

La formulación IAPWS-95 del potencial de Helmholtz para las condiciones críticas y supercríticas del agua geotérmica en una interfaz gráfica eficiente

José Darío Rojas Hernández y Mario César Suárez Arriaga

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Mich. correo: mcsa50@gmail.com, jdr_hdez@yahoo.com.mx

Resumen

El comportamiento termodinámico del agua tiene una importancia crucial en una multitud de aplicaciones científicas e industriales. El H_2O es uno de los fluidos que han sido más y mejor investigados teórica y experimentalmente. *The International Association for the Properties of Water and Steam* (IAPWS) es el organismo responsable de la estandarización internacional de las propiedades termofísicas del agua, la cual incluye una ecuación de estado de amplio espectro para la termodinámica del H_2O ordinaria para uso general y científico (IAPWS-95). La formulación IAPWS-95 se basa en la energía libre de Helmholtz como el potencial fundamental en función de la temperatura y la densidad del agua. Todas las otras propiedades termodinámicas se obtienen por derivación parcial de la superficie de Helmholtz y su manipulación algebraica. Las propiedades programadas y presentadas en este artículo son las más útiles en ingeniería geotérmica: presión, volumen específico, entropía, entalpía, energía interna, viscosidad dinámica, viscosidad cinemática, compresibilidad isotérmica, calores específicos y conductividad térmica. Estas se computan para cada una de las fases, líquido y vapor, por separado. Además el programa calcula la presión y/o la temperatura de saturación en la llamada Línea K del agua bifásica. Las propiedades se calculan con gran precisión numérica y cubren todos los rangos experimentales medidos hasta la fecha para el H_2O . El código completo se presenta en el lenguaje de programación *Mathematica*-9. Esta contiene una potente interfaz gráfica que permite visualizar de inmediato cualquiera de estas propiedades en gráficas 2D y 3D simultáneamente, en un amplio rango termodinámico que en temperaturas va desde $0^\circ C$ hasta $4730^\circ C$ y en presiones desde 0.1 MPa (1 bar) hasta 100 GPa (10^6 bar). En la curva de saturación el rango abarca de $0^\circ C$ hasta $374^\circ C$. Empleamos algoritmos altamente eficientes con base en la formulación IAPWS-95, en un programa de cómputo original que se publica por primera vez.

Palabras clave: Ingeniería de yacimientos geotérmicos, ecuación de estado del agua, fase líquida, fase vapor, agua bifásica, termodinámica.

The IAPWS-95 formulation of the Helmholtz's potential for the critical and supercritical conditions of geothermal water in an efficient graphic interface

Abstract

The thermodynamic water behavior has a crucial importance in a multitude of scientific and industrial applications. H_2O is one of the fluids that has been more and better investigated theoretically and experimentally. The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) is the organization responsible for international standardization of the thermophysical water properties, which includes an equation of state for the thermodynamic properties of ordinary H_2O for general and scientific use, called IAPWS-95. The IAPWS-95 formulation is based on the Helmholtz's free energy as the fundamental potential and it is function of water temperature and water density. All other thermodynamic properties are obtained by partial differentiation and algebraic manipulation of the Helmholtz surface. The properties programmed and showed in this article are the most useful in

geothermal engineering: pressure, specific volume, entropy, enthalpy, internal energy, dynamic viscosity, kinematic viscosity, isothermal compressibility, specific heat and thermal conductivity. These properties are computed for each phase, liquid and vapor, separately. Besides, the program calculates the saturation pressure and/or saturation temperature on the called K-line of biphasic water. The properties are calculated with high numerical precision and cover all ranges experimentally measured nowadays for H₂O. The complete code is shown in Mathematica-9 programming language. This code contains a potent graphical interface that allows to display immediately any of these properties simultaneously in 2D and 3D graphics, in a wide thermodynamic range which in temperatures goes from 0°C to 4730°C and pressures from 0.1 MPa (1 bar) to 100 GPa (10⁶ bar). On the saturation curve the range goes from 0°C to 374°C. We used highly efficient algorithms based on the IAPWS-95 formulation, in an original computer program which is published for the first time.

Keywords: Geothermal Reservoir Engineering, equation of state of water, liquid phase, vapor phase, water biphasic, thermodynamics.

Introducción

La Tierra entera es un sistema geotérmico con enormes cantidades de energía. El calor contenido en el interior del planeta se debe en parte al enfriamiento gradual del núcleo, proviniendo la mayor parte del decaimiento de elementos radiactivos en el manto y en la corteza. Por procesos conductivos y principalmente convectivos el calor interno terrestre fluye hacia el exterior creando diversos sistemas geotérmicos como son los yacimientos de aceite y gas, los reservorios hidrotermales, los de roca seca caliente, los submarinos, los de magma, los geopresurizados, los volcánicos y los acuíferos de agua potable (Suárez, 2000).

De todas las sustancias puras, el agua ordinaria o simplemente H₂O es sin duda de las sustancias más importantes que existen. Se utiliza para generar mucha de la electricidad que mueve este mundo industrializado. En ingeniería química es el solvente más común. Una de sus aplicaciones modernas es la eliminación de desechos peligrosos con agua supercrítica. En la naturaleza, el agua juega un papel esencial en la variación del clima, cubre más de dos tercios de la superficie terrestre y tiene una importancia clave para todos los organismos vivos. Sus propiedades bajo temperaturas y presiones extremas son esenciales en el campo de la geología.

