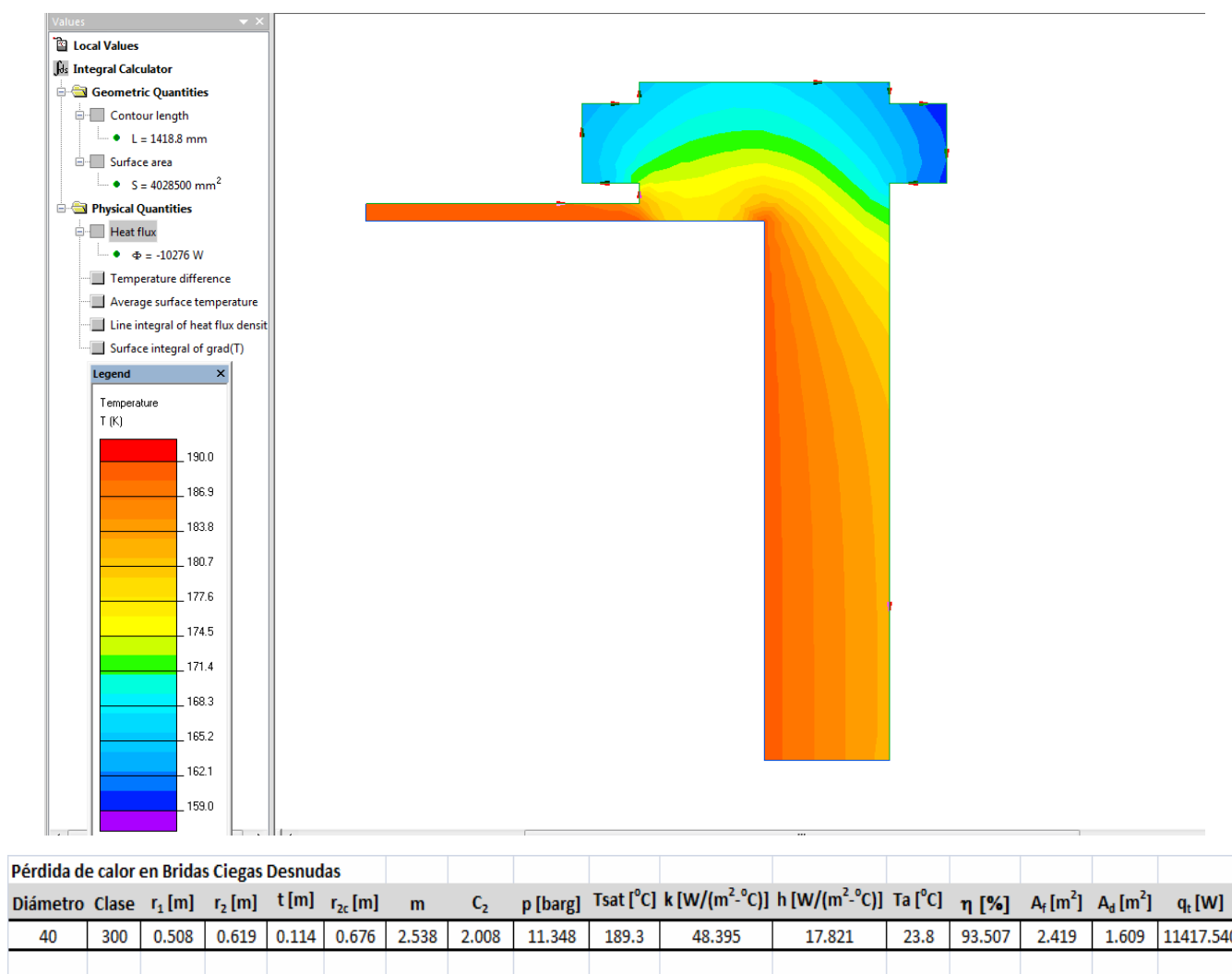


Figura 2. Comparación de resultados del cálculo teórico para la pérdida de calor en una brida ciega de 40" clase 300 y el valor reportado al modelar el accesorio mediante software comercial

