Modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto

E. Salaices, A. García, J.I. Martínez, R. Ovando, M. Ceceñas, A.F. Hernández
Instituto de Investigaciones Eléctricas,
Av. Reforma 113 Col. Palmira. 62490, Cuernavaca, Mor. México.
salaices@iie.org.mx

I. Canchola, O. Mora, C. Miranda, M. Hernández, S. López, I. Murillo
Residencia de Ingeniería y Diseño de Cerro Prieto, Residencia General de Cerro Prieto
CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Mexicali, BC, México.

Regresar a Contenido

Resumen

La red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto está compuesta por un conjunto de 184 pozos, de los cuales 162 son pozos integrados, interconectados entre sí a través de una red de tuberías. Por medio de esta red se alimentan 13 unidades generadoras de electricidad con una capacidad total instalada de 720 MWe. La red tiene una longitud aproximada de 120 kilómetros y está compuesta por tuberías de diferentes diámetros, ramales, interconexiones, etc. La complejidad y extensión del sistema de vaporductos hace muy difícil el análisis del transporte y suministro de vapor a las plantas generadoras. Lo anterior creó la necesidad de contar con una herramienta que ayudara en el análisis del sistema con el fin de determinar el comportamiento global de la red y verificar la dirección y cantidades de flujo en cada uno de las interconexiones, colectores, ramales y sub-ramales. En este trabajo se presenta un modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, el cual permite determinar el comportamiento global de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y pérdidas de calor a través de los componentes del sistema. Además, el modelo permite el análisis del impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño, como es la integración de nuevos pozos. El modelo se desarrolló utilizando *PIPEPHASE 9.0*, el cual es un simulador numérico de flujo multifásico en estado estacionario con transferencia de calor, que permite modelar sistemas de tuberías y redes para el transporte de vapor y condensado.

Palabras clave: Cerro Prieto, vaporductos, modelado matemático, red de vaporductos, suministro de vapor.

Abstract

The steam-lines network of the Cerro Prieto geothermal field is composed by 184 wells, out of which 162 are integrated and connected among them through pipes. 13 power units, with an installed electric capacity of 720 MW, are fed by that network. The network length is 120 km, including pipes with several diameters, branches and inter-connections. The extension and complexity of the steam-lines system makes difficult to analyze the transport and supply of steam to toe power plants. For that it was necessary to have a tool capable to help in the analysis of the system, and let know the whole performance of the network as well as the direction and flow volumes in each part of the same. In this paper a hydraulic model of the Cerro Prieto steam-lines

network is presented. This model is capable to determine the whole performance of the network by quantifying the pressure-drops, flows and heat-losses in the components of the system. Besides, the model allows analyze the consequences of changes in the operation conditions, in some variations in the steam production, in maintenance activities and design changes, like the integration of new wells. The model was developed using *PIPEPHASE 9.0*, which is a numeric simulator of multi-phase flow in steady state with heat transfer, and makes possible to model systems and networks of pipes for steam and condensate transport.

Keywords: Cerro Prieto, steam-pipes, mathematic model, network of steam-pipes, steam supply.

1. Introducción

El modelado de flujo en redes y líneas de vapor ha sido poco estudiado en general. En el caso del campo geotérmico de Cerro Prieto, los trabajos previos al presente estudio se limitan a: (a) el desarrollo de un modelo efectuado por la UNAM (Cruickshank *et al.*, 1990), en el cual se resuelve la ecuación de cantidad de movimiento considerando flujo adiabático, pero no permite estimar perfiles de temperatura y no considera flujo de condensado en purgas; y (b) los trabajos de Peña (1986) y Peña y Campbell (1988) quienes desarrollaron un modelo basado en la expansión politrópica del vapor a medida que fluye en una red horizontal de tuberías aisladas térmicamente. Los ejemplos mostrados incluyen tuberías de unos 1400 pies de longitud.

Otros trabajos relevantes incluyen el de Marconcini y Neri (1979) quienes describen un modelo para simular una red de 6 pozos que llevan vapor sobrecalentado a una turbina; Huang y Freeston (1992, 1993), quienes analizan una red de 4 pozos y una turbina, estudiando además el efecto de la rugosidad de las tuberías sobre los resultados de la simulación; Betaggli y Bidini (1996) quienes desarrollaron un código que simula el flujo del vapor desde el pozo hasta las turbinas, en una red de 32 pozos y 3 turbinas, y que se puede considerar como el estudio más detallado reportado en la literatura abierta.

