

Balance de energía de la red de transporte de vapor del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC

A. García-Gutiérrez¹, J.I. Martínez-Estrella¹, R. Ovando-Castelar¹, I. Canchola-Félix², P. Jacobo-Galván²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor., México, Correo: aggarcia@iie.org.mx.

²Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectríficos, Residencia General de Cerro Prieto, Mexicali, BC, México

Resumen

Se realizó un balance de energía de la red de transporte de vapor (alta y baja presión: AP y BP) del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, con el fin de estimar las eficiencias térmicas de los procesos parciales (sub-procesos de transporte entre puntos específicos) y globales (cabezal del pozo a puntos de entrega-recepción E/R) de las plantas generadoras de electricidad, a partir de los flujos de masa, energía y exergía del vapor y del agua separada. El análisis incluyó también una evaluación detallada de las pérdidas de calor considerando la condición física de los aislantes térmicos de las tuberías y sus accesorios, y las pérdidas a través de las purgas de vapor condensado. Las eficiencias de los procesos parciales de transporte estimadas mediante la Primera Ley de la Termodinámica (energía) se encuentran en el rango de 86.8 a 98.1%, mientras que las eficiencias estimadas mediante la Segunda Ley de la Termodinámica (exergía) variaron entre 78.9 y 95.9%. Las eficiencias del proceso global de transporte obtenidas por estas dos leyes fueron de 67.6% y 75.2%, respectivamente. Las pérdidas totales de calor ascendieron a 72.9 MWt a través de las tuberías, 33.7 MWt a través de los accesorios y 74.0 MWt a través de las purgas de vapor condensado, para un total de 180.6 MWt. El análisis excluye las plantas de generación.

Palabras clave: Cerro Prieto, transporte de vapor, eficiencia, energía, exergía, pérdidas de calor.

Energy balance of the steam gathering network of the Cerro Prieto geothermal field, BC

Abstract

An energy balance of the Cerro Prieto steam gathering network (high- and low-pressure, HP and LP) was performed to determine the thermal efficiencies of the partial (transportation sub-processes between selected points) and overall (wellhead to power plant inlet) processes from mass, energy and exergy flows of the separated steam and water. A detailed evaluation of heat losses from the gathering system complemented this analysis which considered the physical condition of the pipelines' and fittings' thermal insulation, and losses through the condensate drains. First thermodynamic law (energy) efficiencies of the partial steam transportation processes ranged from 86.8 to 98.1% while those of the second law (exergy) varied from 78.9 to 95.9%. The respective overall efficiencies were 67.6% and 75.2 %. Total heat losses from the HP and LP gathering networks amounted to 180.6 MWt of which 72.9 MWt were lost through the pipelines thermal insulation, 33.7 MWt from the pipelines fittings, and 74.0 MWt were lost from the condensate drains. The analysis excluded the power plants.

Keywords: Cerro Prieto, gathering system, thermal performance, energy and exergy analysis, heat losses.

1. Introducción

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) es el campo geotérmico mexicano con mayor antigüedad de operación, cuya primera planta empezó a generar electricidad en 1973, y es también el campo geotérmico de líquido dominante más grande del mundo. Con el tiempo, su explotación y crecimiento dieron lugar a un complejo sistema de recolección y transporte de vapor, con múltiples colectores principales y secundarios e interconexiones entre las diferentes áreas del campo, así como a una declinación en la producción de vapor. Además, el impacto de las condiciones de operación y ambientales dieron lugar a un grado variable de deterioro del aislamiento térmico de las tuberías, incluyendo deformación geométrica, pérdida de protección externa, reemplazo, e incluso la pérdida del mismo. Como consecuencia, la operación de la red de transporte de vapor fuera de sus especificaciones de diseño y la filosofía de operación, constituyen algunos de los factores que afectan su desempeño.

Una revisión de la literatura pertinente parece indicar que los análisis energético-exergéticos de las redes de transporte de vapor de campos geotérmicos se iniciaron con el análisis de una red de seis pozos del campo de Larderello (Marconcini y Neri, 1979), y posteriormente se publicaron estudios similares de otros campos geotérmicos (Bettagli and Bidini, 1996; DiMaria, 2000; White and Morris, 2000; Quijano, 2000; Kwambai, 2005; Kaplan and Schocet, 2005; Aqui et al., 2005; Ozturk et al., 2006). Otros modelos (Schroeder, 1982; Marconcini and Neri (1979) incluyeron metodologías de cálculo de temperaturas de la superficie de los aislantes térmicos y las pérdidas de calor en las tuberías variando diversos parámetros. Los modelos incluyeron los tres mecanismos de transporte de calor para la estimación de las pérdidas de calor en tuberías aisladas térmicamente.

Con relación a los campos geotérmicos nacionales, García-Gutiérrez et al. (2012, 2013) realizaron un análisis con el fin de mejorar el aprovechamiento de la energía producida en el CGCP y evaluaron el comportamiento térmico de la red del Campo Geotérmico de Los Humeros (CGLH), respectivamente. Previamente a estos estudios, Ovando-Castelar et al. (2012) estimaron las pérdidas de calor de la red del CGCP considerando en detalle el estado físico de los aislantes térmicos de toda la red. En los años 80, Peña (1986) y Peña y Campbell (1988) analizaron las pérdidas de calor en una tubería horizontal, aisladas térmicamente y de gran diámetro del CGCP. Sin embargo, estos estudios incluyeron tuberías relativamente cortas y un número pequeño de pozos comparado con el sistema actual del campo.

El presente trabajo describe un estudio energético-exergético de la red de transporte de vapor del CGCP con el fin de determinar su comportamiento térmico y la fuente de las principales pérdidas de energía. El análisis excluye las plantas de generación de electricidad.

2. Descripción de la red de transporte del CPGF

El CGCP es el campo de líquido dominante más grande del mundo con una capacidad instalada de 720 MWe y trece plantas generadoras de electricidad de tipo condensante, aunque su capacidad operativa actual es de 570 MWe. El campo se divide en cuatro áreas llamadas Cerro Prieto-1 (CPU), Cerro Prieto-2 (CPD), Cerro Prieto-3 (CPT) y Cerro Prieto-4 (CPC). El vapor separado que alimenta las unidades generadoras proviene de 165 pozos integrados y se transporta a las plantas mediante una compleja red de recolección de vapor que se compone de redes paralelas de alta (AP) y baja (BP) presión. Estas redes tienen longitudes de 92.1 km y 47.6 km, respectivamente, es decir 139.6 km en total, cuyos diámetros varían entre 8" y 48", y originalmente estaban aisladas con una capa de 2" de espesor de lana mineral o fibra de vidrio, recubiertas con lámina de aluminio o hierro galvanizado.

El vapor se separa en cada pozo y los vaporductos individuales transportan el vapor a los sub-colectores o colectores principales. La red tiene varios arreglos para separar el vapor. CPU tiene

separación de vapor de AP únicamente, mientras que CPD, CPT y CPC tienen separación de vapor de AP y BP. En CPD existen “sitios” donde se separa vapor de AP y el agua separada se envía al separador de BP junto con la salmuera de otros pozos vecinos. En CPC existen “islas” de separación, consistentes en áreas cuadradas divididas en cuatro módulos. Cada módulo tiene cuatro separadores de AP, cada uno de los cuales recibe el flujo bifásico producido por un pozo para obtener el vapor de AP. Enseguida, el agua separada en los cuatro separadores se mezcla y envía a un separador para obtener vapor de BP. Existen también pozos auxiliares que no producen vapor pero cuyas instalaciones se usan para separar el vapor del fluido producido por algún pozo vecino.

