

Simulación numérica del transporte de vapor en las redes de vaporductos geotérmicos: un estudio del comportamiento paramétrico

Mahendra P. Verma¹, Leonardo Gervacio¹, Alfonso Aragón¹, Víctor Arellano¹, José Manuel Franco² y Juan Carlos Escamilla García³

¹Geotermia, ²Turbomaquinaria, ³Ingeniería Civil, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, C.P. 62490. E-mail: mahendra@iie.org.mx

Resumen

Se presenta el desarrollo de los programas de cómputo *GeomSteamNet* y *GeoSteamNet* para el transporte de vapor en las redes de vaporductos geotérmicos, escritos en Google SketchUp Pro 8.0 y en Visual Basic en Visual Estudio 2010 (VB.NET), respectivamente. Utilizando estos programas se realizó un estudio paramétrico de flujo de vapor en una tubería horizontal y en otra vertical. En la tubería horizontal de 1000 m de longitud y 0.5 m de diámetro interno con un flujo de vapor de 5 kg/s se calculó una caída de presión de 1.6×10^{-3} MPa, que es considerablemente menor que el error analítico en la medición de la presión en redes de vaporductos geotérmicos. Se identificó además que existe una inestabilidad en el algoritmo debido a la inconsistencia en los datos termodinámicos del agua, cuando hay 20 kg/s de flujo de vapor en una tubería horizontal de 1000 m de longitud y 0.4 m de diámetro interno. Asimismo, si hay un flujo de vapor menor de 2 kg/s en la tubería vertical, la mayor parte del vapor se convierte en líquido y en consecuencia aumenta la caída de presión a lo largo de la tubería y disminuye la cantidad de flujo de vapor. Este estudio paramétrico es necesario e importante para la creación de un algoritmo eficiente para el flujo de vapor en una red de tuberías geotérmicas.

Palabras clave: Flujo de fluidos geotérmicos, *GeomSteamNet*, *GeoSteamNet*, estudio paramétrico, sistema geotérmico, VB.NET, Google SketchUp.

Numeric simulation of steam transport in steam-pipeline nets – Study of parametric performance

Abstract:

The development of computer programs, *GeomSteamNet* and *GeoSteamNet* for steam transport in geothermal pipeline network is presented. Programs are written in Google SketchUp Pro 8.0 and Visual Basic in Visual Studio 2010, respectively. Using these programs a parametric study of steam flow in a horizontal and another vertical pipeline was performed. The pressure drop in the horizontal pipeline of 1000 m long and 0.5 m inner diameter for a steam flow of 5 kg/s is 1.6×10^{-3} MPa, which is considerably lesser than the analytical error when measuring pressure in geothermal pipeline networks. Similarly it was detected instability in the algorithm, due to inconsistency in thermodynamic data of water, when there is 20 kg/s of steam flow in a horizontal pipeline 1000 m long and 0.4 m inner diameter. Additionally, if there is less than 2 kg/s vapor flow in the vertical pipeline, most of the vapor is converted to liquid and consequently the pressure drop along the pipeline increases with decreasing flow rate. This parametric study is necessary and important for creating an efficient algorithm for steam flow in geothermal pipeline networks.

Keywords: Geothermal fluid flow, *GeomSteamNet*, *GeoSteamNet*, parametric study, geothermal system, VB.NET, Google SketchUp.

1. Introducción

El flujo de vapor (fluido) en las redes de vaporductos de sistemas geotérmicos es más complejo que en cualquier otro tipo de sistema, debido que la presión, temperatura y flujo en los pozos geotérmicos son controlados por las características naturales del yacimiento. Además, las distancias grandes entre los pozos y la configuración topográfica de un campo geotérmico influyen negativamente en la caracterización del flujo. Las condiciones en la apertura del pozo (es decir, el control de su presión y flujo en la boca del pozo) producen problemas de incrustación (consistentes principalmente en depósitos de sílice y calcita) tanto en el yacimiento geotérmico, como en las redes de vaporductos. De la misma manera, se ha observado inestabilidad en forma de fluctuación de la presión en la red de tuberías geotérmicas (incluso a veces en los pozos), si la apertura de los pozos no está sincronizada. Todo esto afecta la capacidad de producción de un sistema geotérmico, lo cual se resuelve a veces produciendo un exceso de vapor (es decir, vapor sin ningún tipo de uso) y descargándolo a la atmósfera, lo que tiene impactos económicos y ambientales. De ahí la importancia de comprender la complejidad del flujo de vapor en las redes de sistemas geotérmicos.

