

Termodinámica del fluido geotérmico en condiciones supercríticas

Mario César Suárez Arriaga

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México. Correo: mcsa50@gmail.com

Resumen

La circulación hidrotermal submarina es la principal fuente de transferencia de masa y energía de la corteza terrestre hacia los mares y es uno de los modos de interacción primarios entre continentes, océanos y atmósfera. La energía geotérmica profunda está relacionada con la existencia de fuentes hidrotermales emergentes en muchos lugares a lo largo de los centros de dispersión oceánica entre las placas tectónicas. Estos sistemas tienen una longitud aproximada de 65,000 km en la corteza oceánica y contienen enormes cantidades de energía. La energía geotérmica submarina abarca un amplio abanico de profundidades, desde sistemas superficiales entre 1 y 50 m, hasta reservorios a más de 2000 m bajo el nivel del mar. Los fluidos submarinos encontrados en este último tipo de sistemas, están en condiciones termodinámicas supercríticas, a más de 400°C y a presiones mayores a 20 MPa. Estos sistemas podrían brindar hasta diez veces más energía por unidad de volumen que el fluido geotérmico utilizado con la tecnología que existe actualmente. La energía geotérmica empleada a condiciones supercríticas permitiría la generación de electricidad en forma más eficiente y económica a través de turbinas llamadas supercríticas avanzadas, acopladas a generadores especiales situados en el lecho oceánico. En este documento se describen las características fundamentales y se presenta una evaluación preliminar de esta enorme fuente geotérmica, hasta ahora nunca usada en el mundo.

Palabras clave: Sistemas geotérmicos submarinos, condiciones supercríticas, potencial energético.

Thermodynamic of geothermal fluids at supercritical conditions

Abstract

Submarine-hydrothermal circulation, the main source of mass and energy transfer from the earth's crust to the sea, is one of the primary interaction modes between continents, oceans and the atmosphere. Deep-geothermal energy is related to the hydrothermal vents emerging in many places along the oceanic spreading centers between tectonic plates. The systems have an approximate length of 65,000 km in the oceanic crust and contain huge amounts of energy. Submarine geothermal energy covers a wide range of depths, from surface systems between 1 and 50 m to reservoirs more than 2000 m below sea level. Submarine fluids found in the latter type of systems are at supercritical thermodynamic conditions, more than 400°C, and at pressures above 20 MPa. These systems could provide up to ten times more energy per volume unit than the geothermal fluids used with current technology. Geothermal energy at supercritical conditions would generate electricity more efficiently and economically by using an advanced supercritical turbine coupled with special generators located on the ocean floor. This document describes the basic characteristics of such a system and presents a preliminary assessment of this huge geothermal source, never before used.

Keywords: Submarine geothermal systems, supercritical conditions, energy potential.

Introducción

La humanidad que habita este planeta (siete mil millones de personas) consume 86 millones de barriles de petróleo aproximadamente cada día. Este consumo equivale al descubrimiento de una provincia petrolera como Azerbaijón cada año. En julio de 2011 el precio del barril de petróleo tipo Brent alcanzó los 118

dólares americanos por barril (USD_b). Pero en mayo de 2011 llegó a costar 121 USD_b, en noviembre de 2010 valía 88 USD_b y en julio de 2008 alcanzó los 145 USD_b (<http://www.oil-price.net/>, 2011). Ya no existe un margen de seguridad en la producción y consumo de hidrocarburos que permita la estabilidad de precios, los cuales son muy volátiles y afectan negativamente la economía mundial. Los costos de producción de petróleo son cada vez más altos y la demanda continúa creciendo incontrolable en Latinoamérica, África y Asia. China es ya el principal consumidor de petróleo y el mayor agente contaminante. Los hidrocarburos se acercan a su fin. Nadie sabe exactamente cuándo ocurrirá, pero podemos estar seguros de que ese día llegará pronto. La perspectiva es esta: en un futuro muy próximo tendremos limitado suministro de combustibles fósiles, una creciente demanda, encarecimiento del petróleo y contaminación en aumento con graves repercusiones en el medio ambiente y el clima. La búsqueda y desarrollo de alternativas energéticas es, por consiguiente, prioritaria.

