

## ***GeoSteamNet: Programa de cómputo para simular el flujo de vapor geotérmico de una red de vaporductos***

**Mahendra P. Verma<sup>1</sup>, Alfonso Aragón A.<sup>1</sup>, Alejandro Ruiz L.<sup>2</sup> y Alfredo Mendoza C.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, C.P. 62490, Morelos, México. Correo: [mahendra@ie.org.mx](mailto:mahendra@ie.org.mx), <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Campo Geotérmico Los Azufres, Campamento Agua Fría, Michoacán, México.

### **Resumen**

Se desarrolló un paquete de cómputo, *GeoSteamNet*, para simular el transporte del flujo de vapor en una red de vaporductos de un campo geotérmico. El movimiento del fluido se rige por los siguientes principios básicos: la conservación de la masa, el principio de movimiento lineal (segunda ley de Newton o las ecuaciones de Navier Stokes) y la primera y segunda leyes de la termodinámica. La segunda ley de la termodinámica permite definir la dirección de un proceso espontáneo, que está indirectamente validado en el algoritmo, debido a que el vapor fluye de alta a baja presión y el calor fluye de alta a baja temperatura. Las ecuaciones no lineales se resuelven con el método de Newton-Raphson. Utilizando el componente ActiveX *OrificeMeter*, se realizó el balance de masa para el flujo de vapor en las unidades de generación U-15 y U-16 del campo geotérmico de Los Azufres en febrero de 2009. La U-15 fue alimentada por los pozos productores AZ-04, Z-28, Z-30, AZ-65D, y AZ-66, mientras que los pozos AZ-28A, AZ-45, Z-56, Z-67 y AZ- 69D estaban conectados a la U-16. La diferencia entre la cantidad de vapor recibida en las unidades y producida por los pozos respectivos está dentro de  $\pm 4\%$ , lo cual es aceptable para fines prácticos para el suministro de vapor, tomando en cuenta las incertidumbres en varios parámetros tales como la presión, la temperatura, la fluctuación de la presión en el cabezal del pozo, entre otros. Los resultados de la simulación de una red hipotética de vaporductos de un sistema geotérmico con dos pozos productores y una planta de generación de energía eléctrica ilustran la funcionalidad de *GeoSteamNet*, mostrando varios puntos importantes a destacar. Para una geometría específica de las redes de vaporductos sólo hay una cierta cantidad de masa (vapor) que puede ser transportado a una presión dada de los pozos y de la planta generadora. La construcción y modificación de una red de vaporductos son muy costosas y la producción de pozos geotérmicos responde a los factores de su naturaleza, por lo tanto, hay necesidad de realizar un estudio de tolerancia de cada componente de la red. Un estudio de simulación de la red de tuberías virtuales durante el diseño de la planta energía geotérmica puede ahorrar dinero, esfuerzo y tiempo.

*Palabras clave:* *GeosteamNet*, *OrificeMeter*, ISO-5167-2, red de transporte de vapor, simulación numérica, campo geotérmico Los Azufres, Visual Studio.NET.

## ***GeoSteamNet: A Computer Code to Simulate Geothermal Steam Flow in a Pipeline Network***

### **Abstract**

A computer package, *GeoSteamNet* is developed to simulate steam transport in a pipeline network of a geothermal field. The fluid motion is governed by the following basic principles: conservation of mass, linear momentum principle (Newton's second law or the Navier Stokes equations) and the first and second laws of thermodynamics. The second law of thermodynamics defines the direction of a spontaneous process, which is indirectly validated in the algorithm as vapor flows from high to low

pressure and heat flows from high to low temperature. The nonlinear equations are solved with the Newton-Raphson method. Using the ActiveX component, *OrificeMeter*, the steam flow balance is performed for the power plants U-15 and U-16 of the Los Azufres geothermal field in February 2009. U-15 was fed by the production wells AZ-04, AZ-28, AZ-30, AZ-65D, and AZ-66, whereas AZ-28A, AZ-45, AZ-56, AZ-67, AZ-69D were connected to U-16. The analytical error is within  $\pm 4\%$ , which is acceptable for practical purposes of steam supply management considering the uncertainties in various parameters such as pressure, temperature, pressure fluctuation at the wellhead, etc. The steam simulation results for a hypothetical pipeline network of a geothermal system with two production wells and a power plant with GeoSteamNet illustrate its functionality, and present several important points to be emphasized. For a specific geometry pipeline network there is only a certain amount of mass (vapor) that can be transported at a given pressure at the wellhead of the wells and the power plant. The construction and modification of a pipeline network is very expensive and the production of geothermal wells depends on many natural factors; therefore, there is need to conduct a study of tolerance of each component of the network. A simulation study of the virtual pipeline network for the design of the geothermal power plant can save money, effort, and time.