Para satisfacer esta necesidad de la industria geotermoeléctrica, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) inició el proyecto “*GeoSteamNet: un paquete de cómputo para simular el flujo de vapor en una red de vaporductos de campos geotérmicos*” en 2006. El resultado de este proyecto fue el programa *GeoSteamNet*, el cual utiliza el algoritmo de conservación de masa, momento lineal y energía implementado inicialmente por la NASA en el código de cómputo “*Generalized Fluid System Simulation Program (GFSSP)*” (Majumdar, 1999). Verma y Arellano (2010) escribieron un componente ActiveX, *PipeCalc* en Visual Basic 6.0, para flujo de vapor en vaporductos usando el algoritmo GFSSP modificado. Los componentes ActiveX tenían varios problemas que se describieron como el ‘infierno de DLL’¹. Estos problemas se han resuelto hasta cierto punto en Visual Studio 2010. Por lo tanto, se escribió una nueva versión del programa como una biblioteca, *GeoSteamNet* en Visual Basic en Visual Studio 2010 (VB.NET). Verma (2012) determinó que la consistencia interna en las propiedades termodinámicas del agua es de vital importancia.

Este artículo presenta el desarrollo de *GeomSteamNet* y *GeoSteamNet*, escrito en Google SketchUp Pro 8.0 y Visual Basic en Visual Studio 2010 (VB.NET), respectivamente, para la simulación numérica del transporte de vapor en redes de los campos geotérmicos. Se consideran las propiedades termodinámicas del agua y un algoritmo numérico basado en los principios de conservación de la masa, la cantidad de movimiento (segunda ley de Newton o las ecuaciones de Navier Stokes) y de la energía (la primera y segunda leyes de la termodinámica). La inestabilidad en el algoritmo se observa como una consecuencia del comportamiento del vapor como gas ideal a baja presión, que se resuelve mediante el ajuste del límite inferior de presión a 2.0×10^5 Pa. El estudio paramétrico del comportamiento de la presión, temperatura, tasa de flujo másico de vapor y líquido, pérdida de energía térmica, conversión de energía mecánica a térmica por fricción, energía cinética, energía potencial y energía térmica en las tuberías horizontales y verticales, sugiere que la exactitud en la medición de la presión es muy importante en las redes de vaporductos.

2. Desarrollo de programas de cómputo

El concepto general de la programación de *GeoSteamNet* se presenta en la Figura 1. Este se divide en dos partes: (a) *GeomSteamNet*. Esta es una interfaz gráfica de usuario para diseñar redes de vaporductos en tres dimensiones en el paquete Google SketchUp Pro 8.0. Está escrito en Ruby como “Plug-Ins” para el SketchUp. En éste se construye una red de vaporductos como un grupo de ramales

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/DLL_Hell

interconectados. Cada ramal contiene varios componentes como nodos, tuberías, codos, expansiones-reducciones, etc. (b) *GeoSteamNet*. Esta es una biblioteca en VB.NET que contiene varias clases (*SteamTables*, *SteamTablesGrid*, *MoodyChart*, *OrificeMeter*, *PipeGeomtery*, *PipeLine*, etc.) para la simulación del transporte de vapor.

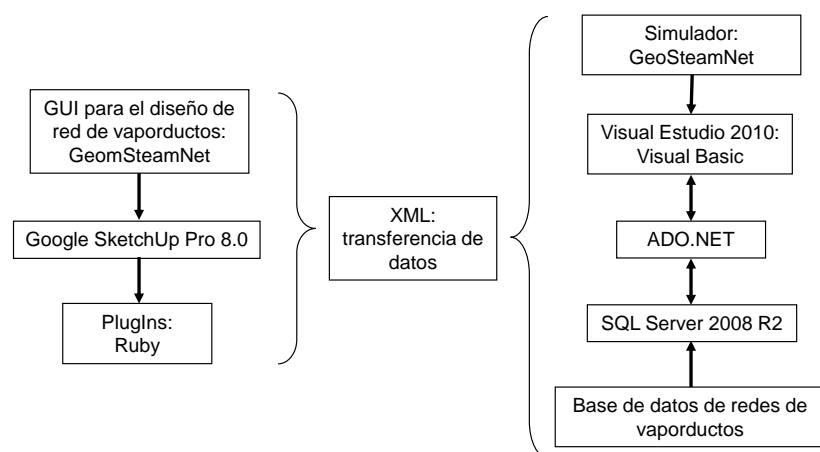


Fig. 1. Concepto general de programación.

2.1. *GeomSteamNet*

La instalación de *GeomSteamNet* se explica en el manual de usuario (Verma y Gervacio, 2011). Esto es, se crea una barra de herramientas en el SketchUp que contiene las siguientes herramientas (botones): inicia o termina un ramal (▲), crea tubo (□), crear expansión o reducción (⊕), modificar (✎), insertar más componentes al final del ramal (↗), importar (📁) y exportar (📤) los datos en un archivo XML.