Existe una necesidad urgente de sustituir los hidrocarburos con fuentes diversificadas de energía limpia. La geotermia profunda es una de esas fuentes capaces de sustituir ventajosamente al carbón, al petróleo, al gas y a la energía nuclear. Pero la tecnología y los conocimientos para explotarla son aun incipientes. La geotermia profunda representa, en el lapso de la vida humana, un potencial energético esencialmente infinito. Los reservorios hidrotermales se encuentran a lo largo de cordilleras y centros de dispersión en las fronteras entre las placas tectónicas de litósfera (Fig. 1). En esos lugares las divergencias de las placas producen grietas que permiten el transporte vertical de calor desde el manto hasta el piso oceánico. El agua fría del mar, al entrar en esas fisuras, se calienta y cambia químicamente al entrar en contacto con la roca de la corteza oceánica. Esa agua caliente, enriquecida con gases como el H₂S, es expulsada a través de esos respiraderos hidrotermales. La química de estos fluidos indica que la interacción agua-roca ocurre a alta presión y temperatura.

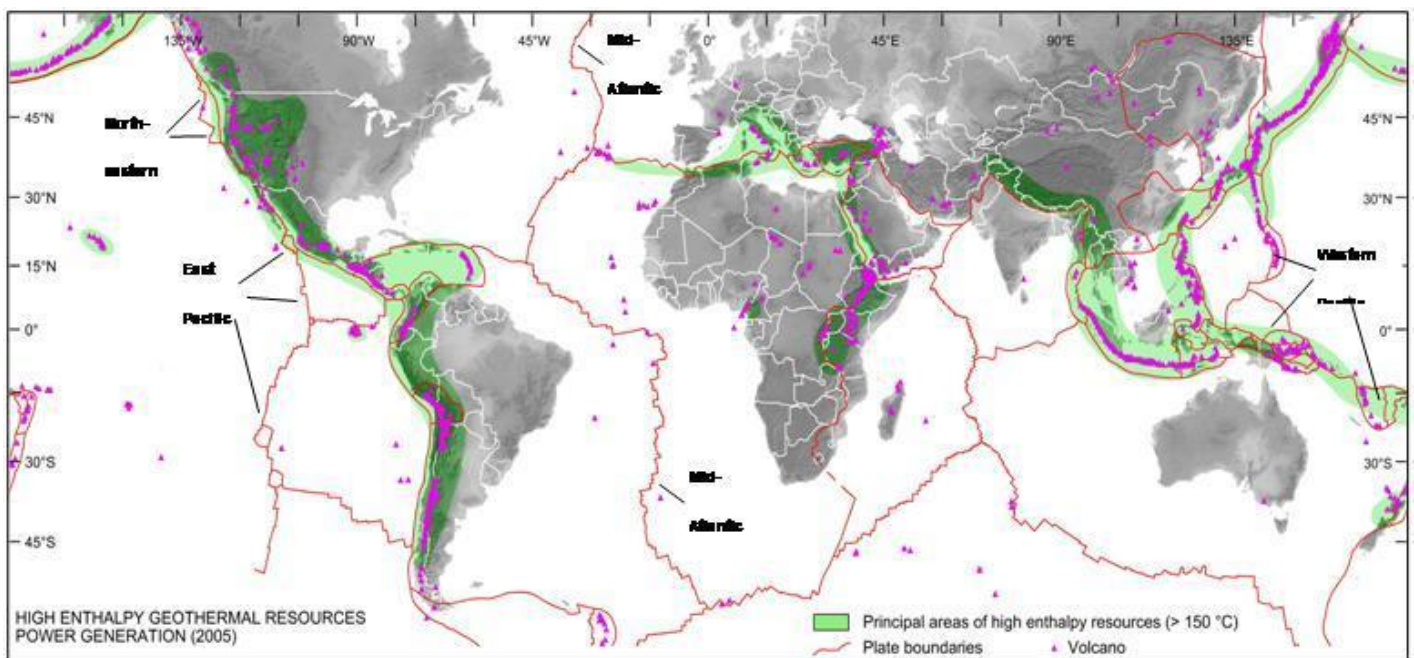


Fig. 1. Distribución planetaria simplificada de las placas tectónicas y cordilleras oceánicas indicativas de sitios geotérmicos submarinos. Se muestran las áreas continentales de alta temperatura.