Di Maria (2000), por su parte, desarrolló un código (*PowerPipe*) y estudió la problemática del comportamiento de las redes de tuberías debido al difícil cálculo de las curvas características de los componentes y de la operación fuera del punto de diseño. El análisis se aplicó a un campo geotérmico pequeño que consta de 4 pozos y una turbina, comparando datos experimentales con resultados de simulación, los cuales fueron satisfactorios.

En este trabajo se describe la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto y se presenta un modelo hidráulico del Ramal 1 de Cerro Prieto Tres (CPT) y de Cerro Prieto Cuatro (CPC) usando el simulador numérico *PIPEPHASE*. El modelo permite determinar el comportamiento de esta parte de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y pérdidas de calor a través de cada uno de los componentes del sistema. Además, el modelo permite el análisis del impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño, como la integración de nuevos pozos. El modelo no toma ninguna decisión sobre cómo operar la red o sus componentes, pero sus resultados pueden ser analizados para determinar qué medidas se pueden tomar para mejorar su operación.

2. Descripción del campo geotérmico

Cerro Prieto se encuentra localizado a unos 40 kilómetros al sur de la ciudad de Mexicali, siendo el campo geotérmico de líquido dominante más grande del mundo. La primera planta inició operaciones comerciales para producción de energía eléctrica en 1973 y, hoy en día, tiene una capacidad eléctrica instalada de 720 MW. Cerro Prieto está compuesto por cuatro sectores denominados progresivamente Cerro Prieto Uno (CPU), Cerro Prieto Dos (CPD), Cerro Prieto Tres (CPT) y Cerro Prieto Cuatro (CPC). El campo tiene 4 plantas generadoras de 110 MWe, 4 de 37.5 MWe; 4 de 25 MWe y 1 de 30 MWe. Todas las unidades instaladas son de tipo condensante (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2005).