La Figura 2 muestra los pasos que se requieren para diseñar un ramal de una red de vaporductos utilizando la interfaz *GeoSteamNet*.

1. Inicio de SketchUp. Seleccione el botón de “iniciar o terminar un ramal” en la caja de herramientas (Figura 2a) y haga clic en cualquier punto de la disposición del diseño de SketchUp.
2. Aparecerá una ventana con las coordenadas del punto seleccionado y el nombre predeterminado de ramal (Figura 2b). Se puede modificar el nombre de ramal y las coordenadas para el punto de partida. Pulse entonces el botón aceptar.
3. Una nueva ventana aparecerá para definir el tipo de nodo de partida (Figura 2c). Uno tiene que seleccionar una de las tres opciones: pozo, planta y/o unión. A continuación, pulse el botón aceptar.
4. Ahora estamos listos para agregar componentes. El primer componente debe ser de una tubería. Por lo tanto, presione el botón de la tubería. Se muestra una ventana de las propiedades de la tubería (Figura 2d). Uno puede usar los valores por defecto o proporcionar los puntos inicial y final. Así, podemos agregar más componentes. Si añadimos dos

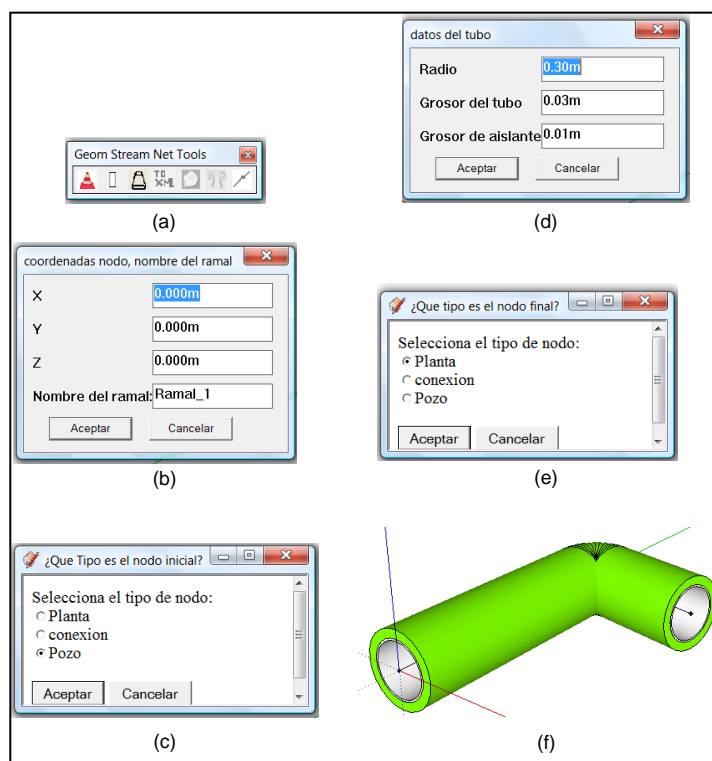



Fig. 2. Utilización de la interfaz *GeoSteamNet*.

- vaporductos, el codo entre las tuberías se calcula y se representa de forma automática.
5. Para terminar un ramal se selecciona una vez más la opción “iniciar o terminar un ramal” (Figura 2e).
 6. La Figura 2f muestra un ramal con dos tuberías que se construyó utilizando la interfaz.

De esta manera utilizando el procedimiento anterior se puede crear una red de tuberías.

Los nodos no tienen ningún diseño visible asociado con ellos. Esto dificulta visualizar cuando dos o más ramales tienen la misma posición de los nodos (es decir, el nodo de unión de los ramales). En la nueva versión de la barra de herramientas, se espera resolver este problema. Con presionar el botón de exportación () se pueden escribir los datos de la red en un archivo XML. Este archivo se puede leer en el programa *GeoSteamNet* para la simulación del transporte de vapor de agua. Del mismo modo, el botón de importación puede leer un archivo XML.

2.2. *GeoSteamNet*

El programa *GeoSteamNet* es una biblioteca de clases que contiene actualmente las siguientes categorías (clases): *SteamTables*, *SteamTablesGrid*, *MoodyChart*, *OrficieMeter*, *PipeSegment*, *Pipeline*, *Branch*, *Junction*, y *PipelineNetwork*. Estas categorías tienen propiedades y métodos y se usan para crear objetos.

Una red de vaporductos está formada por ramales. El inicio y término de un ramal consiste de un nodo. Así, el flujo de fluido en un ramal con la geometría especificada se rige por tres parámetros: la presión de entrada, la presión de salida y la tasa de flujo de masa. Dos de los tres parámetros son independientes. Considerando la dirección de flujo hay cuatro parámetros. La Figura 3 presenta las posibles combinaciones de flujo en un ramal. Esto depende de los valores de los parámetros.