Geotermia submarina en México

En México los sistemas geotérmicos submarinos se localizan entre dos profundidades extremas: los recursos poco profundos cerca de la plataforma continental, entre uno y cincuenta m de profundidad, y los recursos

profundos a más de 2000 m debajo del nivel del mar (Grijalva, 1986; Mercado, 1990, 1993; Suárez-Arriaga, 1998). De ambos tipos de sistemas se ha detectado su existencia en la costa norte mexicana del Océano Pacífico (Fig. 1). En particular, varias manifestaciones hidrotermales submarinas se encuentran a lo largo de ambas costas en la península de Baja California, tanto en el lado del Pacífico como en el Mar de Cortés del mismo Golfo. En estas regiones se descubrió un potencial geotérmico considerable entre 1980 y 1990 (Grijalva, 1986; Mercado, 1990), que podría explotarse en un futuro cercano. En la Depresión de Wagner, al norte del Golfo de California, los reservorios hidrotermales submarinos se localizan a menos de 30 m de profundidad. Otras áreas termales submarinas accesibles con la tecnología actual, se localizan frente a la costa de Punta Banda, cerca del puerto de Ensenada, BC, donde se han medido temperaturas hasta de 140°C a 30 m de profundidad a menos de 500 m de la costa (Bustos-Serrano, 1983).

El flujo de calor conductivo submarino promedio medido en el Golfo de California es del orden de 0.34 W/m², valor obtenido cerca de fuentes termales del fondo marino que se encuentran a una temperatura promedio de 330°C (Mercado, 1990). En esas zonas el flujo de agua caliente expelido por chimeneas naturales tiene una velocidad aproximada de 2.5 m/s fluyendo por agujeros con diámetros aproximadamente de 10 cm a 20 cm. Estos datos proporcionan un flujo continuo promedio de agua caliente, de unos 195 kg/s expelidos por cada una de las chimeneas existentes. La falla de San Andrés, localizada a lo largo del límite transformante entre las placas del Pacífico y Norteamérica (Fig. 2), fue formada por movimientos divergentes entre ambas placas tectónicas. El movimiento tectónico relativo entre placas causó rupturas en la corteza oceánica, llamadas cuencas *pull-apart*. Ellas permiten el transporte vertical del magma profundo a una temperatura de 1000°C aproximadamente (Grijalva, 1986). Tal proceso formó un gigantesco reservorio geotérmico submarino bajo toda la zona del Golfo de California. El potencial geotérmico de esta fuente se estima, con una aproximación volumétrica burda, en miles de veces más grande que la energía contenida en los reservorios de Cerro Prieto, BC (Vidal *et al.*, 1978, 1981; García, 2000).

Termodinámica del agua en condiciones geotérmicas supercríticas

Las propiedades termodinámicas del agua pura, bajo las condiciones típicas de reservorios geotérmicos y acuíferos, se calculan con gran precisión utilizando ecuaciones de estado y correlaciones descritas en varias publicaciones (Schmidt and Grigull, 1979; Watanabe, 1996; Holzbecher, 1998; Wagner, 2000; Wagner and Pruss, 2002; Harvey *et al.*, 2004; Bundschuh and Suárez-Arriaga, 2010). Desde 1989 la *International Association for the Properties of Steam* (IAPWS), es la asociación internacional para las propiedades del agua en estado líquido y vapor (<http://www.iapws.org/>). En 1995 la IAPWS aprobó, para uso científico, la *IAPWS Formulation for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use*. La IAPWS-95 (Wagner, 2000) constituye la norma internacional para estas propiedades y es la representación más exacta de ambas fases del agua, incluyendo el rango supercrítico. Usa las siguientes variables: presión p [bar, MPa], densidad ρ_w [kg/m³], temperatura T [°C, K], entalpía específica h_w [kJ/kg], energía interna e_w [kJ/kg], entropía específica s_w [kJ/kg/°C], energía libre de Helmholtz f_w [kJ/kg], entalpía libre de Gibbs g_w [kJ/kg], viscosidad μ_w [Pa·s], compresibilidad C_w [1/bar], conductividad térmica k_T [W/m/°C], expansión térmica γ_w [°C⁻¹], difusividad δ_w [m²/s], calor específico isobárico c_p [J/kg/°C] y tensión superficial σ_w [N/m]. En una sola fase todas estas propiedades son función de la presión y la temperatura del agua. En sistemas bifásicos p y T están relacionadas en la curva de saturación y, por tanto, debe utilizarse otra variable como la calidad del vapor, la saturación del líquido o la entalpía del fluido. En las referencias (Schmidt and Grigull, 1979; Holzbecher, 1998; Bundschuh and Suárez-Arriaga, 2010) se ilustran gráficamente todas las propiedades termodinámicas del agua en la región geotérmica completa de interés práctico, de 0.01 bar hasta 1000 bar y de 0°C a 800°C.