Especialmente de nuestro interés, bajo condiciones termodinámicas adecuadas, el vapor de agua y el agua líquida coexisten simultáneamente en los reservorios geotérmicos de alta entalpía. Si el reservorio contiene inicialmente sólo líquido, la explotación disminuye la presión del yacimiento provocando la aparición de la fase de vapor. Se dice entonces que el fluido en el reservorio es bifásico (Bundschuh and Suárez, 2010).

En vista de la multitud de aplicaciones e importancia del agua, se ha llevado a cabo una enorme cantidad de mediciones de varias de sus propiedades, desde principios del siglo XX hasta nuestros días. En este sentido, el agua no puede ser comparada con ningún otra sustancia, es uno de los fluidos mejor investigados teórica y experimentalmente. Sin embargo, una descripción sobre todo el continuo del rango termodinámico de las propiedades termodinámicas del agua puede lograrse únicamente con una ecuación de estado que sea capaz de representar toda la información considerada como fiable.

Desde 1970, la *International Association for the Properties of Steam* (IAPS) ha estado a cargo de coordinar investigaciones internacionales referentes a las propiedades termodinámicas del agua y el vapor. Más tarde IAPS cambio su nombre a *International Association for the Properties of Water and Steam* (IAPWS), quien es responsable de la estandarización internacional de varias propiedades termodinámicas del agua. Estas estandarizaciones son publicadas periódicamente, y una de las más importantes es la ecuación de estado para las propiedades termodinámicas del agua ordinaria para uso general y científico IAPWS-95 (Wagner y Pruss, 2002).

La formulación IAPWS-95 es una ecuación fundamental de la energía libre de Helmholtz como función de la temperatura y de la densidad, $f=f(T,\rho)$. Otras propiedades termodinámicas se obtienen por diferenciación y manipulación algebraica de este potencial sin usar ninguna otra información. IAPWS (2009), con base en sus exhaustivas pruebas, acepta la validez de esta formulación en toda la región de fluido estable del agua, desde temperaturas en la curva de presión de fusión hasta los 1273°K y presiones de 1000 MPa. Dentro de esta región, la formulación IAPWA-95 representa los datos experimentales disponibles a la fecha en que IAPWS-95 fue publicada. Fuera de estos límites, al menos para la presión y la entalpía, la formulación puede ser extrapolada a presiones y temperaturas extremadamente altas, comportándose razonablemente hasta presiones de 100 GPa y temperaturas hasta de 5000°K. A presiones por debajo del punto triple, IAPWA-95 se comporta razonablemente cuando se extrae hacia la curva de presión de sublimación hasta bajar a temperaturas de 130°K. Las curvas de presión de fusión y sublimación quedan descritas por las relaciones dadas en IAPWS (2011). IAPWS (2009) declara que tanto como ha podido comprobar con datos experimentales, la formulación se comporta razonablemente cuando se extrae a las regiones metaestables.

Constantes Básicas del Agua

En esta sección listamos los valores numéricos de algunas constantes termodinámicas del agua, las cuales son usadas a lo largo del presente texto y que además son las aceptadas y recomendadas por IAPWS (1992, 2001) para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua con la formulación IAPWS-95.

Valores termodinámicos del punto crítico	Valores termodinámicos del punto triple
$T_c = 647.096 \text{ K}$	$T_t = 273.16 \text{ K}$
$p_c = 22.064 \text{ MPa}$	$p_t = 611.657 \text{ Pa}$
$\rho_c = 322 \text{ kg m}^{-3}$	$\rho_t = 999.793 \text{ kg m}^{-3}$
$R = 0.461\ 518\ 05 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$\rho_t'' = 0.004\ 854 \text{ kg m}^{-3}$
$\mu_c = 1.00 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$	

Formulación 1995 para las Propiedades Termodinámicas del Agua Ordinaria para Uso General y Científico

La *Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use* proporciona la representación más precisa de las propiedades termodinámicas del agua en sus fases de fluido al momento en que esta fue presentada. IAPWS-95 es una ecuación fundamental para la energía libre específica de Helmholtz, f , y consta de dos partes: una correspondiente al gas ideal ϕ^o y la otra a un residuo ϕ^r , de tal manera que, expresada en forma adimensional, $\phi = f / (RT)$:

$$\frac{f(\rho, T)}{RT} = \phi(\delta, \tau) = \phi^o(\delta, \tau) + \phi^r(\delta, \tau) \quad (0.1)$$

Las ecuaciones correspondientes para las partes de gas ideal ϕ^o y residual ϕ^r de la energía libre de Helmholtz adimensional están dadas por las expresiones:

$$\phi^o(\delta, \tau) = \ln \delta + n_1^o + n_2^o \tau + n_3^o \ln \tau + \sum_{i=4}^8 n_i^o \ln \left[1 - e^{-\gamma_i^o} \right] \quad (0.2)$$

$$\phi^r(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^7 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{51} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{e_i}} + \sum_{i=52}^{54} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\alpha_i (\delta - \varepsilon_i)^2 - \beta_i (\tau - \gamma_i)^2} + \sum_{i=55}^{56} n_i \Delta^{b_i} \delta \Psi \quad (0.3)$$

Para las definiciones de δ y τ véase la nomenclatura. Los parámetros y coeficientes contenidos en las ecs. (0.2) y (0.3) son dados por Wagner y Pruss (2002) e IAPWS (2009).