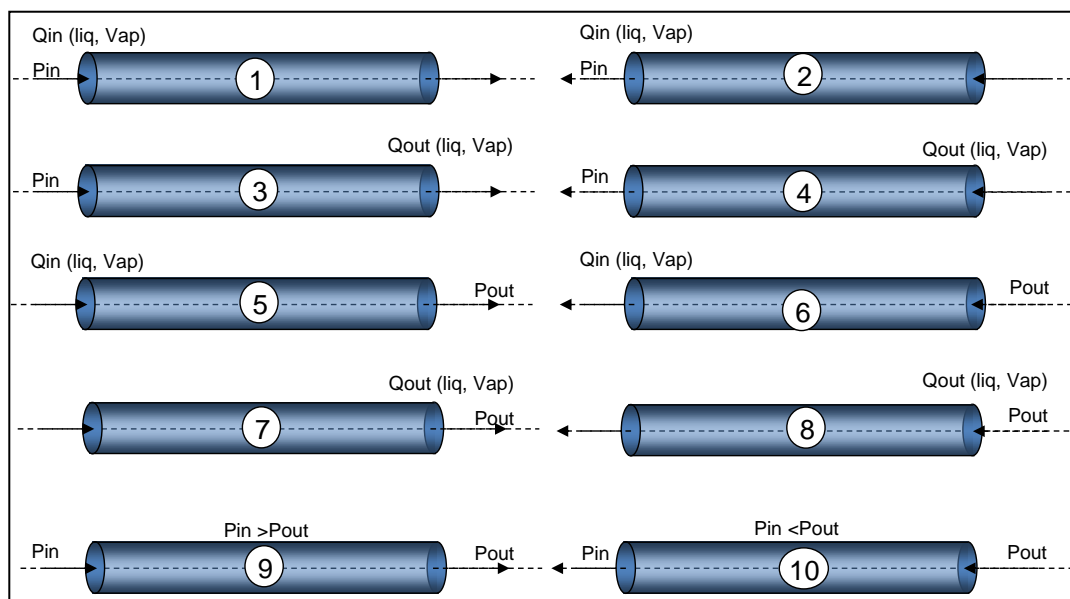


Fig. 3.
Posibles
combinaciones
de flujo en un
ramal.

Usando esta biblioteca se escribió un programa *GeoSysNet* en VB.NET para simular el transporte de vapor en una red de vaporductos de una planta geotérmica. El desarrollo de la base de datos en SQL Server 2008 R2 para las redes de vaporductos de los sistemas geotérmicos está aún en proceso de

desarrollo. El transporte de los datos entre los programas *GeomSteamNet* y *GeoSteamNet* se realiza a través de la tecnología XML.

3. Transporte de vapor en tubos horizontales y verticales: una comparación paramétrica

El programa de demostración, *GeoSysNet*, está escrito para llevar a cabo un estudio paramétrico detallado de transporte de vapor en una tubería horizontal y otra vertical. Se calcula la presión, la temperatura (interior, exterior, y en la interfaz entre la tubería y el aislante), la tasa de flujo másico, de vapor y líquido, la pérdida de energía calorífica, la energía friccional, la energía cinética, la energía potencial, la energía térmica y la energía total en cada nodo a lo largo de la tubería. Los resultados obtenidos a través de este estudio son útiles en el desarrollo del algoritmo para el transporte de vapor en la red de tuberías geotérmicas. Los parámetros de entrada del estudio se proporcionan en la Tabla 1.

Parámetro	Valor
Tubería	
Longitud (m)	1000.0
Diámetro interno (m)	0.5
Grosor (m)	0.01
Conductividad térmica ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	85.2
Rugosidad (m)	4.5×10^{-5}
Aislante	
Grosor (m)	0.10
Conductividad térmica ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	0.04
Coefficiente de transferencia de calor	
Vapor y tubería ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	50.0
Aislante y aire ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	5.0
Influjo de vapor saturada (a lo largo de curva de saturación)	
Presión (Pa)	1.0×10^6
Tasa de flujo de masa (kg/s)	20.0
Temperatura Ambiente (K)	300.0
Núm. de segmento (i.e., dividiendo la tubería en 100 segmentos de 10.0 m cada uno)	100

Tabla 1: Características de tubería y valores de los parámetros usados en la simulación de transporte de vapor en GeoSysNet

La Figura 4 muestra el comportamiento comparativo de la presión, la temperatura, proporción de caudales de líquido y vapor, la velocidad, la energía fraccional, el calor perdido, y la energía total de la tubería horizontal y vertical. La Figura 4a muestra la variación de la presión con el diámetro de la tubería a lo largo de la tubería horizontal, mientras la Figura 4b muestra lo mismo pero para la tubería vertical.