La primera ley de la termodinámica asegura que en cualquier proceso la suma del trabajo mecánico y el calor intercambiado es igual al cambio que experimenta la energía interna del fluido. Sin embargo, en geotermia se

emplea comúnmente la entalpía específica como potencial para representar esa variación. La razón por la cual la entalpía es la función usada en reservorios geotérmicos se debe a que en un proceso termostático a presión constante el cambio en la entalpía incluye el cambio en la energía interna más el trabajo hecho, lo cual es exactamente igual a la transferencia neta de calor realizada durante el proceso. Esta relación, en términos de ecuaciones, es como sigue:

$$\Delta h_w(p, s_w) = \Delta e_w + p \Delta v_w = \Delta Q_p \quad (1)$$

El símbolo Δ significa cambio diferencial y $v_w = 1/\rho_w$ es el volumen específico. El subíndice w representa al agua y ΔQ_p es el calor isobárico intercambiado. Otro potencial usual es la energía libre de Helmholtz f_w , que mide el trabajo útil obtenible de un fluido dentro de un sistema cerrado a temperatura y volumen constantes. La IAPWS-95 utiliza f_w en su formulación termodinámica (Wagner and Pruss, 2002):

$$f_w(\rho_w, T) = e_w - T s_w \quad (2)$$

La función f_w se puede hacer adimensional con un cambio de variable y entonces se le llama energía libre de Helmholtz reducida:

$$\frac{f_w(\rho_w, T)}{R T} = \Phi\left(\frac{\rho_w}{\rho_c}, \frac{T_c}{T}\right) = \Phi^{gas-ideal} + \Phi^{residual} \quad (3)$$

Donde: $\rho_c = 322 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $T_c = 647.096 \text{ K}$, $R = 0.46151805 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$

La función auxiliar general Φ está compuesta por dos partes, la primera es gas ideal y la segunda es residual. Al combinarse ambas partes queda completamente definida una superficie de Helmholtz (Watanabe, 1996). Todas las demás propiedades termodinámicas se obtienen por diferenciación parcial sobre esta superficie:

$$p = \rho_w^2 \left(\frac{\partial f_w}{\partial \rho_w} \right)_T, \quad e_w = f_w - T \left(\frac{\partial f_w}{\partial T} \right)_{\rho_w}, \quad h_w = f_w - T \left(\frac{\partial f_w}{\partial T} \right)_{\rho_w} + \rho_w \left(\frac{\partial f_w}{\partial \rho_w} \right)_T, \quad (4)$$

$$c_v = \left(\frac{\partial e_w}{\partial T} \right)_v, \quad c_p = \left(\frac{\partial h_w}{\partial T} \right)_p, \quad s_w = - \left(\frac{\partial f_w}{\partial T} \right)_{\rho_w}$$

Esta formulación es válida en toda la región estable del agua, desde 0°C hasta 1000°C y entre 0.01 bar hasta 10,000 bar. Los límites de validez absolutos de la IAPWS-95, más allá de los cuales ya no pueden hacerse cálculos. son $T \sim 190\text{K}$ y 5000K y $p \sim 1.0 \times 10^5 \text{ MPa}$. Las gráficas siguientes para el agua se obtuvieron utilizando el software desarrollado y descrito en Wagner and Pruss (2002) y Harver *et al.* (2004). Las ilustraciones aquí presentadas se restringen a la densidad y la entalpía antes y alrededor del punto crítico del agua y en los rangos supercríticos.

Densidad del agua geotérmica submarina

El fluido en reservorios submarinos profundos puede encontrarse a distintas condiciones termodinámicas que dependen de la profundidad y, por consiguiente, de la presión. Las siguientes gráficas muestran la densidad del agua en un amplio rango de temperaturas a las diferentes presiones de 100, 221.2 y 400 bar.

En la Figura 2 se observa que existe una discontinuidad que corresponde a una variación brusca de la densidad del agua que va de 688.4 kg/m^3 a la temperatura crítica de 311°C , hasta los 55 kg/m^3 a 311.1°C . Este salto brusco se debe al cambio de la fase líquida a la fase vapor a 100 bar de presión. Un aspecto práctico importante que hay que observar es que arriba de los 312°C la densidad, o sea la masa volumétrica del agua, es muy baja, variando desde 55 a 17 kg/m^3 a los 1000°C .