La red es altamente compleja. CPU tiene ocho ramales o colectores de AP mientras que CPD, CPT y CPC tienen ramales paralelos de AP y BP, dos por cada área del campo. La red de transporte tiene varias interconexiones entre las áreas del campo para asegurar un suministro adecuado de vapor a las plantas de generación. La gran mayoría del agua separada se envía finalmente a una laguna de evaporación solar vía canales abiertos, pero una parte del agua es re-inyectada al yacimiento, ya sea caliente o fría. La Figura 1 muestra la red de transporte de vapor del CGCP.

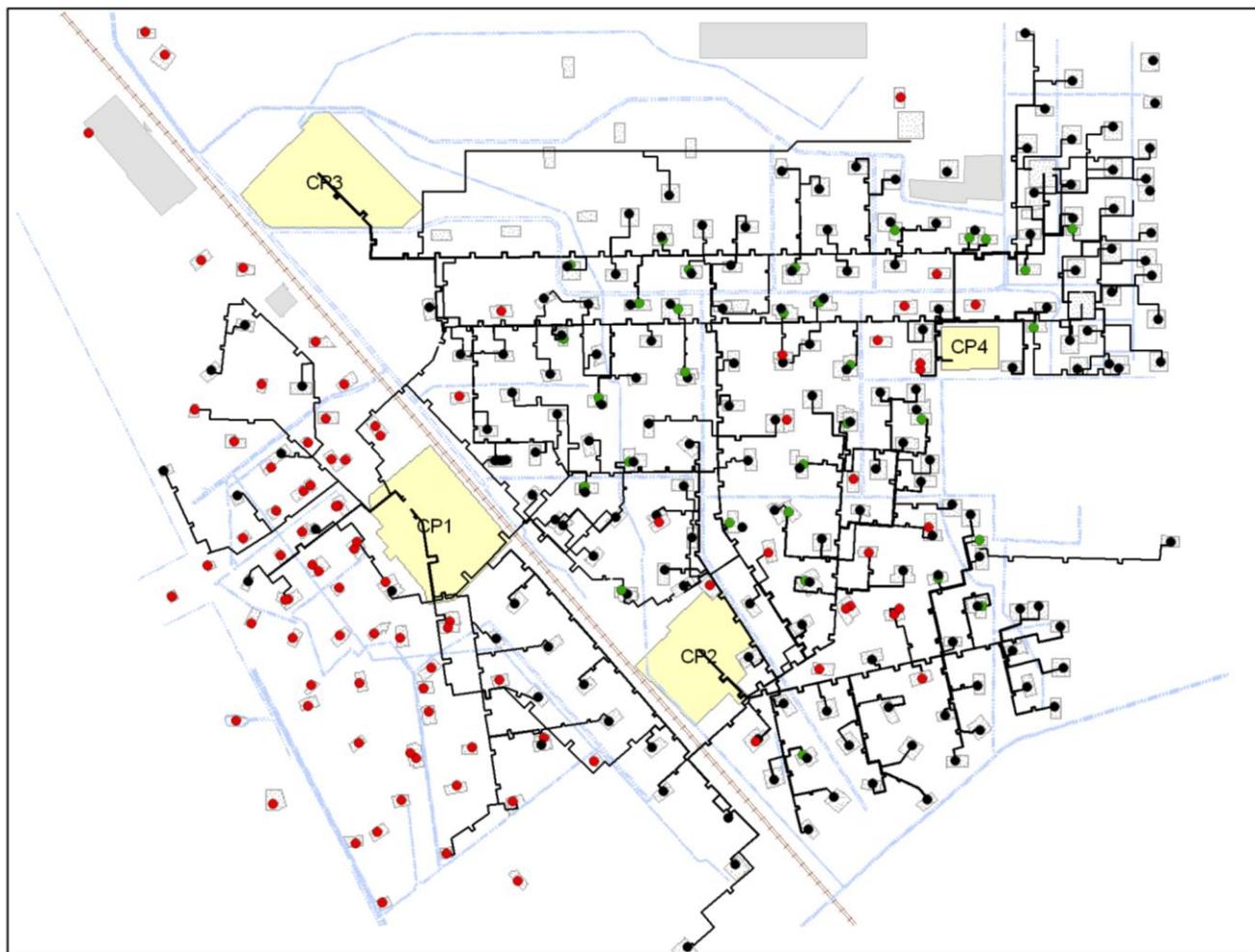


Figura 1. Red de transporte de vapor del CGCP.

3. Metodología

3.1 Energía y exergía

Los flujos de energía y exergía se definen (DiPippo, 2005) como sigue:

$$e_n = \dot{m}h \quad (1)$$

$$e_x = \dot{m} [(h_i - h_o) - T_0 (s_i - s_o)] \quad (2)$$

donde e_n denota energía, e_x exergía, h entalpía, \dot{m} flujo másico, s entropía y T temperatura. El subíndice 0 denota el estado de referencia o condiciones ambientales, y el subíndice i indica las condiciones del sistema en el punto i .

Las eficiencias en términos de energía y exergía (1^a y 2^a Ley de la Termodinámica) están dadas por:

$$\eta_{e_n} = e_{n_s}/e_{n_e} \quad (3)$$

$$\eta_{e_x} = e_{x_s}/e_{x_e} \quad (4)$$

donde η denota eficiencia y los subíndices e y s denotan entrada y salida, respectivamente.

3.2 Pérdidas de calor en las tuberías de la red

Las pérdidas de calor de las tuberías Q_p se calcularon mediante la Ec. (5) basada en la condición física de los aislantes. Para este propósito se midieron las temperaturas de la superficie de las tuberías y los aislantes térmicos.

$$Q_p = U A \Delta T \quad (5)$$

En la Ec. (5), U es el coeficiente global de transferencia de calor, A es el área superficial y ΔT es la diferencia de temperaturas entre la superficie de la tubería o aislante térmico y el ambiente.

El coeficiente U depende de la longitud y el diámetro de cada tramo de tubería y de la condición física del aislante térmico. Como se mencionó anteriormente, el aislante térmico de algunas partes de la red de transporte de vapor presentó desgaste, distorsión geométrica, pérdida de su protección metálica, cambio o reemplazo de material e incluso pérdida total del aislamiento. Por ello, se realizó un inventario para conocer el estado físico de los materiales aislantes en toda la red para lo cual el estado físico de los aislantes se clasificó en cuatro tipos o niveles de calidad identificando cada tipo con una letra y un color, tal y como se muestra en la Figura 2.