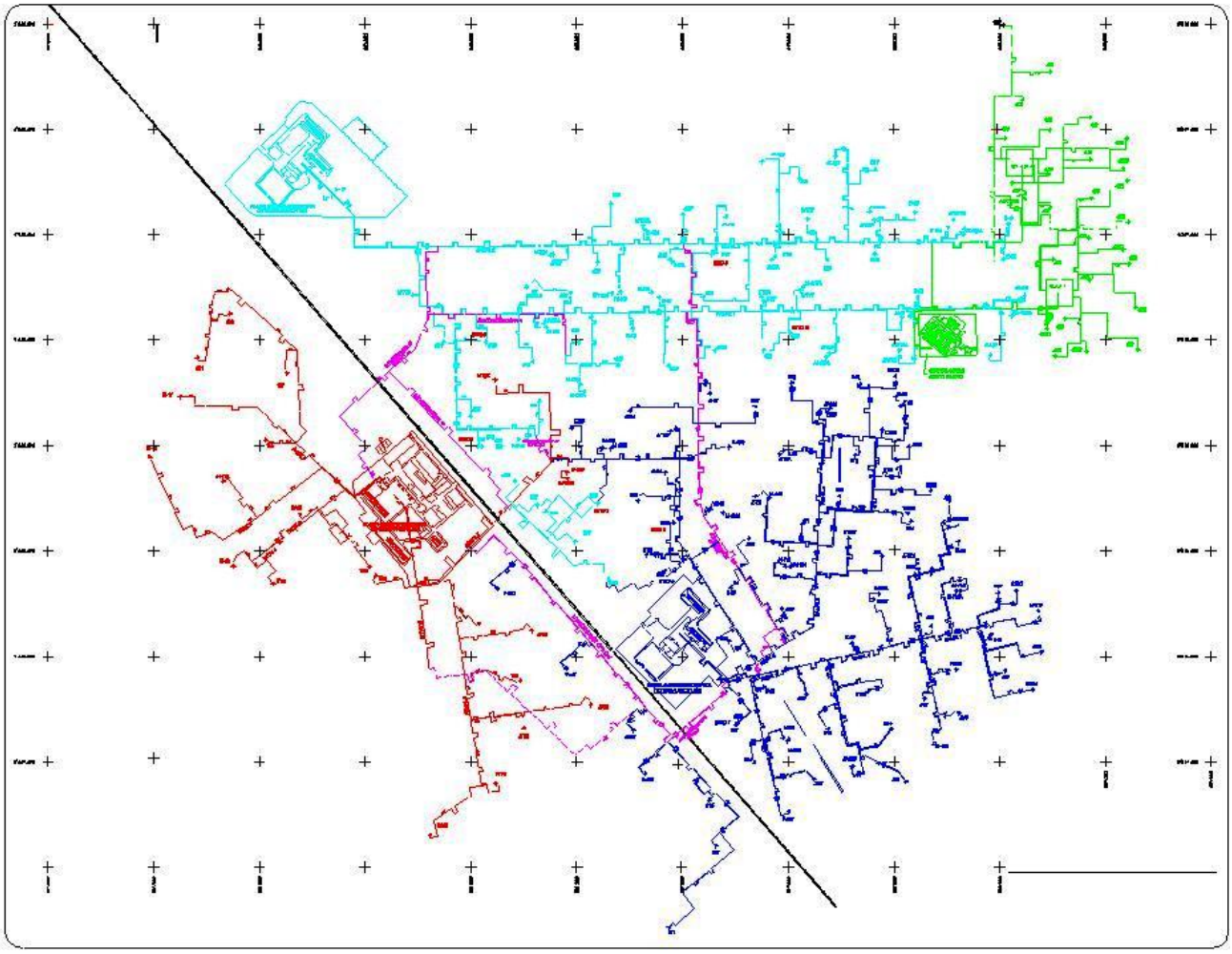


Figura 1. Red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto

Las plantas generadoras son alimentadas actualmente con vapor proveniente de 162 pozos productores integrados, el cual es conducido por medio de una red de vaporductos de unos 120 kilómetros de longitud. Los vaporductos tienen diámetros de entre 8” y 46” y 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 galvanizado. La red de vaporductos posee diversas interconexiones entre las distintas áreas del campo con el fin de proporcionar un suministro adecuado a las plantas de generación. Los ductos colectores del vapor se denominan ramales. CPU cuenta con 8 ramales de alta presión, mientras que para CPD, CPT y CPC existen ramales paralelos de alta y baja presión

(dos ramales por campo). Esta denominación proviene del tipo de separación: primaria o de alta presión, y separación secundaria o de baja presión. La Figura 1 muestra la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto.

A lo largo de los años, la gran cantidad de fluidos geotérmicos extraídos para el suministro de vapor a las plantas generadoras y la perforación e integración de nuevos pozos, ha resultado en un disminución de la presión, cambios en los procesos del yacimiento y aumento del flujo de enfriamiento subterráneo dentro del sistema geotérmico. Todo esto ha dado como resultado cambios en la producción de vapor de los pozos inicialmente integrados. Así, la complejidad del sistema de vaporductos, el cambio de las condiciones de operación y el mantenimiento e integración de nuevos pozos, hacen del suministro de vapor un problema difícil incluso para los ingenieros más experimentados.

3. Descripción del modelo

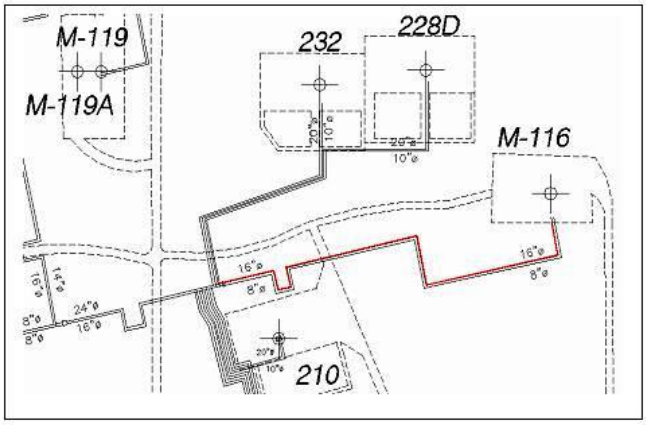
El desarrollo del modelo se llevó a cabo utilizando información de diseño, tales como geometría, materiales, accesorios, conexiones, aislantes, etc. (ver Figura 1), recopilada de información existente en diversos medios, como información adquirida y verificada directamente en campo. La configuración y dimensiones de casos particulares se tomaron directamente en campo teniendo como evidencia una memoria fotográfica. La información de la red se documentó a detalle en formatos compatibles con los requeridos por el simulador *PIPEPHASE*. Para ello, se diseñó una nomenclatura especial para facilitar la identificación de cada tramo de tubería de la red. La Figura 2 muestra un ejemplo de la documentación. La figura superior izquierda muestra la conexión desde la placa de orificio del pozo M-116 con el Ramal 1 de Alta Presión de CPD. La figura superior derecha muestra el soporte fotográfico de este ducto, y la parte inferior muestra los diferentes accesorios conectados en serie y las características de los mismos. Este formato de documentación es el usado en el simulador *PIPEPHASE*.