**Keywords:** GeosteamNet, OrificeMeter, ISO-5167-2, steam transport network, numerical simulation, Los Azufres geothermal system, Visual Studio.NET.

## 1. Introducción

La simulación numérica de sistemas con componentes naturales tales como las plantas generadoras de energía eléctrica a partir de los recursos geotérmicos es un problema complejo; debido a que las características de los pozos productores son controladas por los factores naturales. El conocimiento de la simulación numérica del flujo de vapor en una red de vaporductos del sistema geotérmico es vital para la racionalización y optimización del vapor utilizado en la transformación de energía térmica a la energía eléctrica (Ruiz *et al.*, 2010). Hay dos aspectos fundamentales para ser contemplados dentro de la simulación del transporte de vapor en la red de vapor ductos: a) Consistencia interna en los datos termodinámicos del agua y b) El algoritmo apropiado.

La tendencia reciente en la simulación numérica de los sistemas es implementar los componentes ActiveX para las bases de datos termodinámicos de las sustancias (Span, 2000). En consecuencia, Verma (2003, 2009) desarrolló los componentes ActiveX, *SteamTables* y *SteamTablesIIE* para las propiedades termodinámicas del agua, basado en la formulación IAPWS-95 (Wegner y proß, 2002). En la simulación numérica de sistemas como el flujo de vapor en una red de tuberías del sistema geotérmico, los valores de las variables independientes (temperatura y presión) cambian de punto a punto. La malla espacial de una red de tuberías geotérmicas puede tener miles de puntos nodales. A través del proceso de iteración en el algoritmo de la red de vaporductos se establece el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua varias veces, lo que hace el cálculo muy lento. Tomando éstos en cuenta Verma (2010) implementó un control ActiveX *SteamTablesGrid* para acelerar el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua hasta 200 veces más rápido.

Enormes esfuerzos se han hecho en el mundo entero para comprender los mecanismos de transporte de vapor en las redes de vaporductos de campos geotérmicos (García *et al.*, 2009). Esto ha resultado en el desarrollo de varios programas de cómputo: VapStat-1 (Marconcini y Neri, 1979), FLUDOF (Sánchez *et al.*, 1987), Sims.Net (TS & E, 2005), etc. Todos los programas fueron escritos para resolver un problema específico, sin embargo no proporcionan resultados satisfactorios cuando se utilizan para diferentes condiciones de producción, incluso en el mismo campo. García *et al.* (2009)模拟aron el efecto de la topografía superficial de campo sobre el transporte de vapor en la red de vaporductos del

campo geotérmico Los Azufres con el uso de programas comerciales como Pipephase y Sims.Net. Ellos encontraron que el transporte de fluidos geotérmicos de la cabeza del pozo a las unidades de generación a través de las redes de tuberías afecta directamente la cantidad de electricidad generada.

Un grupo de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) desarrolló un programa de cómputo denominado *Generalized Fluid System Simulation Program* (GFSSP) para calcular la presión y el flujo en las redes complejas de fluidos (Majumdar, 1999). Verma y Arellano (2010) escribieron un programa de cómputo, PipeCalc en Visual Basic 6.0 para el flujo de vapor en una tubería utilizando el algoritmo de GFSSP, modificado para el flujo unidireccional. El método numérico para resolver las ecuaciones de la conservación de masa, momento lineal y energía es explicado por Patanker (1980) y Majumdar (1999).

En este artículo se presenta el desarrollo de un paquete de cómputo, *GeoSteamNet*, para la simulación del transporte de vapor en una red de vaporductos de un sistema geotérmico, escrito en Visual Studio.NET. Las propiedades termodinámicas del agua fueron calculadas a través de *SteamTablesGrid*. Se analiza una planta hipotética de un sistema geotérmico con dos pozos y una unidad de producción para ilustrar la aplicabilidad del paquete en el manejo y optimización del transporte de vapor.