3.3 Pérdidas de calor en accesorios

Las pérdidas de calor de los accesorios de las tuberías se estimaron con base en su información geométrica y las temperaturas medidas en la superficie de los mismos. Los cálculos se realizaron en dos partes ya que prácticamente todos los accesorios estaban desprovistos de aislante térmico. La primera considera que una porción del área superficial del accesorio (área base) pierde calor por convección y radiación de la misma manera en que lo pierde una tubería sin aislante. La segunda incluye el resto del área superficial (área secundaria) la cual se comporta como una aleta disipando

calor al ambiente por convección y radiación con una eficiencia térmica dada. Con estas consideraciones, las pérdidas de calor en los accesorios se estimaron con la ecuación 6:

Condición física del aislante	Clave	Color
Nuevo o completo	A	Azul
Bueno pero sin cubierta metálica	B	Verde
Regular o deteriorado	C	Ambar
Ausente, o totalmente destruido	D	Rojo

A



15/05/2009 12:40

B



15/05/2009 12:41

C



15/05/2009 12:42

D



15/05/2009 12:43

Figura 2. Clasificación de los materiales aislantes de la red de tuberías del CGCP

ocurren en las redes de AP y BP. Dicha pérdidas totales se calcularon a partir de los datos de operación a las entradas y salidas de ambas redes.

$$Q_d = Q_{net} - (Q_p + Q_f) \quad (8)$$

donde Q_{net} son las pérdidas totales de calor en las redes de AP y BP, y Q_d son las pérdidas de calor a través de los drenes de condensado.

4. Resultados

4.1 Eficiencia de la red de transporte de vapor del CGCP

Para la evaluación del desempeño del sistema de transporte de vapor se calcularon los flujos de masa, energía y exergía usando datos de operación y datos ambientales de una fecha dada. Estos flujos se evaluaron en tres puntos o fronteras del sistema: F1 (cabezales de pozos), F2 (salida de vapor y agua de los separadores primarios y secundarios), y F3 (en los puntos de entrega de vapor a las plantas de generación). Con estas cantidades conocidas, se determinaron las eficiencias parciales y globales de la red. La Figura 3 muestra esquemáticamente las fronteras mencionadas y los correspondientes flujos de

$$Q_{fit} = UA_p \Delta T + \eta_f A_f \Delta T \quad (6)$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor por convección y radiación, A_p y A_f son las áreas superficiales primaria y secundaria, y η_f es la eficiencia de la aleta. Para aletas de sección transversal rectangular, η_f está dada (Incropera et al., 2006) por:

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \quad (7)$$

y donde $m = (2w/kt)^{1/2}$ and $L_c = L + (t/2)$.

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

3.4 Pérdidas de calor a través de los drenes de condensado

Las pérdidas de calor en los drenes de condensado se obtuvieron restando las pérdidas de calor en las tuberías y accesorios de las pérdidas totales de energía que

masa, energía y exergía, mientras que la Figura 4 muestra las eficiencias obtenidas por la 1^a y 2^a Ley de la Termodinámica de los procesos parciales y globales.

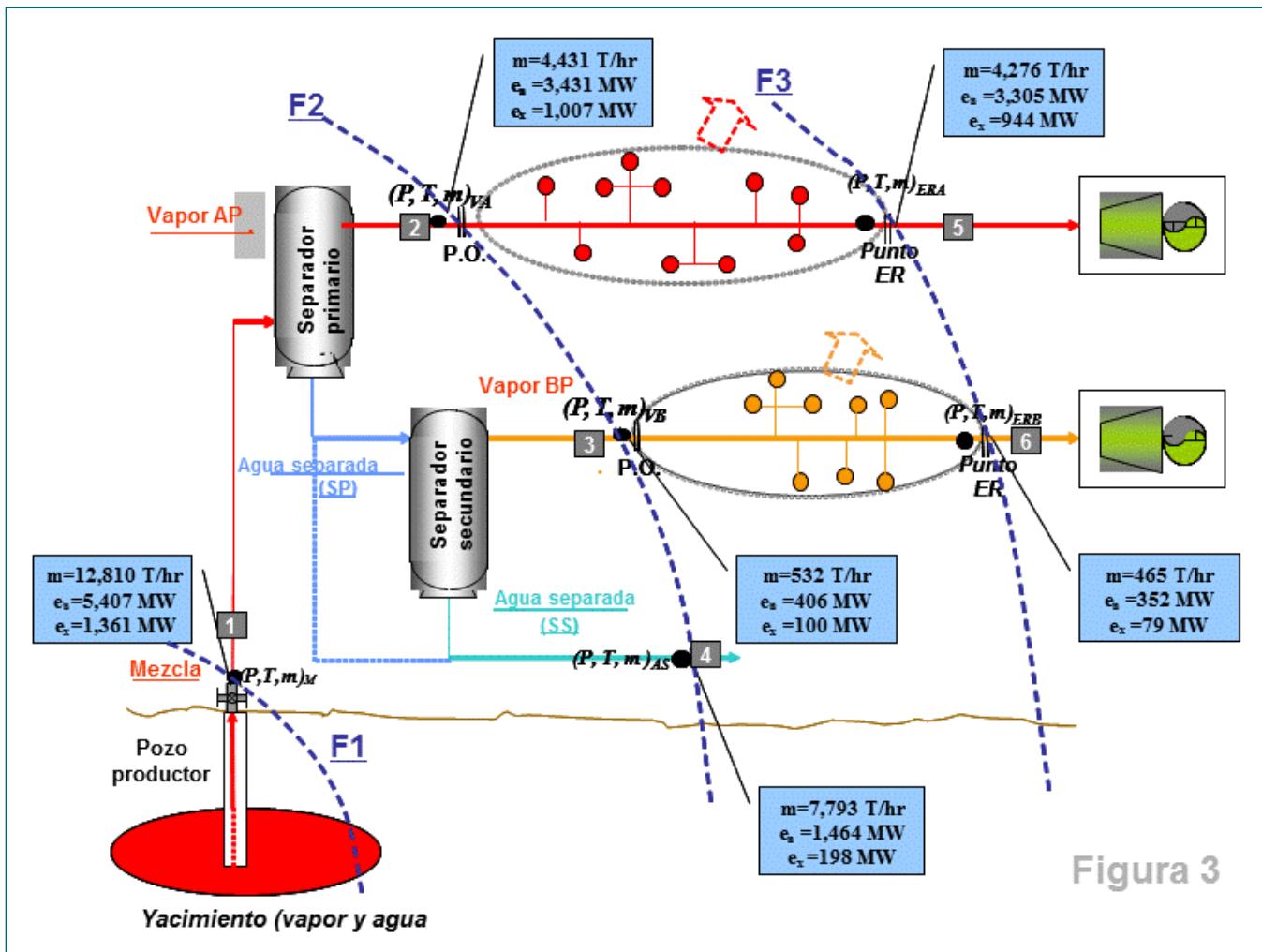


Figura 3. Flujos de masa, energía y exergía en la red de transporte de vapor del CGCP

La Figura 3 muestra que después de la separación de vapor, la red de AP transporta el 63.5 y el 74.0 % de la energía y exergía producida, respectivamente, mientras que la red de BP transporta el 7.5 y el 7.3% de la energía y exergía producida, respectivamente.

Es notorio que el 61% del fluido producido es agua líquida la cual transporta el 27% y el 14.5% de la energía térmica y la exergía producida. Las pérdidas de energía en las redes de AP y BP ascendieron a 126 MWt y 54MWt, respectivamente, o 180.6 MWt en total, mientras que las correspondientes pérdidas de exergía ascendieron a 63, 21 and 84 MWt, respectivamente. Las pérdidas de energía del proceso de separación ascendieron a 106 MWt.

La Figura 4 muestra que las eficiencias térmica y exergética de los procesos de separación (Fronteras F1 y F2) fueron 98.1 y 95.9%, respectivamente, mientras que el proceso global de transporte de vapor (fronteras F1 y F3) tuvo una eficiencia térmica de 67.6% y una eficiencia exergética de 75.2%. Las correspondientes eficiencias individuales de las redes de AP y BP fueron 96.3% y 93.7% (fronteras F2 y F3).