La variación (caída de presión) es mayor en la tubería vertical; sin embargo, existe inestabilidad en el algoritmo para el caso de la tubería horizontal de diámetro 0.4 m a la distancia de unos 800 m. La inestabilidad está asociada con las propiedades termodinámicas del agua, lo cual se discutirá más adelante. La energía total del flujo de fluido es la energía total en la entrada menos la pérdida de calor. La fracción de vapor juega un papel importante en la conversión de la energía mecánica a la energía térmica. Sin embargo, no causa ninguna pérdida de energía.

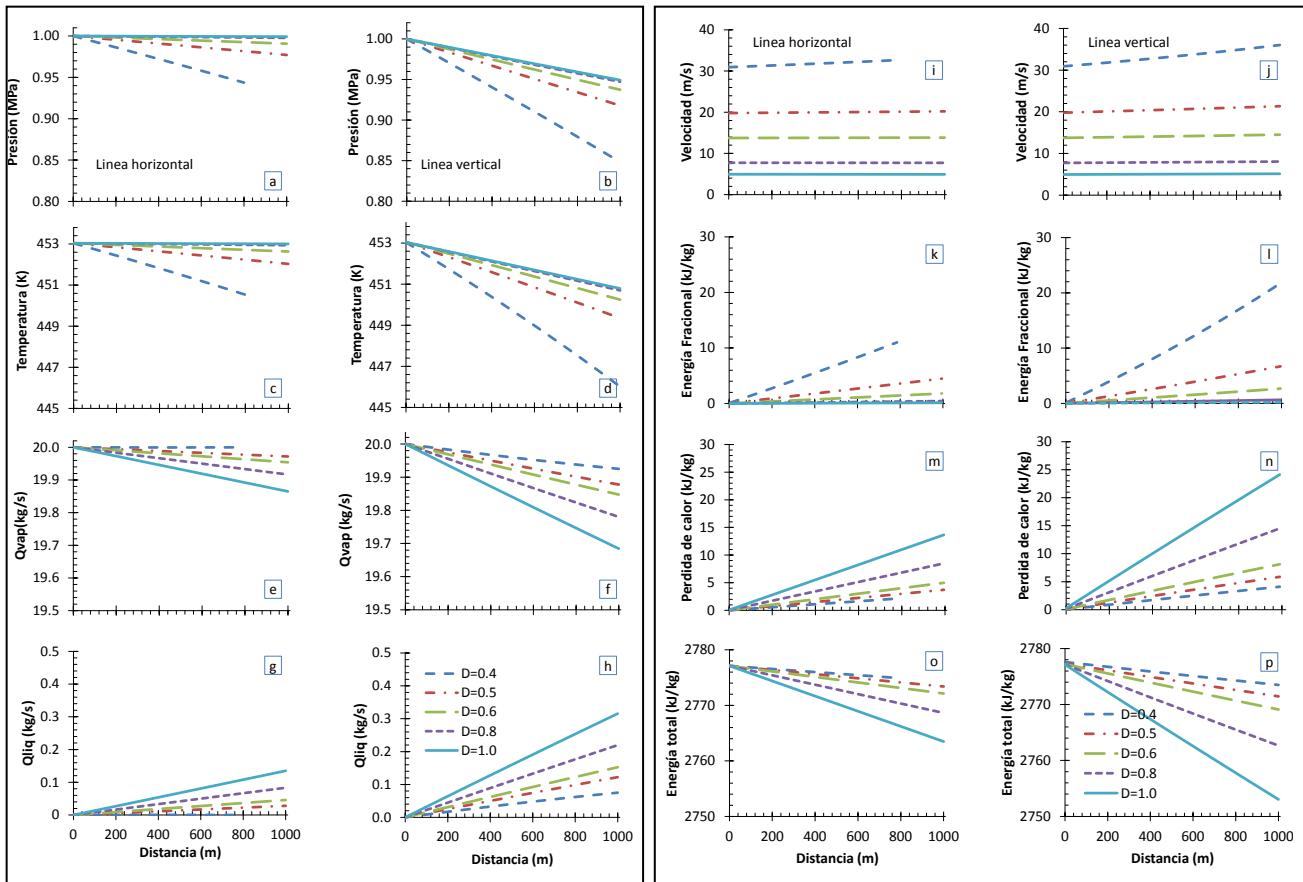


Fig. 4. Variación de diversos parámetros con la distancia a lo largo de una tubería horizontal (gráficas a, c, e, g, i, k, m, o) y vertical (gráficas b, d, f, h, j, l, n, p).