## 2. Balance de vapor en el campo geotérmico de Los Azufres

El campo geotérmico de Los Azufres, Mich., cuenta actualmente con catorce unidades con una capacidad total instalada de generación de energía eléctrica de 188 MWe (García *et al.*, 2009). Los trabajos de ampliación de la capacidad productiva están aún en progreso. El campo se divide en dos partes: Tejamaniles en la zona sur (93 MW) y Marítaro en la zona norte (95 MW). La Figura 1 (al final del texto) muestra la ubicación de los pozos productores y las unidades en la zona norte (Marítaro) del campo. Se realiza la medición del caudal de vapor en las U-15 y U-16, y en los pozos productores conectados con ellas. La U-15 es alimentada por los pozos AZ-04, AZ-28, AZ-30, AZ-65D, y AZ-66, mientras que los pozos AZ-28A, AZ-45, AZ-56, AZ-67, y AZ-69D están conectados a la U-16.

La Tabla 1 presenta los datos medidos y los valores calculados del caudal de vapor para cada pozo y unidad. En el caso de la U-15, la producción total de vapor de los pozos conectados es 186.7 t/h, mientras que el vapor recibido en la unidad de generación es de 194.0 t/h. Hay una diferencia de 3.9%. Por otra parte, en el caso de la U-16, hay una diferencia de -2%. De acuerdo con lo anterior, el error global de las mediciones es de  $\pm 4\%$ . Desde el punto de vista práctico los resultados son satisfactorios. Sin embargo, las posibles razones de discrepancias son la incertidumbre en la medición de la presión y las condiciones del estado del vapor. El fluido geotérmico es separado en vapor y líquido en la boca de pozo. De esta manera, las condiciones de temperatura y presión del vapor en el cabezal del pozo caen dentro de la curva de saturación. De acuerdo con lo anterior, la medición de la presión o la temperatura es suficiente en el medidor de orificio del pozo; sin embargo, existe la necesidad de medir la temperatura y la presión en el medidor de orificio de la unidad.

Además, las fluctuaciones de presión en el cabezal del pozo pueden estar asociadas con algún proceso de depósito y/o existencia de especies gaseosas en la fase de vapor. Del mismo modo, la medición de la diferencia de presión en la placa del medidor de orificio es crucial. Por ejemplo, un error de 0.002 m de columna de Hg de agua en la placa de orificio de las centrales eléctricas U-15 o U-16 es equivalente a 1 t/h.

## 3. Simulación de flujo de vapor: *GeoSteamNet*

Pozo ó Unidad	Diámetro interno de tubería (m)	Diámetro de placa de orificio (m)	Presión aguas arriba de la corriente (Pa)	Dif. de presión (m de columna Hg- Aqua)	Caudal (t/h)
U-15 y sus pozos productores					
AZ-04	0.387	0.270	983855	0.056	37.8
AZ-28	0.387	0.1780	997644	0.218	32.5
AZ-30	0.387	0.270	1018328	0.041	32.8
AZ-65D	0.387	0.270	1011434	0.076	44.7
AZ-66	0.387	0.270	990749	0.058	38.8
Total de pozos					186.7
U-15	0.737	0.494	956276	0.142	194.0
U-16 y sus pozos productores					
AZ-28A	0.387	0.127	1094171	0.544	23.4
AZ-45	0.387	0.270	1018328	0.013	18.4
AZ-56	0.387	0.270	976960	0.107	52.0
AZ-67	0.387	0.270	1011434	0.023	24.6
AZ-69D	0.387	0.270	1011434	0.135	59.3
Total de pozos					177.7
U-16	0.737	0.494	956276	0.114	174.1

Tabla 1. Mediciones de flujo de vapor en las unidades U-15 y U-16, y en los pozos productores de cada unidad en la zona norte del campo geotérmico Los Azufres.

El programa de cómputo *GeoSteamNet* desarrollado para la simulación numérica del transporte de vapor en las redes de vaporductos de los sistemas geotérmicos está escrito en Visual Studio.NET. Los datos termodinámicos de agua se calculan a partir del control ActiveX, *SteamTablesGrid* (Verma, 2010) en lugar del componente ActiveX, *SteamTables* (Verma, 2003). La versión preliminar del programa *PipeCalc* para calcular el flujo de vapor en una tubería fue escrito en Visual Basic 6.0 (Verma y Arellano, 2010). El programa *PipeCalc* se reescribió en Visual Studio.NET y se denominó como *PipeLine*. Se define una variable estructural para almacenar todos los parámetros de entrada y calculados para la tubería. Esto permite transformar los datos de la variable estructural en un control ActiveX cuando la funcionalidad del programa ha sido probada.