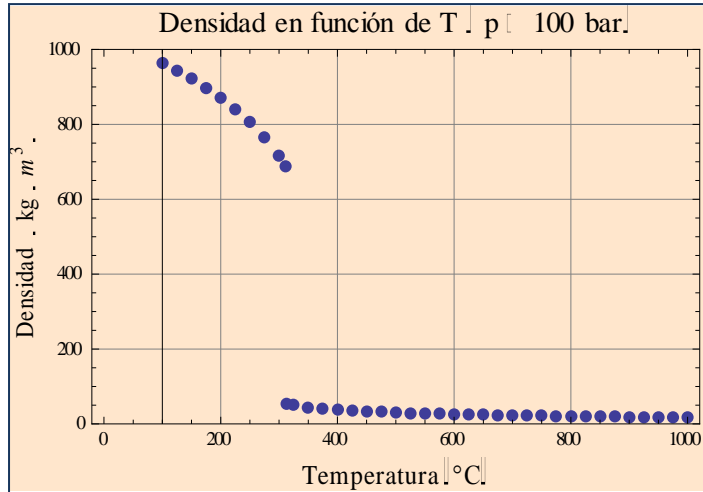


Fig. 2. Comportamiento de la densidad del agua entre la fase líquida y el vapor. Se observa una discontinuidad de ρ_w entre 311°C y 312°C .

La Figura 3 ilustra el comportamiento exacto del agua entre 373°C y 375°C , observándose la discontinuidad que corresponde al punto crítico (221.2 bar , 374.15°C). En este pequeño rango de temperatura la densidad del agua desciende de 428.7 kg/m^3 a 216.8 kg/m^3 . Este valor inferior de ρ_w a 375°C es, sin embargo, casi trece veces mayor que el que alcanza ρ_w a los 1000°C a la presión de 100 bar.

La Figura 4 muestra la densidad del agua antes y después del punto crítico a 400 bar de presión. Se observan dos variaciones abruptas, una a los 400°C donde $\rho_w = 523 \text{ kg/m}^3$ (a los 425°C , $\rho_w = 394 \text{ kg/m}^3$). La segunda ocurre a los 450°C donde la densidad vale 271 kg/m^3 . A temperaturas mayores la densidad continúa su descenso, aunque más suavemente que en los casos anteriores, hasta

alcanzar un valor mínimo de 70 kg/m^3 a los 1000°C , a la misma presión de 400 bar.

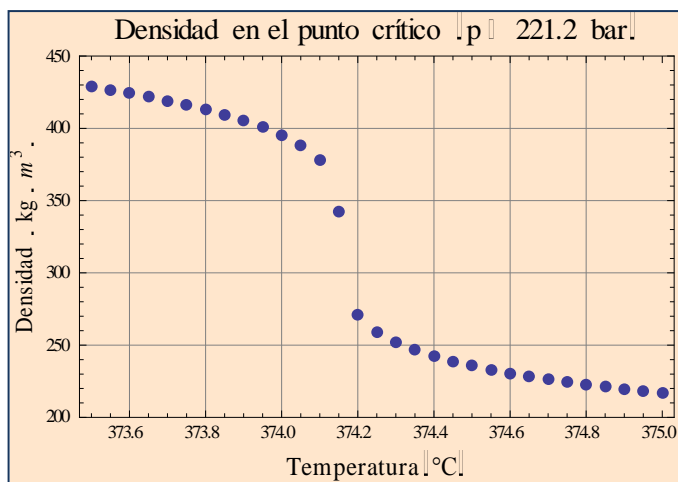


Fig. 3. Densidad crítica del agua mostrando la discontinuidad de ρ_w en $T = 374.15^\circ\text{C}$.