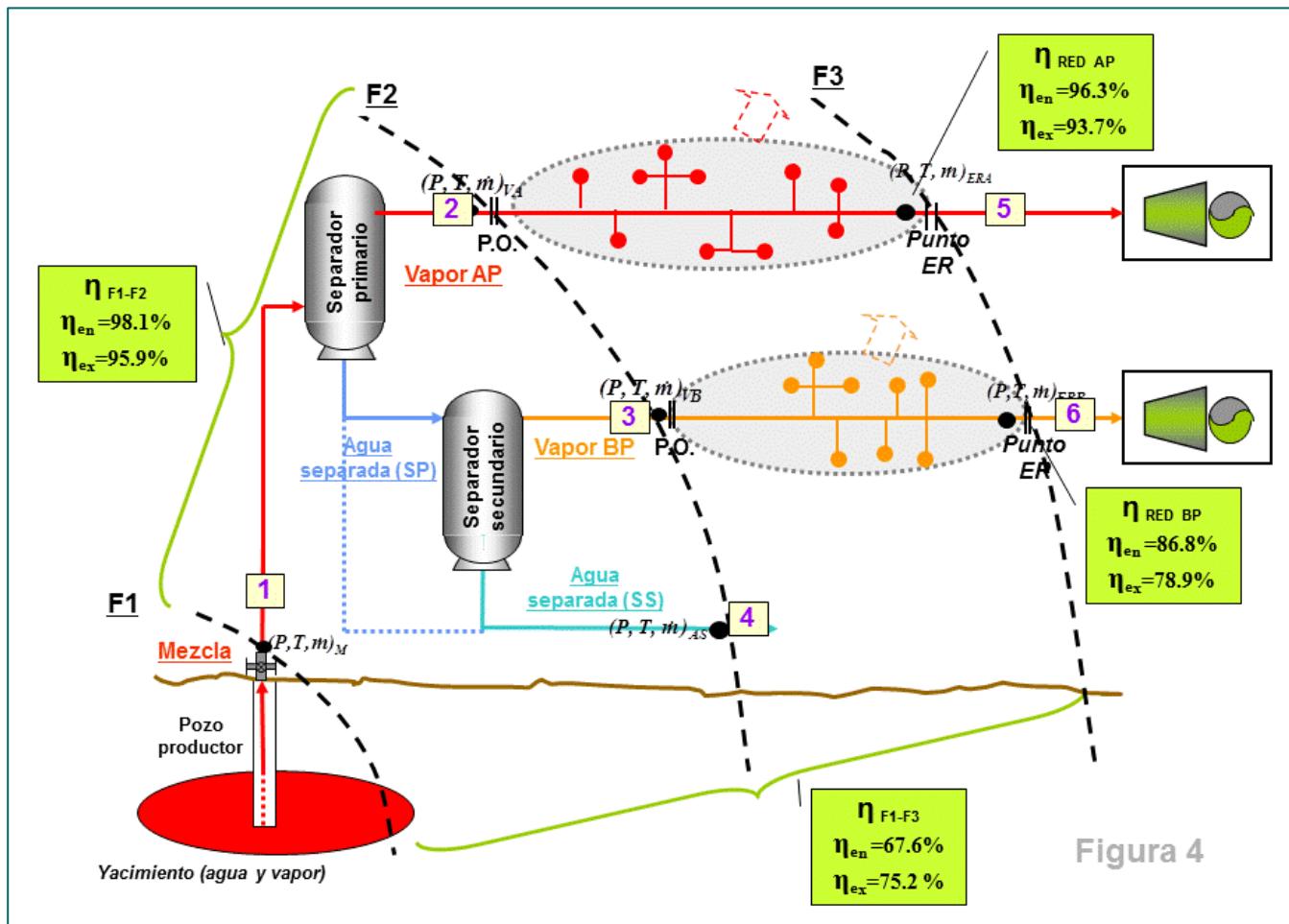


Figura 4. Eficiencias de la 1^a. Ley (energía) y 2^a. Ley (exergía) de la termodinámica de la red de transporte de vapor del CGCP.

4.2 Pérdidas de calor en las tuberías de la red

Los datos de los cuatro tipos o estados físicos de los aislantes térmicos de la red (descritos en la Figura 2) fueron recopilados en mapas impresos y luego alimentados a una base de datos creada en MS Excel, junto con los diámetros de las tuberías. Enseguida, la información se transfirió a un paquete de cómputo de Información geográfica (SIG) para crear mapas que ayudaron a identificar aquellas partes de la red donde las pérdidas de calor eran mayores y facilitaron la cuantificación precisa de las longitudes de tubería correspondiente a cada condición de los aislantes térmicos. Asimismo, se crearon mapas de los diámetros de las tuberías. El procedimiento descrito fue aplicado a las redes de AP y BP. La Figura 5 muestra el mapa que describe la condición física de los aislantes térmicos de la red de AP.

De acuerdo con el inventario, la longitud total de la red operativa de transporte de vapor es de 139.7 km, de los cuales 92.1 km (66%) corresponden a la red de AP y 47.6 km (34%) a la red de BP. En ambas redes, el 80-82% de su longitud total tenía aislamientos tipo A y B (buena condición) y el restante 18-20% aislamientos tipo C y D (condición regular o muy mala).

Conocidas la información de las longitudes y diámetros de las tuberías, la condición del aislamiento térmico y las condiciones de operación, se calcularon los coeficientes globales de transferencia de calor para cada condición del aislamiento térmico.