La Figura 5 muestra la calidad del vapor y la presión de salida de las tuberías horizontal y vertical para diferentes cantidades de flujo de vapor. Cuando hay gran cantidad de flujo de vapor, la calidad del vapor es alta, deduciéndose que la velocidad de flujo es alta y por tanto hay menor tiempo para perder calor. La calidad de vapor es relativamente alta en la tubería horizontal, lo que se relaciona con la velocidad de flujo de fluido. En la tubería vertical, hay un flujo contra la fuerza de gravedad, lo que reduce la velocidad del fluido. Un punto importante que debe mencionarse en la presión de salida se puede observar en la Figura 5c donde la caída de presión para la tubería horizontal es de 1.6×10^{-3} MPa, cuando el caudal es de 5 kg/s. Este resultado es muy importante en el diseño del algoritmo para el transporte de vapor en una red de vaporductos. La presión de salida de la tubería vertical tiene un máximo para la tasa de flujo de 2.0 kg/s. A medida que el caudal disminuye la presión de salida disminuye. Esto se relaciona con la disminución en la calidad del vapor. Cuando el caudal es muy bajo, todo el vapor se convierte en líquido.

4. Propiedades termodinámicas del agua

Verma (2006) resumió los conceptos termodinámicos utilizados para comprender las relaciones entre las propiedades del estado de una sustancia. Ya desde el siglo XIX se había observado que el agua tiene una densidad máxima a condiciones de $T = 277.127^\circ\text{K}$ ($\sim 4^\circ\text{C}$) y $P = 1.0 \times 10^5$ Pa (1 atmósfera). Esto se

conoce como un comportamiento anómalo. Esto es, no es normal que de acuerdo con las leyes de la termodinámica el agua líquida se considere como una sola fase.

Investigaciones recientes analizan el efecto del enlace de hidrógeno en la estructura molecular del agua a bajas temperaturas (ver página de IAPWS, 2010). Hay dos tipos de estructura: uno asociado con enlaces de hidrógeno (por debajo de 4°C) y el otro sin enlaces de hidrógeno. De acuerdo con la definición de ‘fase’, un cambio en la estructura de la molécula de agua produce una fase diferente. Por lo tanto, hay una transición de fase a lo largo de la curva de densidad máxima y el comportamiento de la densidad del agua es consistente en cada fase de acuerdo con las leyes de la termodinámica. La temperatura (T), la presión (P), el volumen (V), la energía interna (U), la entalpía (H), la entropía (S), la energía libre de Gibbs (G) y la energía libre de Helmholtz (A), incluyendo la conductividad, la solubilidad, el equilibrio constante de una reacción química, etc., son variables de estado. Las funciones de estado U , H , S , G y A son calculadas a partir de

las características PVT y los datos de capacidad calorífica (Verma, 2005). Por lo tanto, para entender las inconsistencias termodinámicas en los comportamientos de U , H , G , S y A , Verma (2012) analizó los datos experimentales de C_p . La Figura 6 muestra la variación de los datos experimentales de C_p respecto a T a una presión dada. Los datos de C_p , se obtuvieron de la página web de IAPWS (2010). Los valores se dividen en dos grupos: (a) para la región de líquido comprimido y (b) para la región de vapor sobrecalentado. El límite se considera como la curva de saturación o *isochor* crítico. El valor de C_p en la región de líquido comprimido aumenta con la temperatura, mientras que disminuye con la