### 3.1 Transporte de vapor en una línea

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático del elemento de volumen de control i entre los nodos i e i-1. Se considera una tubería horizontal de 1000 m; entonces en realidad no hay inclinación en el elemento como se muestra en la figura. Todos los parámetros de entrada están dados en la Tabla 2. Se realizó un cálculo preliminar con la variación de la longitud del segmento para 1.0, 10.0 y 100.0 m. No se observó diferencia apreciable en los resultados de la simulación usando longitudes de segmento de 1.0 y 10.0 m. De esta manera, se definió la división del vaporducto en 100 elementos (es decir, la longitud de cada segmento de 10.0 m) para todas las simulaciones. La disminución de la longitud de un segmento aumenta la precisión en los valores calculados, pero también aumenta el tiempo de ejecución.

Por lo tanto, siempre es útil realizar algunos cálculos preliminares con el objeto de optimizar los valores de los parámetros de entrada de acuerdo con los límites de confianza en la medición de estos parámetros. Esto puede acelerar los cálculos para obtener resultados confiables.

La Figura 3(a) muestra el comportamiento de temperatura y presión a lo largo de la tubería considerando tres casos: i) no hay pérdida de calor por conducción-convección, ii) un aislamiento de 0.05 m de espesor de la tubería con los parámetros que se indican en la Tabla 2 y iii) pérdida máxima de calor (es decir, sin aislamiento). Las condiciones de PT en el caso i se encuentran en la región de vapor sobrecalentado, mientras que las condiciones de P y T quedan dentro de la curva de saturación en los casos ii y iii.

Parámetro	Valor
<b>Línea de tubería</b>	
Longitud (m)	1000.0
Diámetro Interno (m)	0.3
Espesor (m)	0.005
Conductividad térmica ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ )	80.2
Rugosidad (m)	$2 \times 10^{-7}$
<b>Aislante</b>	
Espesor (m)	0.05
Conductividad térmica ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ )	0.043
<b>Coeficiente de transferencia de calor por convección</b>	
Entre vapor y tubería ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ )	30.0
Entre aislante y aire ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ )	6.0
<b>Flujo de entrada de vapor saturado</b>	
Presión (Pa)	$1.0 \times 10^6$
Caudal de flujo (kg/s)	10.0
Temperatura de Aire (K)	300.0
Tubería horizontal ( $Z=0$ )	

Tabla 2: Datos usados para la simulación del transporte de vapor en una línea.

La Figura 3(b) muestra la formación de agua a lo largo de la tubería durante el movimiento de vapor. Aunque el flujo de vapor es bastante rápido (aproximadamente 30 m/s), se forma una cantidad considerable de agua (alrededor de 5% en peso) a la salida de la tubería cuando esta no tiene aislamiento.

Muchas relaciones empíricas utilizadas en la mecánica de fluidos se basan en estudios de correlación de datos experimentales. Por ejemplo, el coeficiente de transferencia de calor por convección es altamente influenciado por las condiciones ambientales locales. Por lo tanto, es crucial la calibración del modelo numérico para un sistema real de estudio.

### 3.2 Transporte de vapor en una red de vaporductos

Para ilustrar la funcionalidad de *GeoSteamNet* se considera una red hipotética de vaporductos de un sistema geotérmico con dos pozos productores y una planta de generación de energía eléctrica, como se muestra en la Figura 4. Los pozos y las plantas están interconectados por medio de tres ductos que tienen los mismos parámetros geométricos.

*GeoSteamNet* está escrito para resolver un problema específico, pero la interfaz gráfica de usuario permite cambiar los valores de los parámetros de cada tubería, pozo y planta. Para agregar nuevos componentes en la red de vaporductos, se requiere un conocimiento básico en programación. Sin embargo, está en construcción una interfaz gráfica de usuario a fin de que la documentación y el diseño de la red se hagan en forma grafica y sencilla.

El procedimiento de cálculo utilizado en *GeoSteamNet* es el siguiente.