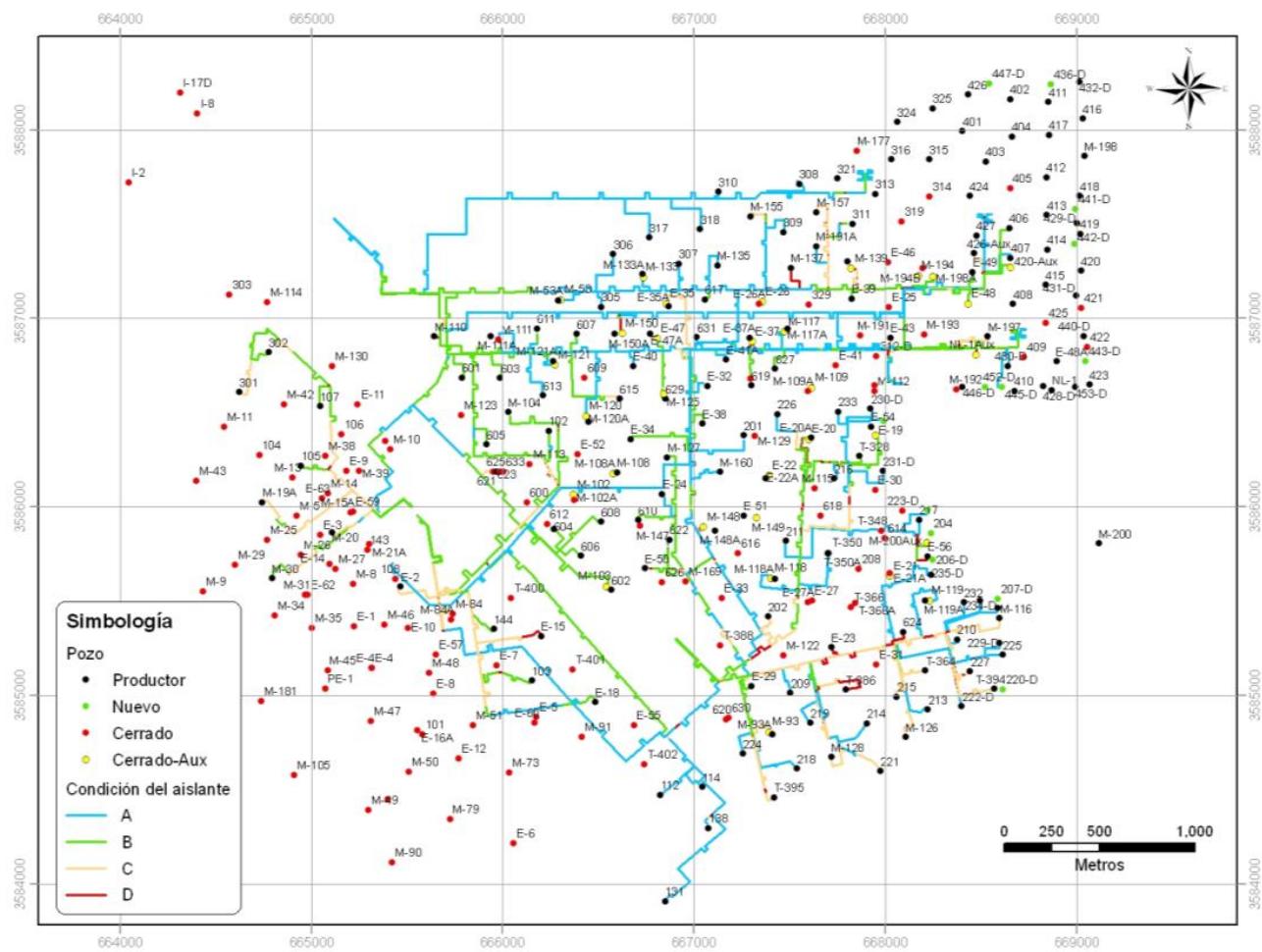


Figura 5. Mapa de la condición física de los aislantes térmicos de la red de AP del CGCP.

La determinación de este parámetro constituyó una tarea extremadamente compleja dada la gran variedad de diámetros de tuberías, diferentes condiciones de operación y condiciones físicas de los aislantes térmicos de toda la red. El cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor se hizo agrupando el CGCO en dos sectores: CPU y CPDTC (áreas de Cerro Prieto-2, 3 y 4), dado que CPU solo opera con vapor de AP pero sus presiones y flujos de vapor son menores que en CPDTC. Además, para el grupo de CPDTC los cálculos se hicieron por separado para las redes de AP y BP. Los cálculos para los aislantes tipo A, B y D se hicieron variando el flujo máscico de vapor y la presión.

Para la condición C (regular o deteriorado), los cálculos fueron mucho más complicados debido a la pérdida de geometría cilíndrica y espesor reducido, y la pérdida de algunas porciones del aislante. La temperatura de la superficie fue definida como un benchmark para el cálculo de pérdidas de calor. Esta temperatura se obtuvo promediando las temperaturas medidas usando dos cámaras termográficas infrarrojas y un termómetro de laser infrarrojo. Subsecuentemente, durante las simulaciones efectuadas con el programa basado en MS Excel, el espesor del aislante se fue reduciendo hasta que la temperatura teórica se ajustara a la temperatura promedio medida en campo. De esta manera, la reducción del espesor original del aislante relacionada con la condición física actual fue estimada en un 50% en promedio (Ovando-Castelar et al., 2012). La Tabla 1 muestra las pérdidas totales de calor de las redes de AP de CPDTC como función de la condición física del aislante. De esta misma manera, se estimaron las pérdidas de calor para la redes de CPU y de CPDTC de BP.

Tipo de tubería	Diámetro nominal [in]	Longitud de tubería [m]	Longitud A [m]	Longitud B [m]	Longitud C [m]	Longitud D [m]	Condición A [kWt]	Condición B [kWt]	Condición C [kWt]	Condición D [kWt]	Pérdida de calor [kWt]
Pozo individual	14.00	1549.34	370.82	0.00	905.49	273.03	79.37	0.00	353.41	1052.70	1485.47
	16.00	5689.23	1333.12	1824.25	2079.90	451.97	326.55	453.62	935.32	1998.84	3714.32
	18.00	3459.79	990.57	1745.41	675.31	48.50	264.92	474.28	332.41	222.21	1293.82
	20.00	18851.48	12547.73	3856.78	1697.74	749.23	3711.44	1160.07	927.91	3757.97	9557.39
	22.00	306.67	0.00	0.00	306.67	0.00	0.00	0.00	175.11	0.00	175.11
	24.00	322.92	320.92	0.00	0.00	2.00	122.11	0.00	0.00	11.26	133.36
SubTotal		30179.43	15563.16	7426.44	5665.10	1524.73	4504.39	2087.97	2724.16	7042.97	16359.48
Sub-colector	14.00	244.54	0.00	244.54	0.00	0.00	0.00	53.49	0.00	0.00	53.49
	18.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	20.00	1972.23	908.30	562.66	501.27	0.00	269.69	169.90	276.27	0.00	715.87
	22.00	531.76	0.00	518.85	0.91	12.00	0.00	169.60	0.55	70.85	240.99
	24.00	1388.18	442.49	378.84	549.85	17.01	169.18	148.08	390.94	108.80	817.00
	28.00	877.08	225.94	462.70	188.43	0.00	98.97	207.54	154.23	0.00	460.74
	30.00	2111.73	2098.92	12.81	0.00	0.00	977.43	6.11	0.00	0.00	983.54
	32.00	214.93	116.80	97.54	0.59	0.00	57.61	49.33	0.54	0.00	107.48
	36.00	785.65	0.00	785.65	0.00	0.00	0.00	441.69	0.00	0.00	441.69
SubTotal		8126.09	3792.46	3063.58	1241.05	29.01	1572.88	1245.74	822.53	179.64	3820.80
Colector principal o ramal	18.00	604.24	53.51	542.72	0.00	8.00	14.52	149.65	0.00	41.20	205.36
	22.00	329.13	0.00	284.41	0.00	44.72	0.00	93.58	0.00	269.79	363.37
	24.00	941.87	159.68	512.35	188.40	81.44	60.89	199.73	133.66	525.40	919.68
	26.00	173.40	0.00	164.94	0.00	8.46	0.00	68.91	0.00	58.06	126.97
	28.00	2914.24	23.79	2323.34	476.79	90.32	10.35	1035.16	387.84	655.56	2088.92
	30.00	24.67	24.67	0.00	0.00	0.00	11.39	0.00	0.00	0.00	11.39
	32.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	34.00	252.22	0.00	157.89	93.75	0.59	0.00	83.20	90.46	4.93	178.60
	36.00	14093.62	7669.79	5364.81	876.19	182.83	4135.02	2969.82	888.75	1596.63	9590.21
	38.00	1092.18	0.00	247.67	526.35	318.16	0.00	143.62	559.59	2888.49	3591.69
	40.00	4302.01	4110.24	164.24	17.97	9.57	2422.56	99.51	19.97	90.07	2632.11
	42.00	7588.06	7342.49	47.06	198.50	0.00	4508.94	29.72	230.07	0.00	4768.74
	44.00	1035.32	713.75	72.62	248.94	0.00	455.72	47.72	300.24	0.00	803.68
	46.00	7381.70	3648.47	3577.89	120.56	34.77	2417.40	2440.75	151.00	360.22	5369.38
	48.00	562.83	534.81	0.00	0.00	28.02	367.08	0.00	0.00	298.54	665.62
SubTotal		41295.49	24281.21	13459.95	2747.45	806.89	14403.87	7361.38	2761.59	6788.88	31315.71
TOTAL		79601.01	43636.82	23949.96	9653.60	2360.62	20481.14	10695.09	6308.27	14011.50	51496.00

Tabla 1. Pérdidas totales de calor en la red de transporte de vapor de AP de CPDTC del CGCP

La Tabla 2 presenta las longitudes, pérdidas de calor, velocidad equivalente de condensación de vapor y pérdidas de potencia generada para cada una de las redes individuales.