Para el coeficiente global de transferencia de calor se consideró la transferencia de calor a través de la pared del tubo y del aislamiento térmico. Se tomaron valores de las conductividades térmicas de los materiales involucrados en un rango promedio de temperaturas relacionadas con la operación de la red de vaporductos, estableciéndose un valor promedio para el coeficiente de transferencia de calor global de 1.5 W/m^2-K para tubos completamente aislados térmicamente.

4. Descripción del simulador numérico *PIPEPHASE* y otros modelos

El simulador *PIPEPHASE* es un simulador de flujo multifásico en estado estacionario y permite simular pozos, tuberías y redes de tuberías, tanto para el transporte de hidrocarburos como de agua y vapor. Este simulador cuenta con una interfaz de usuario que facilita la construcción de modelos y el análisis de resultados, además de un módulo para optimización de flujo en redes de conducción de fluidos.

Otros simuladores aplicables a la modelación de flujo de vapor en redes de vaporductos geotérmicos incluyen:





LINK NAME: **M116S01R1DA**

PLANO:
G 1-A, Rev. 0 "Plano General del Campo Geotérmico
Heat Transfer: U-Value

From: Pozo M–116, Placa de Orificio
To: Ramal 1 CPD (Alta Presión)

Device Name	Data Entry	On ?	Length [m]	Cont. Angle	Bend Type	Nominal Size	Nom. Thick	DI, in	Sche-dule	Rough-ness
M-116	Source									
0001	Pipe		18.80			16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0002	Bend				90 Elbow	16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0003	Pipe		108.69			16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0004	Bend				90 Elbow	16	.375	15.25	30/STD	0.0018
ACCESORIOS 0005 A 00015										
0015	Pipe		39.20			16	.375	15.25	30/STD	0.0018
0016	Valve			180	Gate Valve	16 - 300				
0018	Expansion		0.5			24				
0019	Pipe		3.7			24	.500	23.00	XS	0.0018
J001	Junction									

Fig. 2. Ejemplo de documentación de la información de la red de vaporductos de Cerro Prieto

(a) RELAP, un modelo robusto para flujo de agua y vapor en plantas nucleares, el cual no ha sido probado para flujo en redes de tuberías ni cuenta con interfaz de usuario;

(b) El modelo de la UNAM (Cruickshank et al., 1990), limitado a flujo adiabático y poco probado;

c) SIR3S, un modelo para simulación de flujo en redes de agua, gas natural y vapor que posee una interfaz en idioma alemán;

(d) SIM.SNET, una herramienta versátil para simular flujo de vapor y energía a través de una red de tuberías, accesorios, pozos y plantas de generación, que posee una interfaz gráfica para usuarios muy limitada y que ha sido probado en los campos geotérmicos de The Geysers, Kamojhang, y Japón (Hanano, 2005).