1. *Definición del pozo para inicio del cálculo:* un pozo que tiene una presión conocida puede ser considerado como punto de inicio del cálculo. En la red actual de vaporductos, la presión del pozo 1 es 1,100,000 Pa (Figura 4). Por lo tanto, se consideró éste como el punto para iniciar el cálculo.
2. *Suponer el valor de otros parámetros:* En los nodos fuente o demandas se requiere conocer la presión o caudal en una red de vaporductos. Si se conoce la presión, se supone el caudal y viceversa. Por ejemplo, la presión del nodo del pozo 1 es 1,000,000 Pa. Se supone el valor del caudal a 6 kg/s para iniciar el cálculo. Del mismo modo, se supone la presión de entrada del pozo 2 a 1,000,000 Pa. Se reduce considerablemente el tiempo de ejecución del programa con los valores supuestos al valor más cercano a la solución numérica; sin embargo, el usuario puede asignar cualquier valor o dejarlo en blanco.
3. *Cálculo y procedimiento de iteración:* Como se mencionó anteriormente, hay dos variables independientes entre la presión de entrada, la presión de salida y el caudal de flujo másico en una tubería. Por tanto, hay tres posibilidades para seleccionar las variables independientes: (i) la presión de entrada y el caudal, (ii) la presión de salida y el caudal, y (iii) la presión de entrada y la presión de salida. La clase *PipeLine* tiene un parámetro llamado *CalculationMethod* que se ha asignado entre 1 y 3 en función de cada situación.

En la red de vaporductos que se muestra en la Figura 4 el cálculo se inició en el pozo 1. Se calcula la presión de salida del tubo 1 considerando la presión dada de entrada y el caudal supuesto. Para el tubo 2 se asigna la presión de salida igual a la presión de salida calculada para el tubo 1. El cálculo se realiza teniendo en cuenta la presión de salida y el caudal. En el tubo 3 se calcula la presión de salida considerando la presión de entrada como la presión de salida en el tubo 1 y el caudal como la suma de los caudales de los tubos 1 y 2. El procedimiento consiste en iterar hasta que la presión de salida del tubo 3 es igual a la de la planta 1.

La Tabla 3 presenta los resultados de la simulación para dos casos: (a) cada tubería tiene los mismos parámetros que están dados en la Tabla 2 y (b) el diámetro del tubo 3 es diferente (es decir, todos los parámetros son los mismos que en el caso (a) excepto el diámetro del tubo 3 de 0.5 m en lugar de 0.3 m). Se observa un aumento en la capacidad del transporte de vapor con el aumento del diámetro del tubo 3. Esto valida el hecho bien conocido que las dimensiones del colector son muy importantes en la red de vaporductos.

La red de tuberías que se presenta aquí es muy sencilla. Sin embargo, los resultados de la simulación muestran varios puntos importantes a destacar. Para una geometría específica de las redes de vaporductos sólo hay una cierta cantidad de masa (vapor) que puede ser transportado a una presión dada de los pozos a la unidad de generación de energía eléctrica. La construcción y modificación de una red geotérmica de vaporductos es muy costosa y la producción de los pozos geotérmicos depende de factores de su naturaleza. Por lo tanto, hay necesidad de realizar un estudio de tolerancia para cada componente de la red. El programa *GeoSteamNet* permite realizar dicha tarea. De la misma manera, un

estudio de simulación de las redes virtuales de vaporductos es muy valioso para el diseño de una planta geotérmica, con lo cual puede operar eficientemente.

Escenario 1: Diámetro de tubo 3 = 0.30 m		Escenario 2: Diámetro de tubo 3 = 0.50 m	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Pozo 1		Pozo 1	
Presión (Pa)	1,100,000	Presión (Pa)	1,100,000
Caudal de flujo (kg/s)	12.72	Caudal de flujo (kg/s)	20.93
Pozo 2		Pozo 2	
Presión (Pa)	1,022,500	Presión (Pa)	858,594
Caudal de flujo (kg/s)	5.0	Caudal de flujo (kg/s)	5.0
Planta 1		Planta 1	
Presión (Pa)	800,000	Presión (Pa)	800,000
Caudal de flujo (kg/s)	17.12	Caudal de flujo (kg/s)	25.93
Vapor (kg/s)	17.09	Vapor (kg/s)	25.85
Líquido (kg/s)	0.03	Líquido (kg/s)	0.07

Tabla 3: Resultados del cálculo del transporte de vapor en una red de vaporductos

#### 4. Conclusiones

El paquete de cómputo *GeoSteamNet*, escrito en Visual Studio.NET, es útil para realizar los cálculos de la capacidad de transporte de vapor en una red de vaporductos de sistemas geotérmicos. Estos estudios permiten una optimización y racionalización de los recursos geotérmicos, y de esta manera un ahorro de dinero, esfuerzo y tiempo durante la planeación y construcción de una red de vaporductos.