Área del campo	Longitud [m]	%	q [MW _t]	m [t/h]	q [MW _e]
Total CPU	12477.9	8.9	6.4	11.5	1.2
Total CPDTC-AP	79601.0	57.0	51.5	99.4	13.1
Total CPDTC-BP	47622.7	34.1	15.0	25.4	3.3
TOTAL CP	139701.6	100.00	72.9	136.3	17.6

Tabla 2. Pérdidas de calor estimadas, velocidad equivalente de condensación de vapor y pérdidas de potencia en la red de transporte de vapor del CGCP

Una comparación de estos resultados con las pérdidas totales de energía que ocurren en el sistema de transporte de vapor, los cuales ascendieron a 180.6 MWt (Fig. 3), (126.6 MWt y 54.0 MWt, redes de AP y BP, respectivamente), indica que las pérdidas de calor debido a la condición física de los aislantes representa aproximadamente el 46% y el 28% de la pérdida total de energía en las redes de AP y BP, respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, a partir de los resultados del inventario de la condición física de los aislantes térmicos, se concluyó que el 18-20% de las tuberías tienen aislantes de tipo C y D (condición regular a muy mala). Sin embargo, en estas ocurre prácticamente la mitad de las pérdidas de calor (48% en la red de AP y 43 % en la red de BP). Por este motivo, en un trabajo futuro se abordará el estudio técnico para minimizar estas pérdidas de calor y la evaluación económica del costo de la reparación o substitución de los aislantes.

4.3 Pérdidas de calor en los accesorios de la red

La estimación de las pérdidas de calor en los accesorios también representó una tarea compleja debido al gran número (cientos y hasta miles), variedad (válvulas, bridás, soportes de tuberías, etc.) y condiciones de operación (presión alta, media y baja y magnitudes de flujos). Para realizar los cálculos de las pérdidas de calor en los accesorios, se supuso que su temperatura superficial es la misma que la temperatura de vapor saturado correspondiente a la presión de operación; que la conductividad térmica de los accesorios es la misma que la de las tuberías y que la temperatura ambiente es la misma que la temperatura ambiente promedio del año anterior. Así, mediante la Ec. (6) y el programa y base de datos desarrollado en MS Excel, se obtuvieron los resultados típicos de los diferentes accesorios mostrados en la Tabla 3.

Accesorio	Dimetro	Class	r_1 [m]	r_2 [m]	t [m]	p [barg]	T _{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	U [W/(m ² ·°C)]	T _a [°C]	η [%]	A _r [m ²]	A _d [m ²]	Q [Wt]
Brida	10	300	0.137	0.222	0.048	3.935	151.4	49.603	18.101	23.8	92.462	0.475	0.429	2005.546
Brida	10	900	0.137	0.273	0.070	3.935	151.4	49.603	18.101	23.8	86.839	0.901	0.429	2797.867
Brida ciega	40	300	0.508	0.619	0.114	11.348	189.3	48.395	17.821	23.8	93.507	2.419	1.609	11417.540
Válvula de mariposa	20	300	0.254	0.387	0.064	4.494	155.5	49.665	15.020	23.8	90.114	1.280	1.164	4583.922
Válvula de esfera	36	300	0.457	0.635	0.111	4.017	152.1	50.800	7.417	23.8	94.500	2.860	0.243	2802.918
Registro-hombre	24	300	0.305	0.457	0.070	4.017	152.1	50.257	11.119	23.8	91.483	1.750	0.875	3531.679
Accesorio	Pipe diameter	L [m]	w [m]	t [m]	L _c [m]	m	p [barg]	T _{sat} [°C]	k [W/(m ² ·°C)]	U [W/(m ² ·°C)]	T _a [°C]	η [%]	A _r [m ²]	Q [Wt]
Soporte o pierna de tubería	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

Tabla 3. Pérdidas de calor típicas en los diferentes accesorios de la red de transporte de vapor del CGCP.

La Tabla 4 muestra las pérdidas totales de calor en los accesorios y soportes de las tuberías de la red de transporte de vapor del CGCP, expresadas en términos de energía, flujo equivalente de vapor condensado y potencia eléctrica equivalente.

Área del campo	Accesorios			Soportes de tuberías		
	Q [MWt]	m [t/h]	P [MWe]	Q [MWt]	m [t/h]	P [MWe]
Total CPU	0.38	0.66	0.07	2.74	4.69	0.62
Total CPDTC- AP	4.91	9.02	1.19	16.66	29.03	3.82
Total CPDTC- BP	0.93	1.58	0.21	7.71	13-13	1.73
Total CGCP	6.21	11.26	1.46	27.1	46.86	6.17

Tabla 4. Pérdidas totales de calor en los accesorios y soportes de las tuberías de la red de transporte de vapor del CGCP.

Se encontró que las pérdidas totales de calor en los accesorios y soportes de tuberías ascendieron a 33.3 MWt. Tomando en cuenta que las pérdidas de calor totales de las redes de AP y BP ascienden a 126.6 y

54.0 MWt, respectivamente, entonces las pérdidas combinadas de calor en los accesorios y soportes de las tuberías, representan 19.5% y 16.0% del total de cada red. Estas pérdidas de calor y la condensación equivalente de vapor se traducen en 7.63 MWe o 1.1% de la capacidad total instalada.

Con el fin de validar estos resultados, se compararon las temperaturas de superficies y las pérdidas de calor estimadas mediante las Ecs. (6) y (7) y el programa específicamente diseñado para este propósito en MS Excel, con las temperaturas medidas en campo mediante tecnología infrarroja y con los resultados de simulación de un modelo de elemento finito aplicado a los diferentes accesorios. La Figura 6 muestra el modelo y los resultados de modelado de una brida de 10" Clase 300. En este caso, las pérdidas de calor del modelo de elemento finito fueron 1,763.3 W mientras que las pérdidas estimadas con el programa basado en Excel fueron 1,785.3 W, dando una diferencia de 1.2%. Asimismo, la temperatura máxima resultante del modelado con elemento finito fue de 155°C, localizada en el contacto tubería, mientras que la temperatura estimada con el programa de Excel fue de 154.2°C.