Todas las propiedades termodinámicas pueden ser derivadas de la ec. (0.1) usando las combinaciones apropiadas de la energía libre de Helmholtz adimensional y sus derivadas.

Función Termodinámica	Relación con el Potencial de Helmholtz	Estructura bajo la formulación IAPWS-95
Presión	$p = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T$	$\frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} = 1 + \delta \phi_\delta^r$
Entropía	$s = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho$	$\frac{s(\delta, \tau)}{R} = \tau (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) - \phi^o - \phi^r$
Energía Interna	$u = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho$	$\frac{u(\delta, \tau)}{RT} = \tau (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r)$
Entalpía	$h = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho + \rho \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T$	$\frac{h(\delta, \tau)}{RT} = 1 + \tau (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) + \delta \phi_\delta^r$
Capacidad Calorífica Isocórica	$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_\rho$	$\frac{c_v(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 (\phi_{\tau\tau}^o + \phi_{\tau\tau}^r)$
Capacidad Calorífica Isobárica	$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$	$\frac{c_p(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 (\phi_{\tau\tau}^o + \phi_{\tau\tau}^r) + \frac{(1 + \delta \phi_\delta^r - \delta \tau \phi_{\delta\tau}^r)^2}{1 + 2 \delta \phi_\delta^r + \delta^2 \phi_{\delta\delta}^r}$

La correlación para calcular la viscosidad dinámica del agua pura ya sea en estado líquido, vapor o supercrítica, está dada por la ecuación:

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_0(\theta) \times \bar{\mu}_1(\theta, \delta) \times \bar{\mu}_2(\theta, \delta) \quad (0.4)$$

Los factores $\bar{\mu}_0$ y $\bar{\mu}_1$ están dados por:

$$\bar{\mu}_0(\theta) = \frac{100\sqrt{\theta}}{\sum_{i=0}^3 \frac{H_i}{\theta_i}}$$

$$\bar{\mu}_1(\theta, \delta) = \exp \left[\delta \sum_{i=0}^5 \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right)^i \sum_{j=0}^6 H_{ij} (\delta - 1)^j \right]$$

Para las definiciones de θ y δ véase la nomenclatura. Los valores de los coeficientes H_i y H_{ij} se pueden consultar en Huber *et al.* (2009) e IAPWS (2008). El término $\bar{\mu}_2$ es significativo únicamente para un rango de temperaturas y densidades alrededor del punto crítico. Fuera de esta pequeña región crítica, contribuye poco en la ec. (0.4), por lo cual se simplifica la complejidad y velocidad de cómputo fijando $\bar{\mu}_2 = 1$ (Huber *et al.*, 2009).

Propiedades de Saturación

Las siguientes correlaciones permiten calcular, para una temperatura dada entre $273.16 \text{ K} \leq T \leq 647.096 \text{ K}$, las propiedades termodinámicas del agua bifásica en la curva de saturación líquido-vapor.

La expresión para calcular la presión de vapor p_σ tiene la forma:

$$\log \frac{p_\sigma}{p_c} = \frac{T_c}{T} \left(a_1 g + a_2 g^{1.5} + a_3 g^3 + a_4 g^{3.5} + a_5 g^4 + a_6 g^{7.5} \right)$$

Para calcular las densidades de líquido saturado y vapor saturado tenemos las expresiones:

$$\frac{\rho'}{\rho_c} = 1 + b_1 g^{1/3} + b_2 g^{2/3} + b_3 g^{5/3} + b_4 g^{16/3} + b_5 g^{43/3} + b_6 g^{110/3}$$

$$\log \left(\frac{\rho''}{\rho_c} \right) = c_1 g^{2/6} + c_2 g^{4/6} + c_3 g^{8/6} + c_4 g^{18/6} + c_5 g^{37/6} + c_6 g^{71/6}$$

Las ecuaciones para calcular los valores de la entalpía h , de la energía interna u y de la entropía s específicas de líquido y vapor saturado se resumen como sigue:

Entalpía específica de líquido h' y vapor h'' de saturación:

$$h' = \alpha + \frac{T}{\rho'} \frac{dp_\sigma}{dT} \quad h'' = \alpha + \frac{T}{\rho''} \frac{dp_\sigma}{dT}$$

Energía interna específica de líquido u' y vapor u'' saturado:

$$u' = \alpha + \frac{1}{\rho'} \left(T \frac{dp_\sigma}{dT} - p_\sigma \right) \quad u'' = \alpha + \frac{1}{\rho''} \left(T \frac{dp_\sigma}{dT} - p_\sigma \right)$$

Entropía específica de líquido s' y vapor s'' saturado:

$$s' = \psi + \frac{1}{\rho'} \frac{dp_\sigma}{dT} \quad s'' = \psi + \frac{1}{\rho''} \frac{dp_\sigma}{dT}$$

con ϑ dada como en la nomenclatura. Para los valores críticos T_c , ρ_c y p_c véanse las definiciones de las constantes del agua. Los coeficientes a_i , b_i , c_i , α y ψ se pueden consultar en las tablas dadas por Wagner y Pruss (1993) e IAPWS (1992).