El balance de masa calculado para las unidades de generación U-15 y U-16 del campo geotérmico de Los Azufres en febrero de 2009 está dentro del  $\pm 4\%$ . El programa *GeoSteamNet* permite la simulación de flujo de vapor y balance de masa en tiempo real, lo que apoyará al personal de operación de un campo geotérmico en la toma de decisiones oportunas.

#### Bibliografía

- García, A., Martínez, J.I., Hernández, A.F., Verma, M.P., Mendoza, A., Ruiz, A., 2009. Development of a hydraulic model and numerical simulation of Los Azufres steam pipeline network. *Geothermics*, 38, 313-325.
- Majumdar, A., 1999. *Generalized Fluid System Simulation Program (GFSSP) Version 3.0*. NASA, USA, Report No. MG-99-290, 441pp.
- Marconcini, R., and Neri, G., 1979. Numerical simulation of a steam pipeline network. *Geothermics*, 7, 17-27.
- Patankar, S.V., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation, USA, 197pp.
- Ruiz, A., Mendoza, A., Verma, M.P., García, A., Martinez, J.I., Arellano, V., 2010. Steam Flow Balance in the Los Azufres Geothermal System, Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia.

- Sánchez, F., Quevedo, M.A., De Santiago, M.R., 1987. Developments in geothermal energy in Mexico. Part eleven. Two-phase flow and the sizing of pipelines using the FLUDOF computer programme: *Journal of Heat Recovery System*-Chapter 7, 231–242.
- Span, R., 2000. *Multiparameter equations of state: an accurate source of thermodynamic property data*. Springer, Berlin, 376p.
- TS&E, 2005. *User's Manual for steam transmission network simulator*. Technical Software and Engineering, Richardson, TX, USA, 70 pp.
- Verma, M.P., 2003. Steam tables for pure water as an ActiveX component in Visual Basic 6.0. *Computers & Geosciences*, 29, 1155-1163.
- Verma, M.P., 2009. Steam Tables: an approach of multiple variable sets. *Computers & Geosciences*, 35, 2145-2150.
- Verma, M.P., 2010. *SteamTablesGrid*: An ActiveX control for thermodynamic properties of pure water. *Computers & Geosciences*, in press.
- Verma, M.P., Arellano, V.M., 2010. GeoSteamNet.2: steam flow simulation in a pipeline. *Proceedings Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.
- Wagner W., Prüß A., 2002. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31, 387-535.