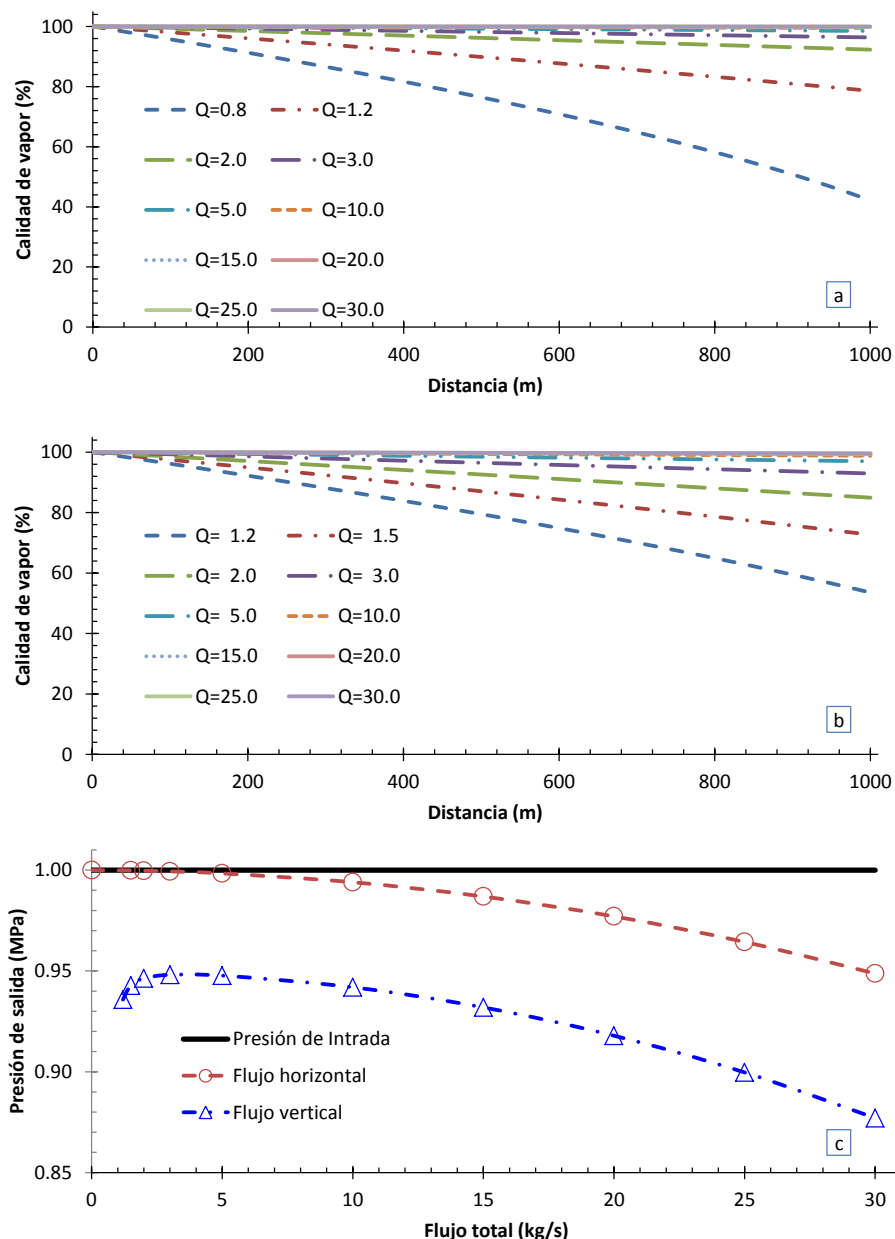


Fig. 5. Variación de la calidad de vapor para una tubería horizontal (a) y vertical (b), con la distancia, y de la presión de salida (c) con el flujo total para ambas tuberías.

presión. La variación de C_p como función de T para todos los valores de P no es muy significativa hasta 550°K . Hay un aumento drástico en los valores de C_p después de $T = 550^\circ\text{K}$. Existe un máximo cerca del límite de separación líquido-vapor.

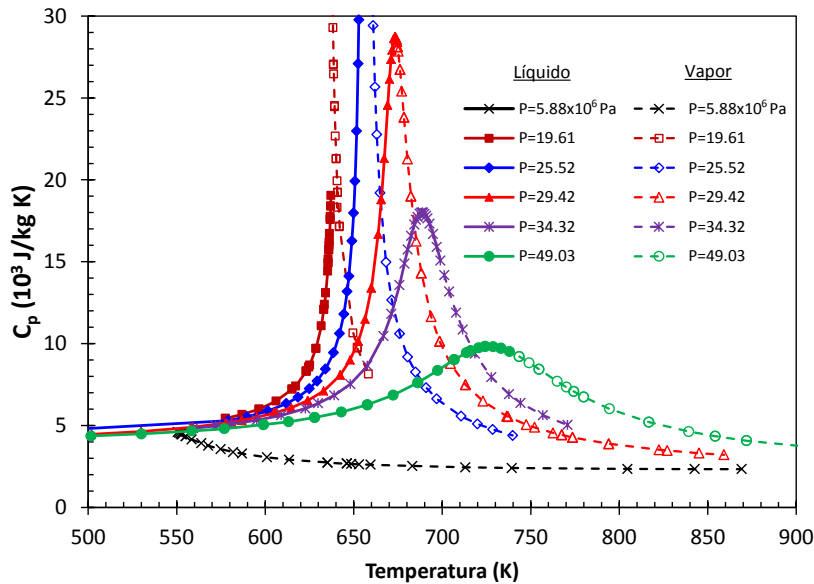


Fig. 6. Variación de C_p con respecto a la temperatura a determinadas presiones (Verma, 2012).