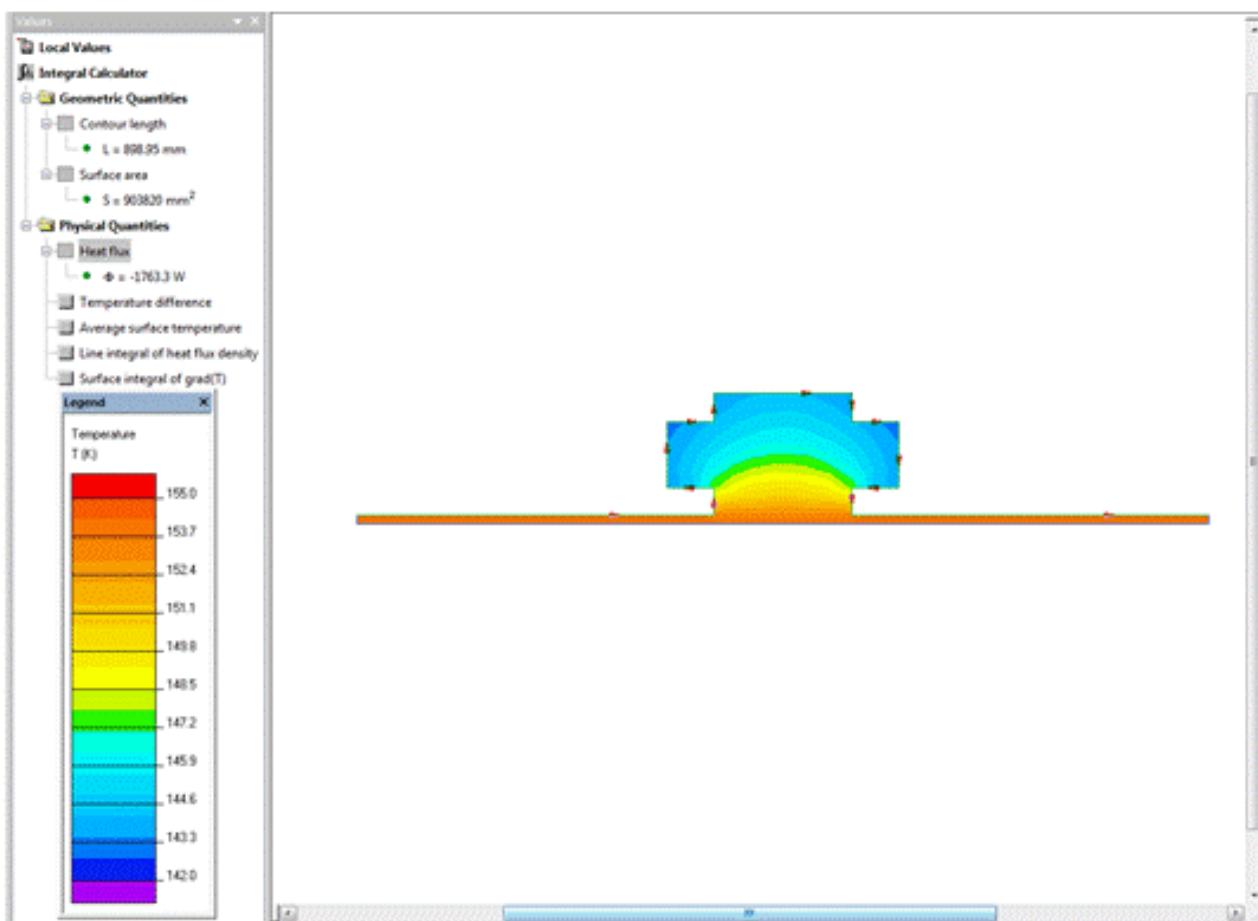


Figura 6. Modelo y resultados de pérdidas de calor y temperaturas en una brida de 10" Clase 300.

4.4 Pérdidas de calor en los drenes de vapor condensado

Las pérdidas de calor a través de los drenes de vapor condensado se estimaron empleando los resultados descritos en las secciones 4.1 a 4.3 y la Ec. (8) dando un total de 73.8 MWt, de los cuales

44.0 MWt corresponden a la red de AP y 29.4 MWt a la red de BP. La Tabla 5 muestra un resumen de las diferentes fuentes de pérdidas de calor en la red de transporte de vapor del CGCP.

Red de transporte de vapor	Pérdidas de energía debidas al transporte [MWt]	Pérdidas de calor en tuberías y aislantes térmicos [MWt]	Pérdidas de calor en accesorios y soportes de tuberías [MWt]	Pérdidas de calor en drenes de vapor condensado [MWt]
Red de AP	126.6	57.9	24.7	44.0
Red de BP	53.5	15.0	8.6	29.8
TOTAL	180.1	72.9	33.3	73.8

Tabla 5. Pérdidas de calor en las redes de transporte de vapor de AP y BP y las contribuciones de las pérdidas en tuberías, accesorios, piernas y drenes de vapor condensado.

4.5 Balance de energía de la red de transporte de vapor del CGCP

La Figura 7 muestra el balance global de energía de la red de transporte de vapor del CGCP. La figura incluye la energía total producida por todos los pozos, las pérdidas debidas al proceso de separación de vapor, la energía transportada por el vapor (AP y BP), las pérdidas de calor en las redes de transporte y la energía entregada a las plantas de generación. También incluye un balance de energía del agua separada y su disposición final.

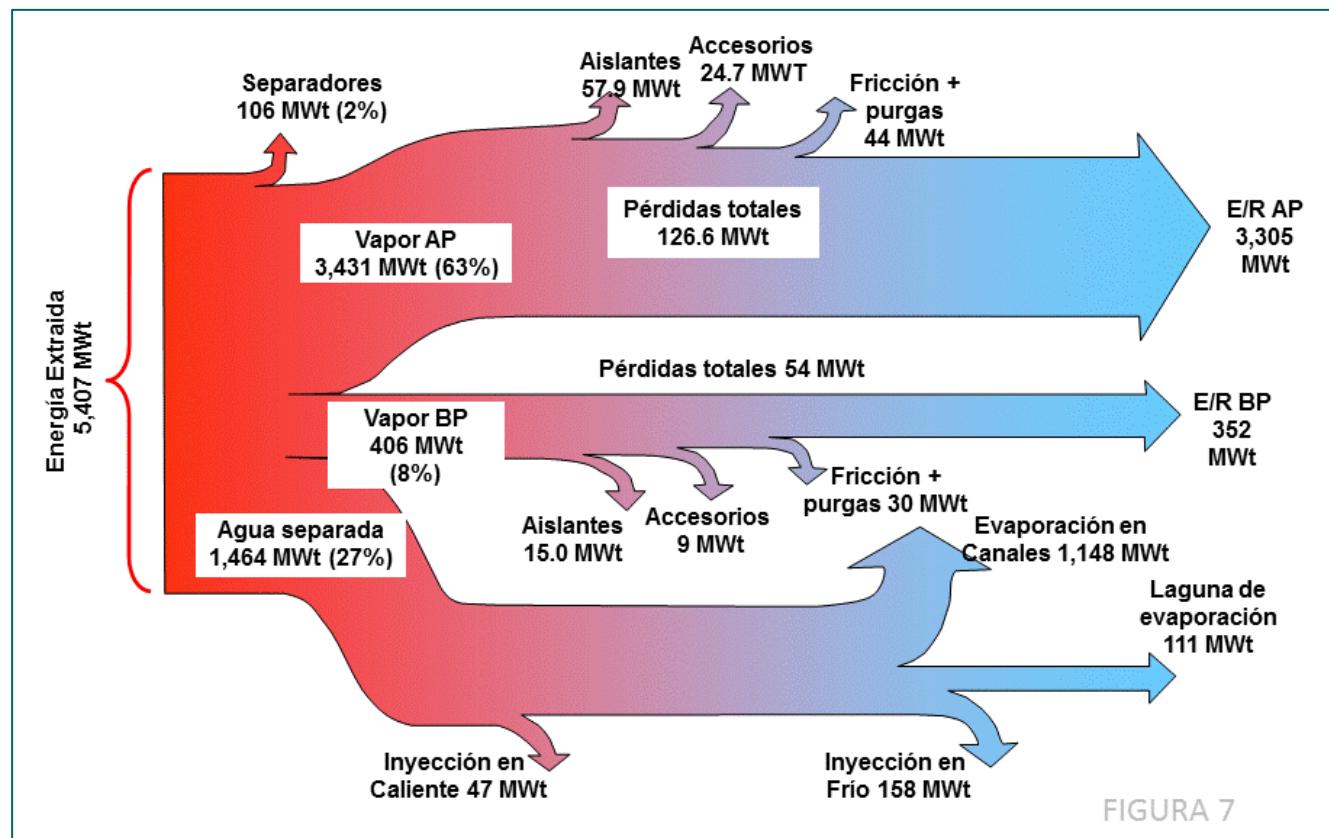


Figura 7. Balance global de energía de la red de transporte de vapor del CGCP.