## FIGURAS 1 A 4 EN LAS PÁGINAS SIGUIENTES

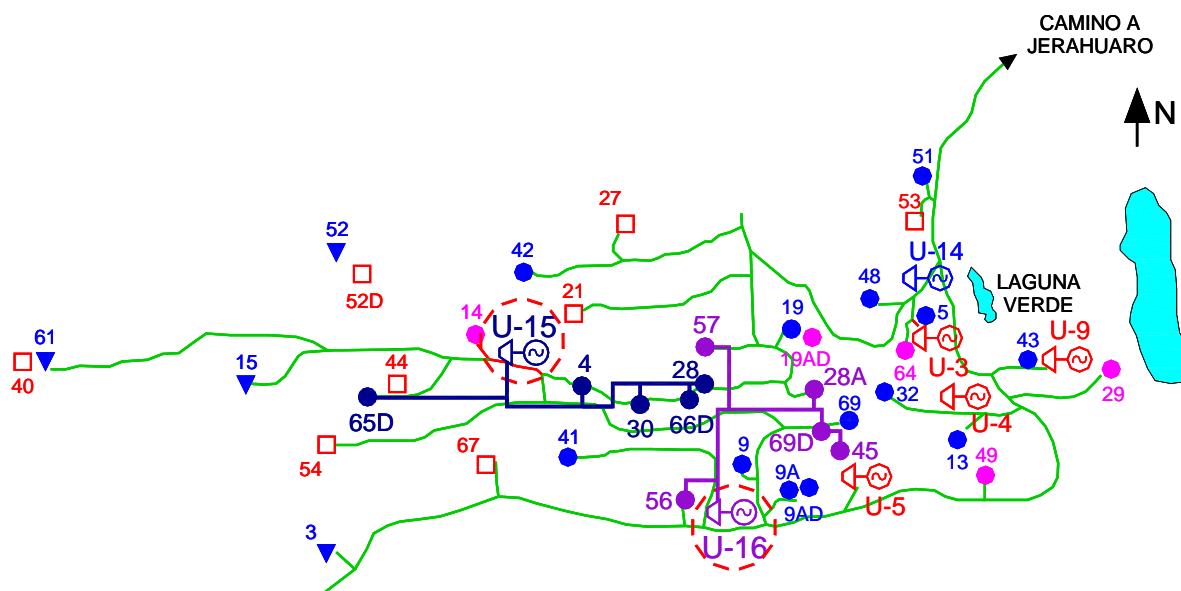


Fig. 1: Mapa de localización de la zona norte (Marítaro) del campo geotérmico de Los Azufres. Las unidades U-15 y U-16 están marcadas con círculos.

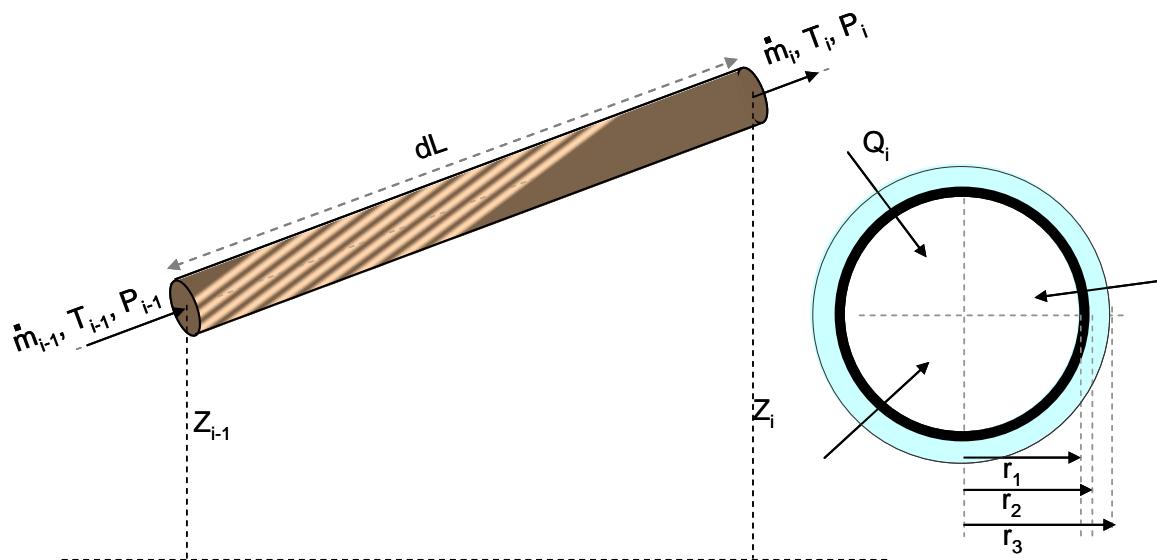
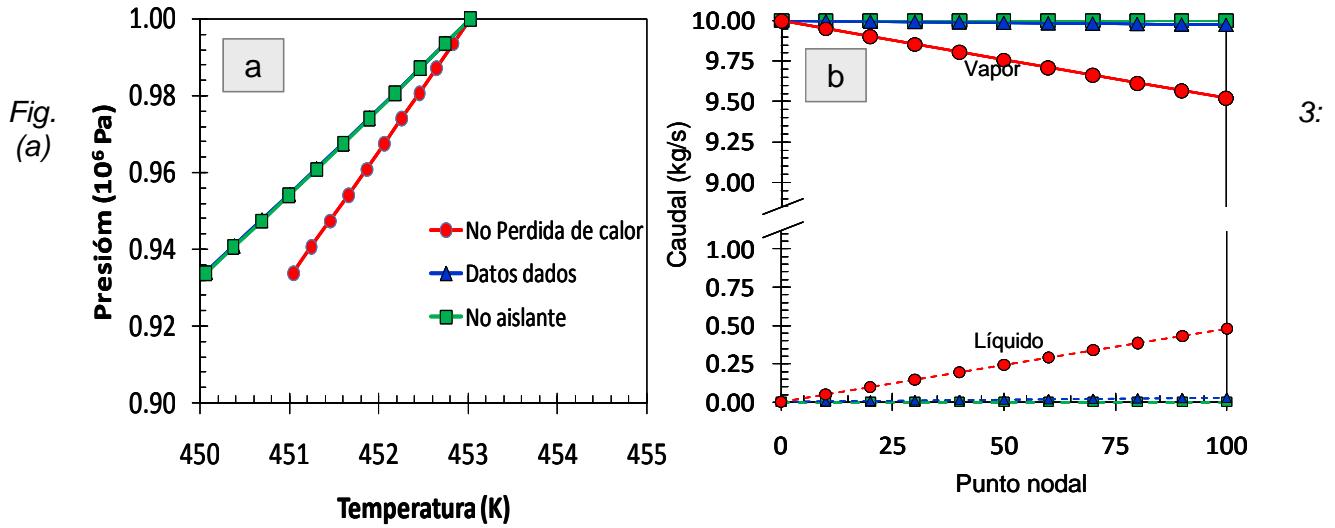