Los resultados obtenidos indican que las pérdidas de calor totales en los accesorios y soportes desnudos que forman parte de la red de transporte de vapor ascienden a 33.3 MWt (MW térmicos), distribuidos en 3.1 MWt para CPU, 21.6 MWt para la red de AP de Cerro Prieto Dos, Tres y Cuatro, y 8.6 MWt para la red de BP. Estas pérdidas dan lugar a la formación de 58.12 toneladas por hora (t/h) de condensado de las cuales 38.05 y 14.72 t/h son de las redes de AP y BP, respectivamente de los campos de Cerro Prieto Dos, Tres y Cuatro, y 5.35 t/h son de CPU.

Las pérdidas de calor y la condensación de vapor resultante se traducen en una pérdida de potencia equivalente a 7.63 MWe o al 1.1% de la potencia total instalada en el CGCP.

La validación de cálculos de pérdida de calor en accesorios dio resultados satisfactorios; los resultados del cálculo teórico se mantuvieron dentro del 5% de error relativo, en relación con las mediciones de temperatura de superficie tomada en campo.

Los resultados del cálculo teórico de la pérdida de calor en accesorios mostraron buena concordancia con los que se obtuvieron al modelar el accesorio con un software comercial de transferencia de calor, basado en el método de elemento finito. Los resultados del cálculo teórico se mantuvieron dentro del 10 % de diferencia relativa en relación con los valores reportados por el software comercial.

Agradecimientos: Se agradece a las autoridades del Campo geotérmico de Cerro Prieto de la Comisión Federal de Electricidad y del Instituto de Investigaciones Eléctricas por el apoyo y permiso para la realización de la presente publicación. Los resultados fueron obtenidos como parte del contrato CFE/I/SC/13391/2009 entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad.

Nomenclatura

Símbolos

A	Área de transferencia de calor (m^2)
h	Ancho de la aleta
k	Conductividad térmica de la aleta
L	Longitud de la aleta (m)
L_c	Longitud característica de la aleta (m)
q_{acc}	Pérdida de calor en accesorios (W)
t	Espesor de la aleta (m)
T_{sat}	Temperatura de saturación del vapor (K)
T_w	Temperatura de la superficie externa del aislante (K)
T_∞	Temperatura global del fluido (K)
U_m	Coeficiente global ($W/(m^2 \cdot K)$)

Símbolos griegos

η_f	Eficiencia de la aleta (adimensional)
----------	---------------------------------------

Subíndices

d	Área base
e	Superficie exterior del accesorio
f	Área secundaria (aleta)

Referencias

- García Gutiérrez, A., Martínez Estrella, J.I. y Ovando Castelar, R., 2009. Evaluación y optimización de la eficiencia del ciclo geotérmico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto: Parte 1 - Sistema de producción y transporte de fluidos geotérmicos, Informe Final, Clave IIE/11/13743/I 02/F/DC, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor., Diciembre.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Maya-González, R. y Quijano-León, J.L., 2010. Current Status of Geothermics in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April.

- Ovando Castelar, R., García Gutiérrez, A., Ceceñas Falcón, M., Martínez Estrella, J.I., Hernández Ochoa, A.F., Canchola Félix, I., Mora Pérez, O. y Miranda Herrera, C., 2009. Efecto del estado del aislamiento sobre el coeficiente global de transferencia de calor en componentes de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto. *VII Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico*, Cuernavaca, Morelos, México, 7-9 Octubre.
- Ovando Castelar, R., García Gutiérrez, A., Martínez Estrella, J.I., Canchola Félix, I., Jacobo Galván, P. Miranda Herrera, C., 2010. Determinación de pérdidas de calor en la red de transporte de vapor del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, con base en el estado físico del aislamiento térmico de vaporductos. *Memorias del XVIII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*, octubre 15, Morelia, Mich.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P y Bergman, T.L., 2006. *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th Edition, Wiley, pp. 152-153.