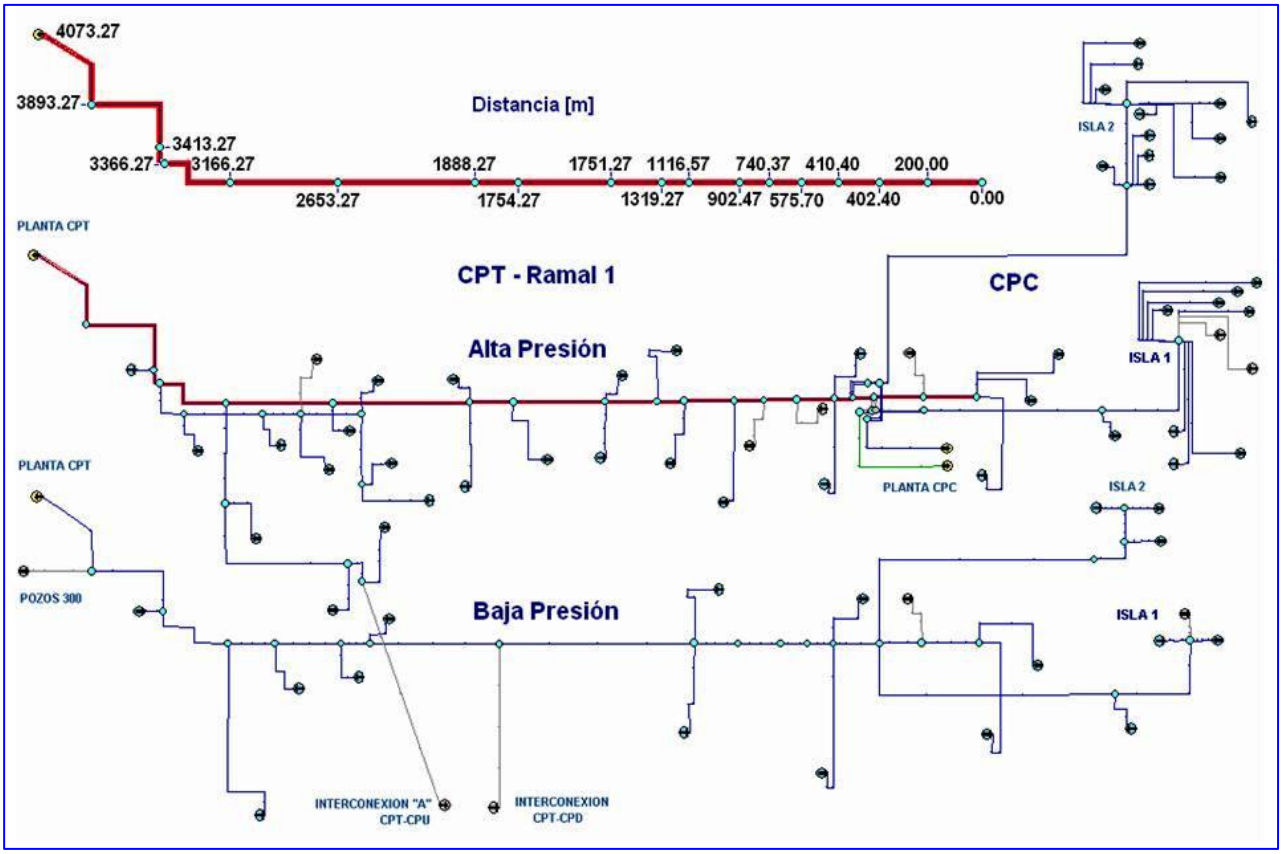


Fig. 3. Modelo hidráulico en PIPEPHASE de CPT Ramal 1 y CPC, Alta y Baja Presión

5. Análisis y discusión de resultados

En esta sección se presentan resultados preliminares del modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de CPT - Ramal 1 y CPC, usando el simulador numérico *PIPEPHASE*. La Figura 3 muestra esta parte de la red, así como la escala del Ramal 1 de Alta Presión de CPT, la cual tiene una longitud de 4073 m. Este ramal inicia del lado derecho de la figura y corre hacia la izquierda, hasta la planta generadora de CPT. Es alimentado por varios pozos en su inicio, y a una

distancia de unos 400 m existe una interconexión compleja de tuberías con las tuberías de CPC. En esta interconexión, las Islas 1 y 2 de CPC alimentan vapor, de manera que de la interconexión se envía vapor hacia CPT y CPC. Después de esta interconexión, el Ramal 1 de Alta Presión de CPT continúa hasta que a unos 3200 m se encuentra con la Interconexión A que une a CPT con CPU. Mas adelante, el ramal continúa hasta alcanzar la entrada de la planta generadora de CPT.