Programación de IAPWS-95 en Mathematica

Después de haber expuesto las relaciones necesarias para calcular las propiedades termofísicas de interés para el agua líquida y el vapor, se programó un grupo de algoritmos en Mathematica los cuales constan de cuatro módulos: IAPWS95[ρ , T], Saturacion[T], Viscosidad[ρ , T] y PropTermo[].

IAPWS95[ρ , T], contiene todas las correlaciones necesarias para computar las propiedades del agua en una sola fase al proporcionarle la densidad y la temperatura en la cual se desea computar y graficar esta información. Saturacion[T] da las propiedades de interés sobre la línea de saturación una vez que se introduce una temperatura de entre 273.16°K y 647.096°K. El modulo Viscosidad[ρ , T] proporciona la viscosidad dinámica del agua, tanto en una sola fase como sobre la curva de vaporización. Una vez ejecutado el módulo PropTermo[], este pedirá la información necesaria ya sea para calcular las siguientes propiedades en una fase (líquido o vapor) o región supercrítica: la presión, la entalpía, la energía interna, la entropía, la viscosidad, la capacidad calorífica isobárica y la capacidad calorífica isocórica; o en la curva de vaporización: la presión de vapor, la densidad de líquido y vapor saturado, la viscosidad de cada fase, además de la energía interna, la entropía y la entalpía de líquido y vapor saturado así como las capacidades caloríficas isocóricas e isobáricas del líquido y vapor saturados.

El algoritmo fue exhaustivamente verificado con las tablas que proporciona Wagner y Pruss (2002), con el programa NIST/ASME Steam: Database 10, versión 2.2 (Harvey *et al.*, 1996) y además con los valores que IAPWS (1992, 2008, 2009) ofrece en sus publicaciones para apoyar la programación de sus formulaciones en computadoras.

Puede ser que en un futuro la formulación IAPWS-95 sea actualizada, debido tal vez a nuevos datos experimentales, a la adopción de una nueva escala de temperatura o alguna otra razón. Pero IAPWS espera que sus formulaciones sigan siendo vigentes después de aplicar estas actualizaciones.

Las gráficas que se presentan en las figuras al final del texto fueron obtenidas con los módulos IAPWS95[ρ , T] y Viscosidad[ρ , T] para las propiedades del fluido en una sola fase y agua supercrítica.

Conclusiones

El carácter general de los algoritmos permite su aplicación tanto en sistemas subterráneos de baja temperatura (sistemas isotérmicos) como en sistemas geotérmicos de temperatura variable ($>37^\circ\text{C}$), los cuales son utilizados tanto como fuentes de energía como para usos directos.

Su amplio espectro termodinámico de validez le permite ser utilizado en cualquier sistema que involucre agua en cualquiera de sus fases: líquida, vapor, bifásica o supercrítica.

Los algoritmos programados, no solo reproducen con exactitud los valores de las mediciones ya hechas a la fecha, sino que describen con gran precisión el comportamiento termodinámico del agua supercrítica alcanzando temperaturas magmáticas, convirtiéndose así en una herramienta poderosa para coadyuvar en la exploración y explotación de recursos geotérmicos profundos.

Nomenclatura

Se utilizó la siguiente nomenclatura en el texto:

Cantidades Termodinámicas

c_p - Capacidad calorífica específica isobárica.	R - Constante específica de gas.
c_v - Capacidad calorífica específica isocórica.	s - Entropía específica.
f - Energía libre específica de Helmholtz.	T - Temperatura absoluta.
h - Entalpía específica.	u - Energía específica interna.
p - Presión.	μ - Viscosidad.
	ρ - Densidad de masa.

Variables adimensionales

δ - Densidad reducida, $\delta = \rho/\rho_c$.	π - Presión reducida, $\pi = p/p_c$.
ϑ - Temperatura reducida, $\vartheta = T/T_c$.	τ - Temperatura inversa reducida, $\tau = T_c/T$.
θ - Variable auxiliar, $\theta = 1-\vartheta$.	ϕ - Energía libre de Helmholtz
$\bar{\mu}$ - Densidad reducida, $\bar{\mu} = \mu/\mu_c$.	adimensional, $\phi = f/RT$.

Superíndices

o - Propiedad de gas ideal.
r - Residuo.
' - Estado de líquido saturado.
'' - Estado de vapor saturado

Subíndices

c - Punto crítico.
b - Punto de ebullición.
t - Punto triple.
σ - Saturación.