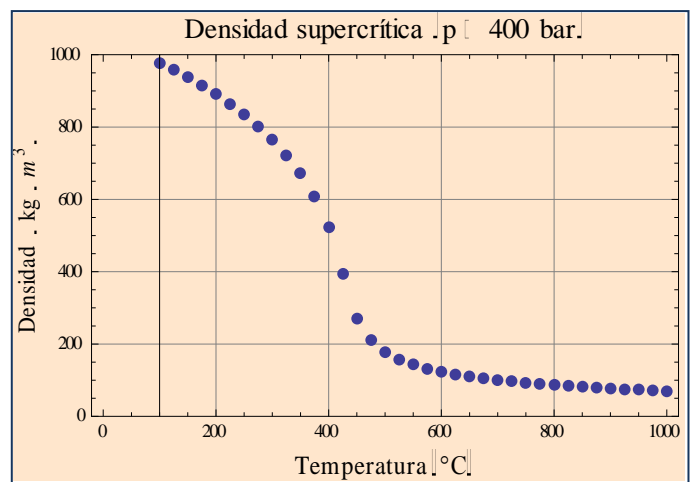


Fig. 4. Densidad supercrítica del agua en función de T.

Entalpía del agua geotérmica submarina

La entalpía específica del fluido en reservorios submarinos profundos se muestra en las figuras 5, 6 y 7 a presiones de 100, 221.2 y 400 bar respectivamente. En los tres casos ilustrados la entalpía se incrementa al aumentar la temperatura en forma casi lineal. En la Figura 5 se observa la misma discontinuidad anterior y que corresponde a un salto brusco de entalpía que va de 1408 kJ/kg a 311°C , a 2726 kJ/kg a los 311.1°C . El primer valor es del líquido y el segundo es el del vapor.

En la Figura 6 se aprecia el incremento de la entalpía del agua entre 373°C y 375°C. Se observa claramente la discontinuidad en el punto crítico al aumentar la entalpía de 2003 kJ/kg a 2183 kJ/kg. Este salto es inferior al del caso anterior con la presión igual a 100 bar. Por último, la Figura 7 muestra el incremento continuo de la entalpía entre 100°C y 1000°C.

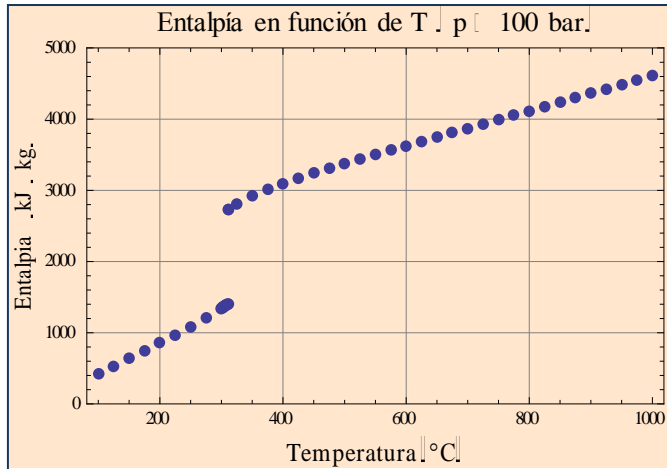


Fig. 5. Entalpía del agua antes del punto crítico. Se observa la discontinuidad de h_w en $T = 311.1^\circ\text{C}$.

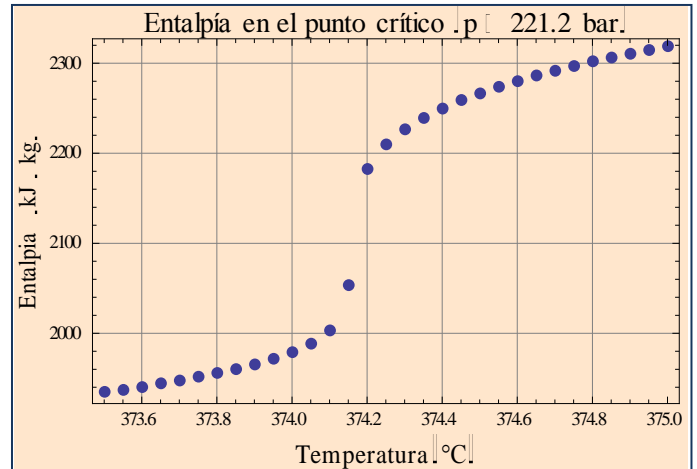


Fig. 6. Gráfica de la entalpía crítica del agua mostrando la discontinuidad de h_w en $T = 374.15^\circ\text{C}$.