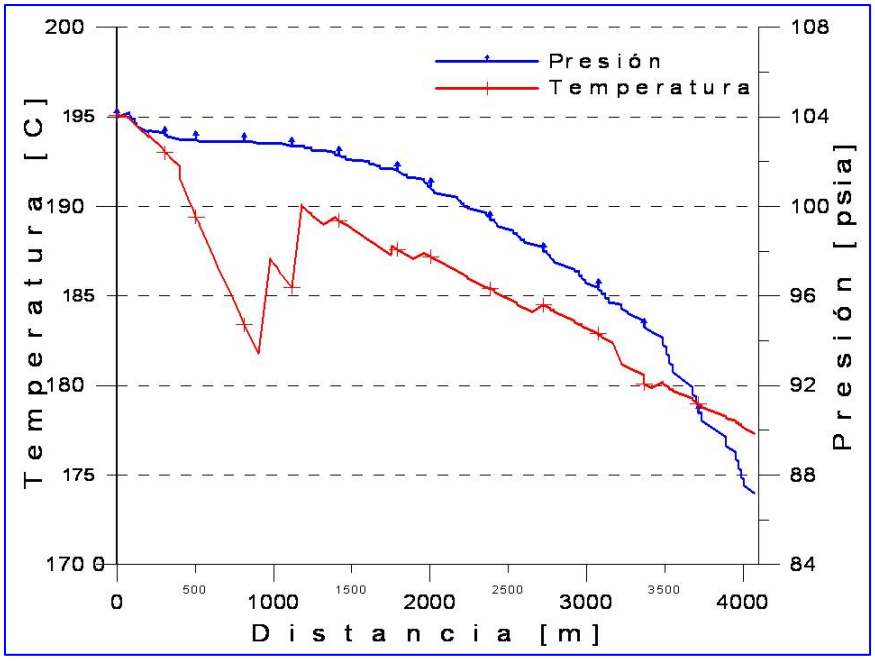


Fig. 4. Variación de la temperatura y la presión en el Ramal 1 de CPT

La Figura 4 muestra la caída de presión y temperatura del Ramal 1 de Alta Presión de CPT. Al inicio del ramal, la presión alcanza unas 195 psig y empieza decrecer al aumentar la distancia. Sin embargo, la presión decrece muy rápidamente a una distancia de unos 400 m, y cerca de los 1000 m alcanza unas 186 psig. Después la presión empieza a recuperarse y aumenta hasta 190 psig y de allí en adelante, decrece en forma más o menos lineal. La fuerte disminución de presión cerca de la interconexión con los ductos de CPC (400 m aproximadamente) parece estar asociada con la interacción del flujo de vapor proveniente de las Islas 1 y 2 de CPC. Esto contrasta con la leve disminución de presión en la interconexión de CPT con CPU (3200 m aproximadamente). Estos cambios de presión en las interconexiones parecen indicar que en la interconexión de CPT con CPC, el flujo de vapor es alto y fluye predominantemente hacia CPC, mientras que en la interconexión con CPU, el flujo de vapor hacia CPU es bajo.

El perfil de temperaturas mostrado en la Figura 4 es un perfil bien comportado, asociado con una tubería relativamente bien aislada térmicamente, indicando una pérdida de calor normal, asociada al flujo del vapor a lo largo del ramal. La caída de temperatura alcanza 21° C en este ramal.

La figura 5 muestra la variación del flujo de vapor y condensado a lo largo del Ramal 1 de CPT. Se observa que los primeros 3 pozos alimentan a este ramal con un flujo ligeramente superior a 100 toneladas por hora (t/h). De igual forma se observa un pequeño flujo de condensado a lo largo del ramal. El flujo de vapor se mantiene constante hasta que llega a un punto o nodo donde se conecta otro pozo que alimenta vapor al ramal. Nótese que no todos los pozos mostrados aportan vapor y por ello el flujo de vapor aparece constante en diversos tramos. Los pozos mostrados que no aportan vapor son pozos incluidos en el modelo porque en un futuro cercano dichos pozos serán integrados a la red.

El flujo de vapor que entra al inicio del ramal se mantiene prácticamente constante hasta unos 400 m, y allí el flujo cae bruscamente debido a que este vapor es arrastrado hacia CPC a través de la

interconexión mostrada en la Figura 3. De allí en adelante, el flujo de vapor sigue aumentando, hasta llegar a la planta generadora de CPT a los 4073 m, a donde llega con un gasto de más de 500 t/h. Es conveniente hacer notar dos partes donde la curva de flujo de vapor es horizontal, entre 500 y 1000 m, y entre 1500 y 2000 m, debido a que a los pozos conectados en esos tramos no aportan vapor.

Finalmente, es de notarse que el flujo de condensado se mantiene relativamente constante a lo largo del ramal.