Referencias

- 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*. Vol. 2, Multiphysics Modeling Series, CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Harvey, A., A. Peskin and S. Klein, 1996. *NIST/ASME Steam: NIST Standard Reference Database 10*, version 2.2, US Secretary of Commerce.
- Huber, M.L., R.A. Perkins, A. Laesecke, and D.G. Friend, 2009. New International Formulation for the Viscosity of H₂O. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 38, No. 2. <http://www.nist.gov/srd/upload/jpcrd382009101p.pdf>

IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 1992. *Release on the Values of Temperature, Pressure and Density of Ordinary and Heavy Water Substances at their Respective Critical Points.* <http://www.iapws.org/relguide/crits.pdf>

IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 1992. *Revised Supplementary Release on Saturation Properties of Ordinary Water Substance.* <http://www.iapws.org/relguide/supsat.pdf>

IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 2001. *Guideline on the Use of Fundamental Physical Constants and Basic Constants of Water.* <http://www.iapws.org/relguide/fundam.pdf>

IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 2007. *Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam.* <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>

IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 2008. *Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Viscosity of Ordinary Water Substance.* <http://www.iapws.org/relguide/visc.pdf>

IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 2009. *Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use.* <http://www.iapws.org/relguide/IAPWS95-Rev.pdf>

IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 2011. *Revised Release on the Pressure along the Melting and Sublimation Curves of Ordinary Water Substance.* <http://www.iapws.org/relguide/MeltSub2011.pdf>

Suárez, M.C., 2000. *Flujo de fluidos no-isotérmicos en reservorios fracturados con porosidad y permeabilidad múltiples.* Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Inédito.

Wagner, W. and A. Pruss, 1993. International Equation for the Saturation Properties of Ordinary Water Substance. Revised According to the International Temperature Scale of 1990. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 22, No. 3. <http://www.nist.gov/data/PDFfiles/jpcrd457.pdf>

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, No. 2. <http://www.nist.gov/data/PDFfiles/jpcrd617.pdf>

FIGURAS EN LAS PÁGINAS SIGUIENTES

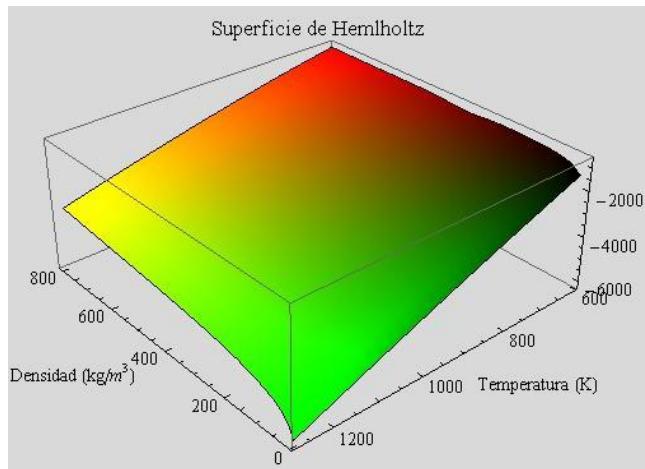


Figura 1. Energía libre de Helmholtz como función de la temperatura y densidad del agua en las regiones crítica y supercrítica.

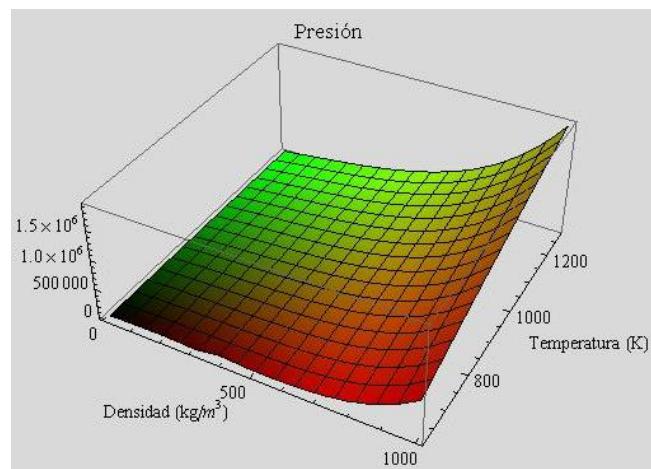


Figura 2. Presión como función de la temperatura y densidad del agua para la región crítica y supercrítica.

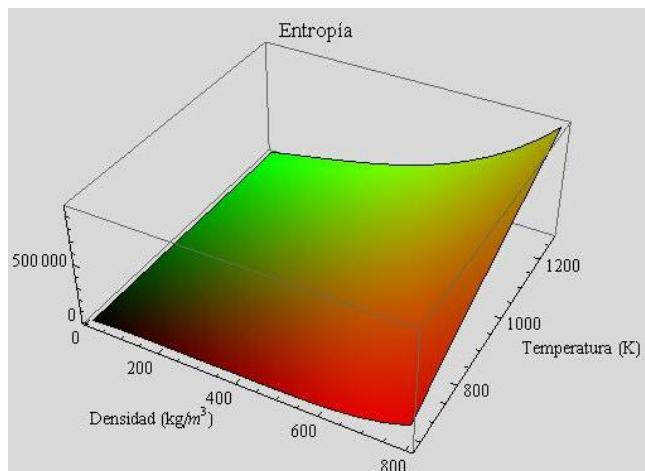


Figura 3. Entropía específica del agua supercrítica como función de la temperatura y la densidad.