Es importante dejar clara la configuración experimental utilizada para la medición de la capacidad calorífica del agua. Es fácil medir la capacidad calorífica del agua a la temperatura ambiente (300°K). Esto es explicable con un ejemplo sencillo, aunque por supuesto hay muchas restricciones en los montajes experimentales reales para la medición de C_p . Considerando que hay una cierta cantidad de agua (por ejemplo 0.3 kg) en un recipiente cerrado de volumen determinado (por ejemplo un litro), se tiene de acuerdo con la definición de la capacidad calorífica:

$$\text{Capacidad Calorífica} = \frac{\text{calor total dado al sistema}}{(\text{cantidad de agua}) \times (\text{cambio de temperatura})}$$

Ahora bien, esta ecuación para este dispositivo experimental en particular es válida para la temperatura ambiente (por ejemplo 300°K), pero ya no lo es a 500 o 600°K . De acuerdo con la física básica, se formará una fracción de vapor conforme la temperatura del agua se eleve (por ejemplo, de 300 a 301°K), aunque la cantidad de vapor que se forma a bajas temperaturas es prácticamente insignificante. Por lo tanto, es razonable considerar que el calor dado al sistema sólo se utiliza para elevar su temperatura. Pero esto deja de ser razonable a mayor temperatura, ya que la densidad del vapor es más alta a altas temperaturas y, por lo tanto, una cantidad considerable de calor se utiliza en la conversión de agua en vapor. Este es un error fundamental que se ha pasado por alto en la literatura relativa al tema. Verma (2012) presentó un cálculo detallado para explicar este proceso. Debido a los valores de C_p , las propiedades termodinámicas del agua tienen valores múltiples, lo cual va en contra la definición de la función de estado. Y por ello se requiere actualizar la medición de los datos termodinámicos del agua para poder simular el transporte de vapor, así como para otros estudios que involucren dichos datos termodinámicos.

5. Conclusiones

Los programas de cómputo *GeomSteamNet* y *GeoSteamNet*, para el diseño de las redes de tuberías geotérmicas en tres dimensiones, y la simulación numérica del transporte de vapor en las redes fueron escritos en Ruby como “Plug-Ins” para el Google SketchUp Pro 8.0 y en Visual Basic en Visual Studio 2010 (VB.NET), respectivamente. El algoritmo de *GeoSteamNet* se basa en la conservación de la masa, el principio de momento lineal (segunda ley de Newton o las ecuaciones de Navier Stokes) y la

conservación de la energía (primera ley de la termodinámica). En la red de tuberías de un campo geotérmico el vapor fluye de una zona de alta presión a una de baja, y los flujos de calor van de alta a baja temperatura. Ocurre una disminución de la presión (y temperatura) del vapor a lo largo de la tubería, incluso cuando no hay pérdida de calor. Esto se relaciona con la expansión del vapor durante su flujo.

El estudio paramétrico del transporte de vapor en una tubería horizontal y en otra vertical arroja resultados importantes para un algoritmo eficiente del flujo de vapor en la red de tuberías geotérmicas. Estos resultados son:

- La caída de presión en una tubería horizontal de 1000 m de longitud y 0.5 m de diámetro interno con un flujo de vapor de 5 kg/s es de 1.6×10^{-3} MPa, lo cual es menor que el error analítico en la medición de presión en redes de vaporductos geotérmicos.
- Existe una inestabilidad en el algoritmo, debido a la inconsistencia en los datos termodinámicos del agua cuando hay 20 kg/s de flujo de vapor en una tubería horizontal de 1000 m de longitud y 0.4 m de diámetro interno.
- La conversión de vapor en líquido es mayor cuando hay menor flujo de vapor en tuberías verticales. Por ejemplo, más del 40% vapor se convierte en líquido cuando hay un flujo de vapor de 1.2 kg/s en una tubería de longitud de 1000 m y de diámetro de 0.5 m.

Referencias

- IAPWS, 2010. A compilation of experimental data used to develop the IAPWS-95 formulation. International Association for the Properties of Water and Steam, <http://www.iapws.org/>.
- Majumdar, A., 1999. *Generalized Fluid System Simulation Program (GFSSP) Version 3.0*. NASA, USA, Report No. MG-99-290, 441 p.
- Verma, M.P., 2005. Procedimiento para determinar propiedades termodinámicas de líquidos. *Boletín IIE*, **29**, pp. 1-10.
- Verma, M.P., 2006. Thermodynamics, equations of state and experimental data - A review. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, **1**, pp. 35-43.
- Verma, M.P., 2012. Steam Transport Simulation in a Geothermal Pipeline Network Constrained by Internally Consistent Thermodynamic Properties of Water. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (en prensa).
- Verma, M.P., and V.M. Arellano, 2010. GeoSteamNet 2: steam flow simulation in a pipeline. *Proceedings Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Palo Alto, California.
- Verma, M.P., y L. Gervacio, 2011. *GeomSteamNet tools: Guía de Usuario, versión 1.0*. Reporte interno del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Inédito.