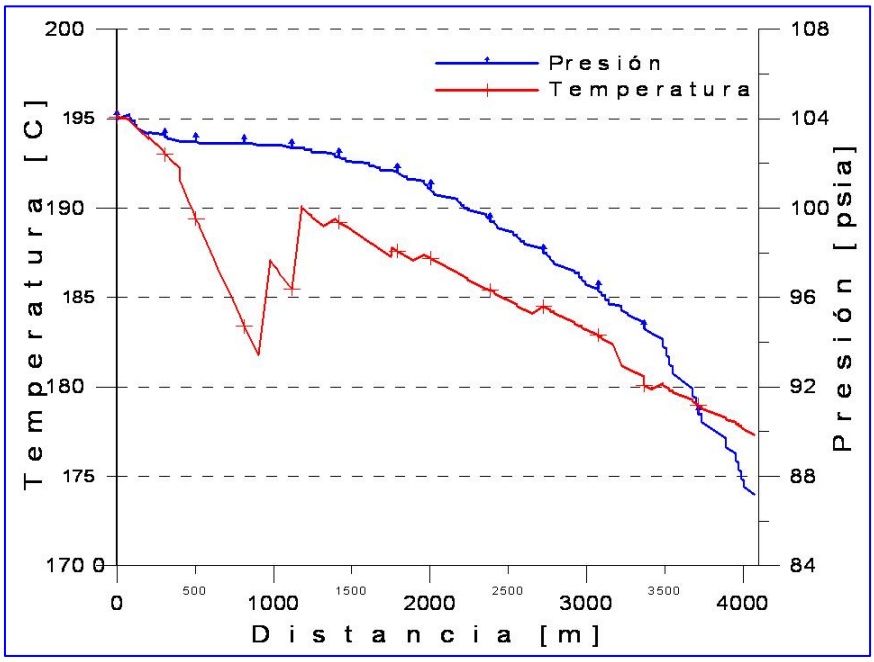


Fig. 5. Variación del flujo de vapor y condensado a lo largo del Ramal 1 de CPT

6. Conclusiones

Se ha presentado el desarrollo y documentación de un modelo hidráulico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto. También se presentaron resultados preliminares de simulación de flujo en el Ramal 1 de Alta Presión de CPT interactuando con el Ramal 1 de Baja Presión de CPT y con CPC, usando el simulador *PIPEPHASE*.

Posteriormente, la red completa será simulada usando el mismo simulador. El modelo de la red permitirá determinar el comportamiento global de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y sus direcciones, y las pérdidas de calor a través de cada uno de los componentes del sistema. Además, el modelo podrá ser usado para analizar el impacto de cambios en las condiciones de operación, variaciones locales y temporales en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño como lo es la integración de nuevos pozos. Los resultados obtenidos a la fecha son preliminares pero son indicativos de la alta complejidad del flujo en la red por la cantidad de pozos conectados, las características de la misma y las diversas interconexiones entre las diversas áreas del campo. Los resultados de simulación que se obtengan de la red, serán soportados con datos experimentales, con el fin de calibra el modelo numérico y validar sus resultados.

Agradecimientos

Se agradece a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, y del Instituto de Investigaciones Eléctricas las facilidades brindadas para la publicación del presente trabajo.

Referencias

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, No. 1, pp. 3-16.

Cruickshank, C., E. Ordóñez, y G. Castillo (1990). Modelo matemático de la red de vaporductos de la planta geotermoeléctrica de Cerro Prieto, UNAM, Informe del proyecto 9361. Inédito.

Di Maria, 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.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A., and J.L. Quijano-León (2005). Update on Geothermics in México. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey. 10 pp.

Hanano, M. (2005). Comunicación Personal.

Huang, Y., and D.H. Freeston (1992). Non-linear modeling of a geothermal steam pipe network. *Proceedings of the 14th New Zealand Workshop*, pp. 105-110.

Huang, Y., and D.H. Freeston (1993). Geothermal pipe network simulation sensitivity to pipe roughness. *Proceedings of the 15th New Zealand Geothermal Workshop*, pp. 253-258.

Marconcini, R., and G. Neri (1979). Numerical simulation of a steam pipeline network, *Geothermics*, Vol. 7, pp. 17-27.

Peña, J.M. (1986) Energy losses in horizontal steam lines. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 10, pp. 347-252.

Peña, J.M. y H. Campbell (1988). Evaluación de las pérdidas de calor en líneas de vapor geotérmico, *Memorias, 3er. Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia*, Guanajuato, México, pp. 53-64.