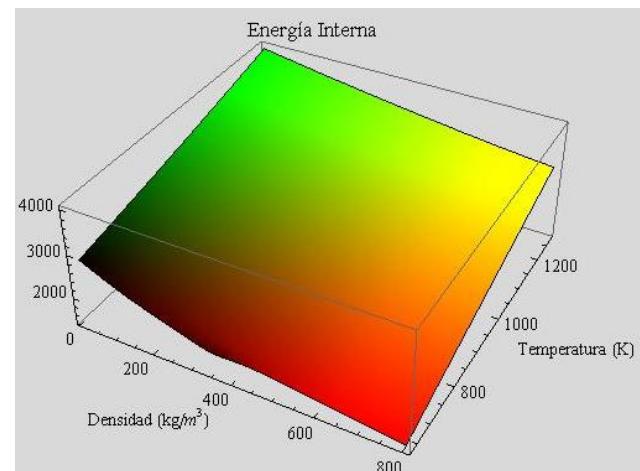


Figura 4. Energía interna específica en la región supercrítica del agua como función de la temperatura y la densidad.

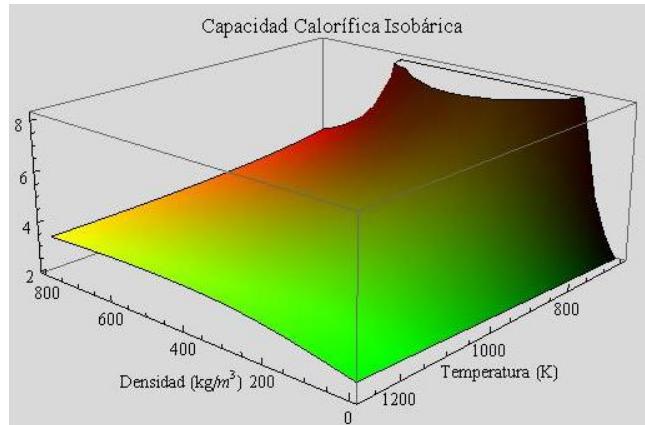


Figura 5. Capacidad calorífica isobárica específica como función de la temperatura y densidad del agua para la región supercrítica.

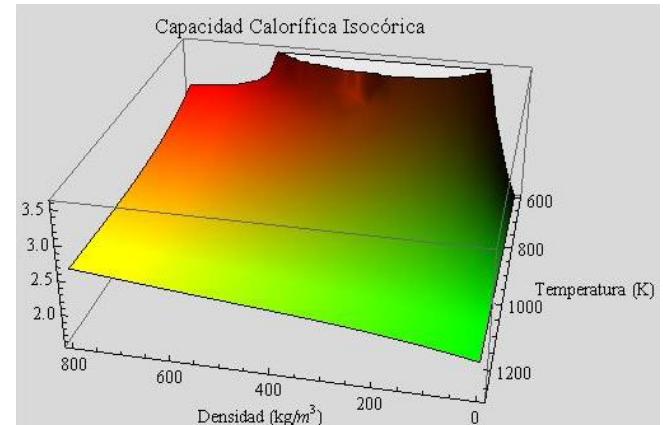


Figura 6. Capacidad calorífica isocórica específica en función de la temperatura y densidad del agua en la región supercrítica.

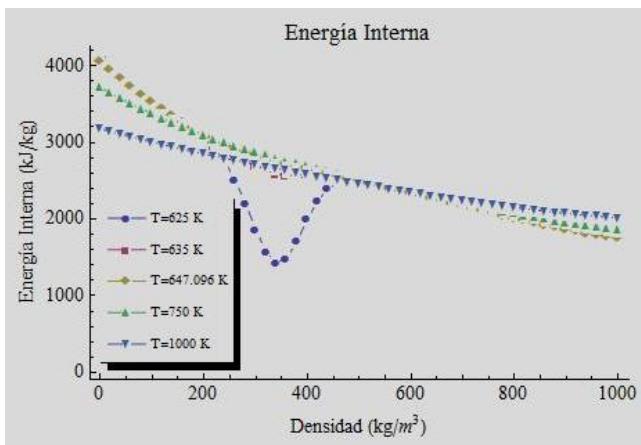


Figura 7. Energía interna específica del agua para diferentes temperaturas críticas y supercríticas.

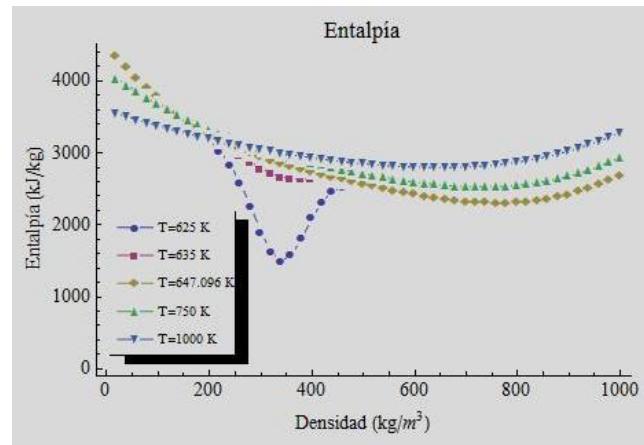


Figura 8. Entalpía específica como función de la densidad para diferentes temperaturas críticas.