Fig. 2: Diagrama esquemático de elemento de volumen de control  $i$  de una tubería. Las variables,  $T$ ,  $P$ ,  $Z$ , y  $\dot{m}$  representan la temperatura, la presión, la altitud y velocidad de flujo de masa en los nodos  $i-1$  e  $i$ , respectivamente. La sección transversal del elemento muestra el valor positivo del flujo de calor  $Q_i$ . Los variables  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  son los radios de la parte interior y exterior de la tubería, y la parte exterior del aislamiento del mismo, respectivamente.



Relación entre la temperatura y la presión en una tubería, calculado con datos de la tabla 1, para tres casos: i) no hay pérdida de calor por conducción-convección, ii) un aislamiento de 0,05 m de espesor de la tubería y iii) la pérdida máxima de calor (es decir, sin aislante sobre la tubería). Cuando no hay pérdida de calor a las condiciones de  $P$  y  $T$  quedan en la región de vapor sobrecalentado, de lo contrario quedan a lo largo de la curva de saturación de vapor líquido. (b) Cantidad de líquido y vapor a lo largo de la tubería para los tres casos.

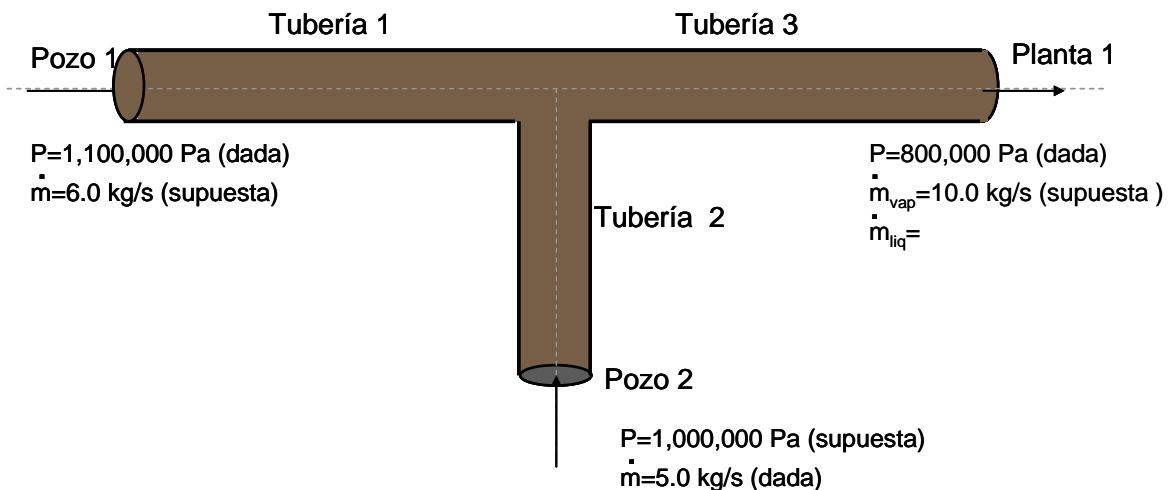


Fig. 4: Red hipotética de vaporductos de un sistema geotérmico con dos pozos productores y una planta de generación de energía eléctrica.