Energía del agua en condiciones supercríticas

Los ejemplos ilustrados demuestran que la masa disponible del fluido geotérmico en sistemas profundos es mucho mayor cuando aumentan la presión y la temperatura arriba del punto crítico del agua. El rango termodinámico que va de 375°C a 1000°C, a más de 221 bar, se llama rango de condiciones supercríticas. El agua en este rango contiene más energía por unidad de volumen que el fluido geotérmico usual. Por ejemplo, a 50 bar y 270°C el agua contiene 24.67 kg por cada m^3 , su entalpía es de 2818.9 kJ/kg; esto equivale a 69,542 kJ/m^3 . En el punto crítico, la densidad es 216.82 kg/m^3 y la entalpía 2319 kJ/kg, lo cual representa 502,806 kJ/m^3 . A 400 bar y 400°C la densidad es 523.3 kg/m^3 y la entalpía 1931 kJ/kg, su producto representa más de un millón de kJ/m^3 , o sea, una energía volumétrica 14.5 veces mayor que la del agua a 50 bar y 270°C.

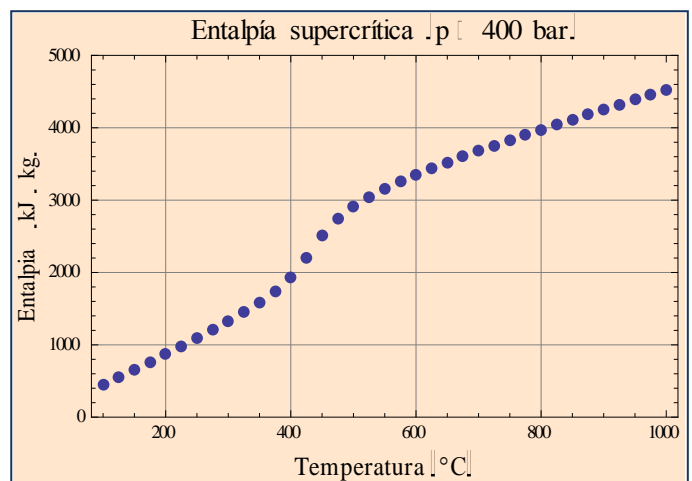


Fig. 7. Entalpía supercrítica del agua en función de T.

Aspectos prácticos de la geotermia submarina

Se estima que las descargas hidrotermales submarinas representan aproximadamente el 30% del total del flujo de calor que emerge continuamente del lecho oceánico (Alt, 1995). Las mediciones hechas en varios sistemas submarinos con chimeneas (Benett *et al.*, 2008) permiten establecer un flujo de calor que oscila entre 100 y 1000 MW_T (megawatts térmicos), aunque puede haber flujos menores. El valor más alto de 1000 MW_T corresponde a flujos de megaplumas detectadas en algunos lugares del océano Pacífico (Alt, 1995).

Hiriart et al. (2010) estimaron, con una técnica de evaluación burda preliminar, la energía eléctrica que se podría obtener teóricamente en las ventilas hidrotermales, sin perforación de pozos. El método de extracción de energía que los autores citados proponen consiste en la instalación de un intercambiador de calor en forma de bobina en espiral situado directamente sobre la estructura de la ventila. Esta proporcionaría el calor necesario para evaporar el fluido circulante dentro de la bobina. Utilizando el criterio clásico de la eficiencia del motor térmico de Carnot, los autores estiman una eficiencia total del ciclo termodinámico del 4.4% para ese sistema submarino. Bajo ciertas suposiciones de flujo, diámetro y temperatura de la ventila, los autores deducen la posibilidad teórica de generar hasta 20 MW eléctricos por cada ventila. Considerando el aspecto real de que las grietas se cierran y el fluido hidrotermal deja de fluir, la opción más conveniente y segura es perforar directamente el lecho oceánico, en la cercanía de las zonas de ventilación hidrotermal donde se encuentran las temperaturas y condiciones adecuadas. En ambos casos se tendrá que desarrollar la tecnología necesaria para instalar una turbina y un generador acoplado, encastrados en el fondo del océano.

Los recursos energéticos de la geotermia submarina pueden llegar a satisfacer una buena parte de las necesidades de nuestra civilización. Este importante aspecto está siendo reconocido poco a poco en sectores especializados. Sin embargo, aun hay muchos retos tecnológicos sin resolver. Uno de ellos es la perforación eficiente y económica en rocas ígneas a gran profundidad. Otro es el desarrollo de turbogeneradores avanzados que funcionen a flujo total con el fluido submarino a alta presión y temperatura supercrítica. Una vez resueltos estos problemas, los pozos perforados y las plantas geotermoeléctricas dispondrán de un suministro ilimitado de agua marina y calor magmático para generar electricidad eficientemente.