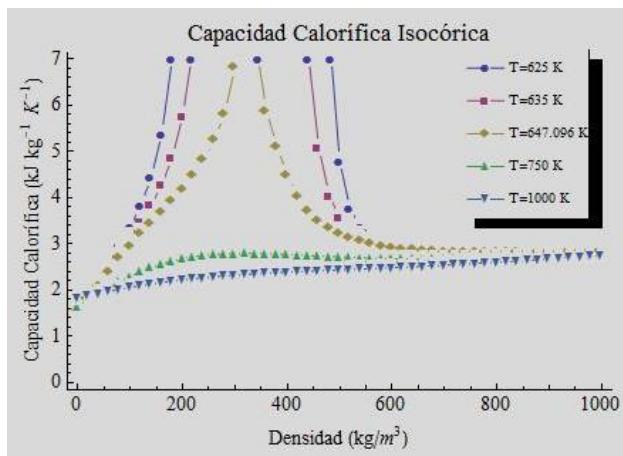


Figura 9. Capacidad calorífica isocórica específica para diferentes temperaturas críticas del agua.

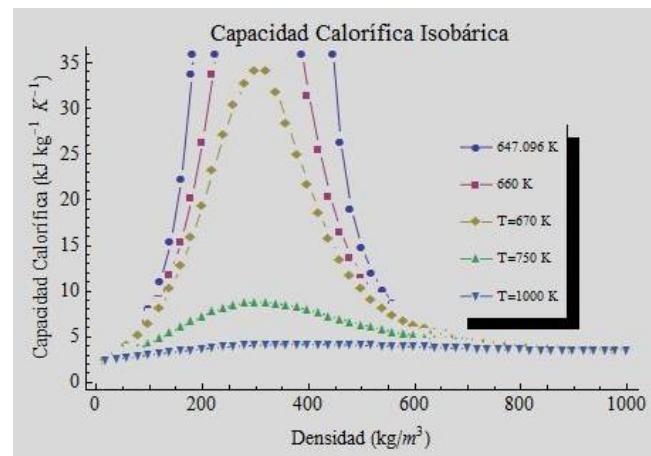


Figura 10. Capacidad calorífica isobárica específica para diferentes temperaturas críticas del agua.

Las siguientes gráficas fueron obtenidas con los módulos Saturacion[T], Viscosidad[ρ, T] e IAPWS95[ρ, T] para las propiedades de saturación del agua bifásica.

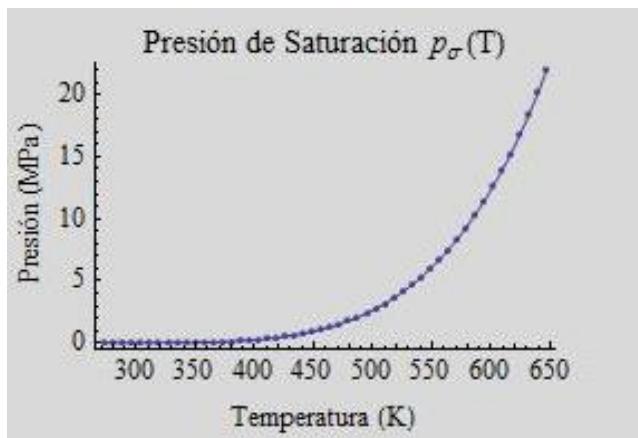


Figura 11. Presión de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura.

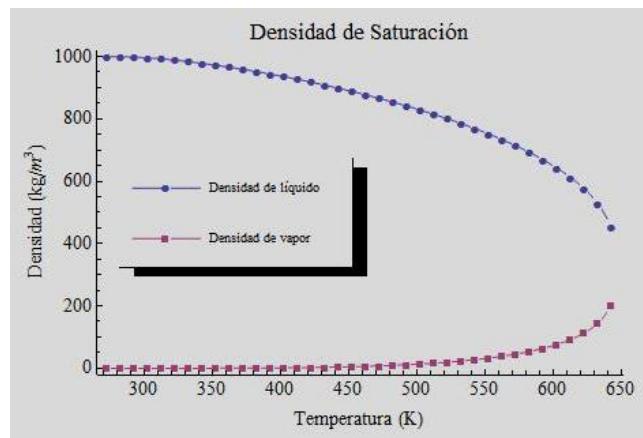


Figura 12. Densidades de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura.

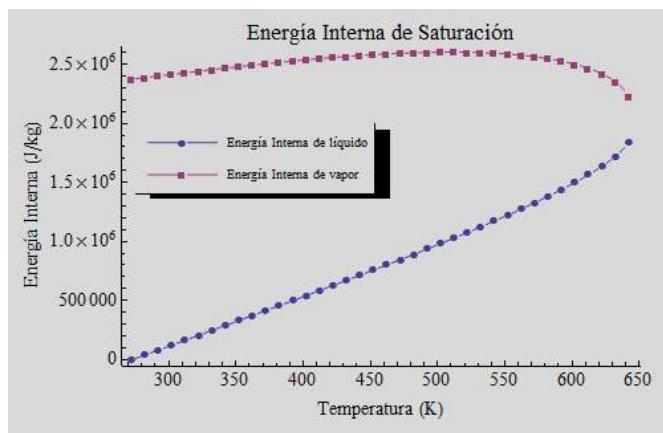


Figura 13. Energía Interna específica de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura.