Como lo indica gráficamente la Figura 7, es evidente que los procesos de separación y transporte de vapor representan áreas oportunidad para mejorar el aprovechamiento de la energía extraída del yacimiento, reduciendo las pérdidas de energía y la condensación de vapor.

5. Conclusiones

La eficiencia térmica y exergética (1^a y 2^a leyes de la termodinámica) del proceso de separación de vapor en el CGCP son bajas debido principalmente al efecto del orificio de producción, el cual reduce la presión del fluido en cabezal hasta la presión de separación, y a la falta de aislamiento de diversos elementos del cabezal del pozo. Las correspondientes eficiencias de los procesos global y parcial de transporte de vapor son afectadas por grandes pérdidas de calor causadas por la condición física o ausencia de aislantes térmicos de las tuberías y sus accesorios. Estas pérdidas de energía, a su vez, dan lugar a una cantidad sustancial de vapor condensado, menor disponibilidad de vapor de las unidades generadoras y al consecuente derrame de las mismas.

Las pérdidas de calor en el proceso de separación ascendieron al 1.9% (106 MWt) de la energía extraída del yacimiento, mientras que las pérdidas de energía del proceso global de transporte ascendieron al 4.7% (180.1 MWt) de la energía contenida en el vapor después de su separación. De estas pérdidas, aproximadamente el 70.2% (126.6 MWt) ocurrieron en la red de AP y el 29.8% (54.3 MWt) en la red de BP. Las tuberías contribuyeron con 45.7% (57.9 MWt) de las pérdidas de energía en la red de AP, los accesorios con el 19.5% (24.7 MWt), y el 34.8% (44.0 MWt) se perdió a través de los drenes de condensado. Las contribuciones correspondientes en la red de BP fueron de 28.1 % (15.0 MWt), 16.2% (8.6 MWt) and 55.7% (29.8 MWt), respectivamente.

Las pérdidas de energía en el transporte de vapor se deben principalmente al estado de deterioro o ausencia de los aislantes térmicos de las tuberías y accesorios. Aproximadamente el 18-20% de la longitud total de las tuberías de la red tenían aislantes térmicos de tipo C y D (es decir, deteriorado o de muy mala condición física) lo cual dio lugar a que las pérdidas de calor en estas tuberías alcanzaran el 48 y 43% de las pérdidas totales de calor en las redes de AP y BP, respectivamente. Por ello, se recomendó tomar acciones para restaurar la condición original de diseño o incluso mejorarla para aumentar la disponibilidad de vapor en las unidades generadoras y evitar pérdidas de generación de electricidad. La minimización de la pérdidas de calor en la red de transporte y la evaluación económica del costo de reparación de los aislantes tipo C y D se harán en un trabajo por separado.

Agradecimientos: Este estudio forma parte del proyecto “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”, realizado para la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) bajo el contrato CFE/I/SC/13391. Se agradece a las autoridades de la CFE y del IIE por el permiso y apoyo para publicar este trabajo.

Referencias

- Aqui, A.R., J.S. Aragones and A.E. Amistoso, 2005. Optimization of Palinpinon-1 production field based on exergy analysis – The Southern Negros geothermal Field Philippines. *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April, 7 pp.
- Bettagli, N., and G. Bidini, 1996. Larderello-Farinello-Valle Secolo geothermal area: Exergy analysis of the transportation network and of the electric power plants. *Geothermics*, Vol. 25, pp. 3-16.

- DiMaria, F., 2000. Design and off-design pipe network geothermal power plant analysis with power pipe simulator. *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, pp. 1223-1235.
- DiPippo, R., 2005. *Geothermal power plants: principles applications and case studies*. Butterworth-Heinemann, 2nd ed., Boston, 450 pp.
- García-Gutiérrez, A., J.I. Martínez-Estrella, R. Ovando-Castelar, I. Canchola-Félix, O. Mora-Pérez, and S.A. Gutiérrez-Espericueta, 2012. Improved energy utilization in the Cerro Prieto Geothermal Field fluid transportation network. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 36, pp. 1061-1066.
- García-Gutiérrez, A., J.I. Martínez-Estrella, R. Ovando-Castelar, A. Vázquez-Sandoval, and C. Rosales-López, 2013. Thermal performance of the Los Humeros geothermal field fluid transportation network". *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 37, pp. 709-713.
- Incropera, F.P., D.P. DeWitt and T.L. Bergman, 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Edition, Wiley, pp. 152-153.
- Kaplan, U., and D.N. Schchet, 2005. Improving geothermal power plant performance by repowering with bottoming cycles. *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 22 – 29 April, 4 p.
- Kwambai, C.B., 2005. *Exergy analysis of Olkaria I power plant, Kenia*. The United Nations University, Geothermal Training Program, Reports 2005, Number 5, Orkustofnun, Grensasvegur 9, Is-108, Reykjavik, Iceland, 37 p.
- Marconcini, R., and G. Neri, 1979. Numerical simulation of a steam pipeline network. *Geothermics*, Vol. 7, pp. 17-27.
- Ovando-Castelar, R., J.I. Martínez-Estrella, A. García-Gutiérrez, I. Canchola Félix, C.A. Miranda-Herrera, P. Jacobo-Galván, 2012. Estimation of the heat losses of the Cerro Prieto geothermal field steam transportation network based on the pipeline thermal insulation condition. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 36, pp. 1111-1118.
- Ozturk, H.K., AO. Talay, and A. Yilanci, 2006. Energy and exergy analysis of Kizildere geothermal power plant, Turkey. *Energy Sources*, Part A, Vol. 28, pp. 1415-1424.
- Peña, J.M., 1986. Energy losses in horizontal steam lines. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 10, pp. 347-252.
- Peña, J.M., y Campbell, H., 1988. Evaluación de las pérdidas de calor en líneas de vapor geotérmico. *Memorias del 3er. Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia*, Guanajuato, Gto., 4-7 Julio 1988, pp. 53-64.
- Quijano, J., 2000. Exergy analysis for the Ahuachapán and Berlín geothermal fields, El Salvador. *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000, pp. 861-865.

White, B. and G. Morris, 2000. Wairakei energy and efficiency audit. Technical report prepared for Contact Energy, Ltd., June, 19 p. Available at <http://www.nzgeothermal.org.nz/publications/studies/WairakeiEfficiencyStudy.pdf>.