Conclusiones

La energía volumétrica contenida en el fluido hidrotermal submarino, una fracción de la cual puede transformarse en electricidad, depende directamente del producto de la porosidad de la roca, de la entalpía del agua y de su densidad supercrítica. Debido a su mayor densidad, el agua geotérmica situada en el rango de condiciones supercríticas contiene mucha más energía térmica por unidad de volumen que el fluido empleado en plantas geotérmicas con la tecnología actualmente en uso. La geotermia submarina profunda representa entonces un enorme potencial energético jamás usado. Esta energía podrá utilizarse en un futuro, mediante estaciones generadoras especiales colocadas en el lecho marino, conectadas a turbinas avanzadas de flujo total.

Referencias

- Alt, J., 1995. Subseafloor Processes in Mid-Ocean Ridge Hydro-thermal Systems. *Geophysical Monograph*, American Geophysical Union, Vol. **91**, pp. 85-114.
- Bennett, S.A., E.P. Achterberg, D.P. Connelly, P.J. Statham, G.R. Fones, and C.R. German, 2008. The distribution and stabilisation of dissolved Fe in deep-sea hydrothermal plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. **270** (3-4), pp. 157-167.
- Bundschuh, J. and M.C. Suárez Arriaga, 2010. *Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems - Fundamentals of Mass, Energy and Solute Transport in Poroelastic Rocks*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Leiden, Holland; London, England, 525 pp.
- Bustos-Serrano, H., 1983. Caracterización Física, Química y Morfológica de la Zona Hidrotermal Marina de La Jolla, Punta Banda, B.C., México. Tesis de licenciatura, pp. 114. Esc. Sup. de Ciencias Marinas, UABC, 114 p. Inédito.

- García, G.H., 2000. Modelo del Estado Térmico Inicial del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México". Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM, 184 pp. Inédito.
- Grijalva, N., 1986. *Investigación de la Energía Geotérmica en la Depresión de Wagner en el Golfo de California. Latitud 31° 00' al 31° 15' y Longitud 113° 50' al 114° 10"*. Reportes preparados para la Comisión Federal de Electricidad bajo contrato No. CCP-CLS-002/86. Fecha del primer reporte: 10/1/86, 22 pp. Fecha del segundo reporte: 11/22/86, 38 pp. Inéditos.
- Harvey, A.H, A.P. Peskin, and S.A. Klein, 2004. *NIST/ASME steam properties, Version 2.21, Users' Guide*. Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, March 2004.
- Hiriart G., S. Alcocer, R.M. Prol, and S. Espíndola, 2010. Submarine geothermics: Hydrothermal vents and electricity generation. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
- Holzbecher, E., 1998. *Modeling density-driven flow in porous media: Principles, Numerics, Software*. Springer, Berlin, New York.
- Mercado, S., 1990. Manifestaciones Hidrotermales Marinas de Alta Temperatura (350°C) Localizadas a 21°N, a 2600 m de Profundidad en la Elevación Este del Pacífico. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 6/3, pp. 225-263.
- Mercado, S., 1993. Geotermoquímica de Manifestaciones Hidrotermales Marinas de Alta Temperatura, *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 9/2, pp. 155-164.
- Schmidt, E. and U. Grigull, 1979. *Properties of water and steam in SI-units, 0–800°C and 0–1000 bar*. 2nd ed., Springer, Berlin, Germany.
- Suárez, M.C., 1998. Deep Geothermal Systems in Mexico: An Integral Diversified Resource for the Energy of the Future. *Geothermal Resources Council Transactions*, 22, pp. 327-331.
- Vidal, V.M., F.V. Vidal, J.D. Isaacs, and D.R. Young, 1978. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California 1". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83 /B4, pp. 1757-1774.
- Vidal, V.M., F.V. Vidal, and J.D. Isaacs, 1981. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California 2. Evolutionary History and Isotope Geochemistry. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86/B10, pp. 9451-9468.
- Wagner, W., 2000. The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam". *ASME J. Eng. Gas Turbines and Power*, Vol. 122, pp. 150–182.
- Wagner, W. and A. Pruss, 2002. The IAPWS Formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 31, pp. 387–535.
- Watanabe, K., 1996. *Release on the IAPWS Formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use*. Fredericia, Denmark, 1996.