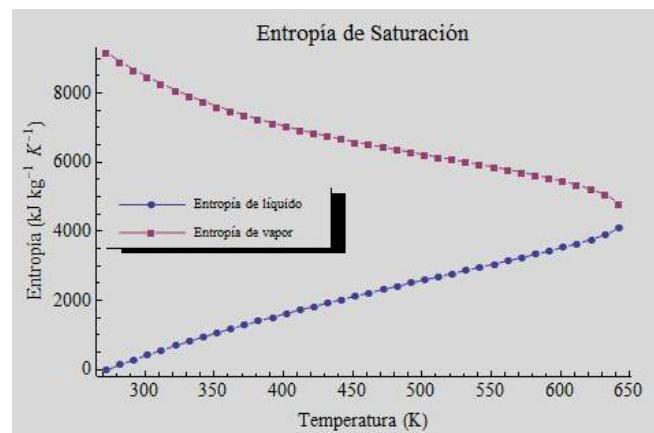


Figura 14. Entropía específica de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura.

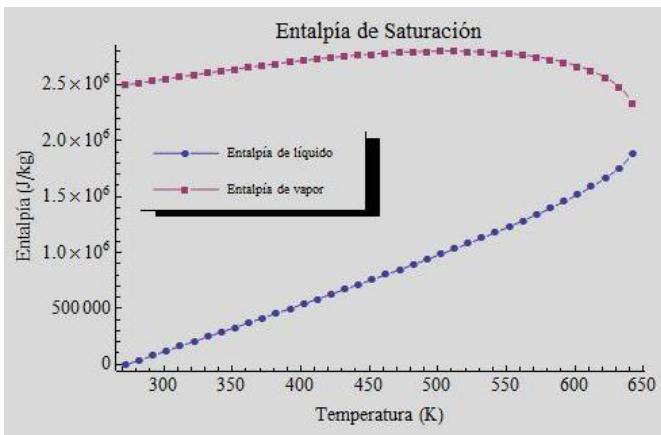


Figura 15. Enthalpía específica de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura.

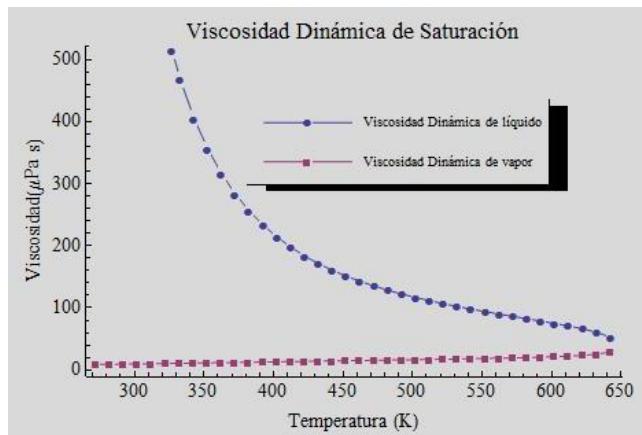


Figura 16. Viscosidad dinámica de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura

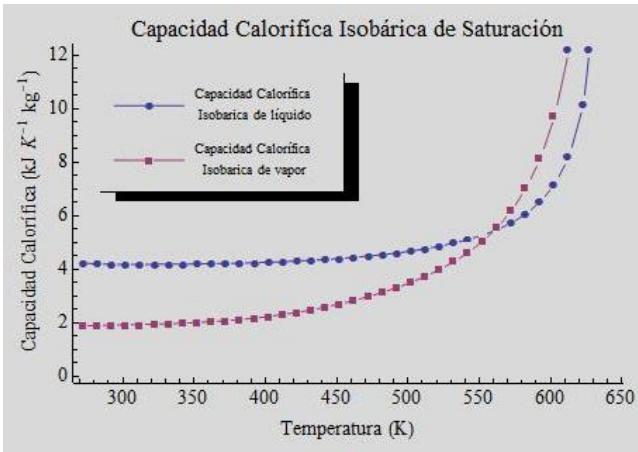


Figura 17. Capacidad calorífica isobárica específica de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura.

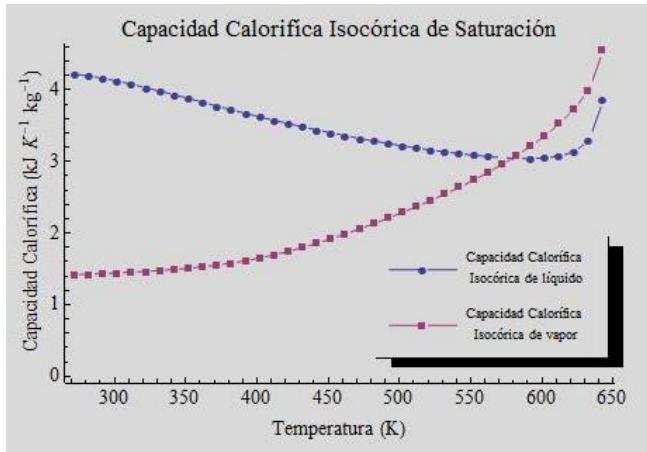


Figura 18. Capacidad calorífica isocórica específica de saturación para el agua bifásica como función de la temperatura.