

Ecuaciones de estado multiparamétricas - GERG 2008

Federico Benelli

IPQA

28 de Junio 2021

Ecuaciones de estado multi-paramétricas - GERG 2008

Federico Benelli

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Introducción

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

El conocimiento de propiedades termodinámicas de gases naturales y mezclas de sus compuestos es de indispensable importancia para la ingeniería básica de procesos técnicos.

El procesado, transporte y almacenamiento de gases naturales requiere el cálculo de propiedades para un amplio espectro de composiciones y condiciones de operación.

Estas propiedades pueden ser calculadas mediante **Ecuaciones de estado**

$X(P, V, T, \dots)$

- EOS Cúbicas
 - Peng-Robinson
 - Redlich-Kwong
 - Soave-Redlich-Kwong
- EOS Moleculares
 - SAFT
- EOS Multiparamétricas
 - AGA8

$$Z = 1 + \frac{\delta B}{K^3} - \delta \sum_{n=13}^{18} C_n^* T^{u_n} (b_n - c_n k_n \delta^{k_n}) \delta^{b_n} \exp(-c_n \delta^{k_n}) \quad (1)$$

- GERG

$$\alpha(\rho, \tau, \bar{x}) = \alpha^o(\rho, T, \bar{x}) + \sum_{i=1}^N x_i \alpha_{oi}^r(\delta, \tau) + \Delta \alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) \quad (2)$$

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

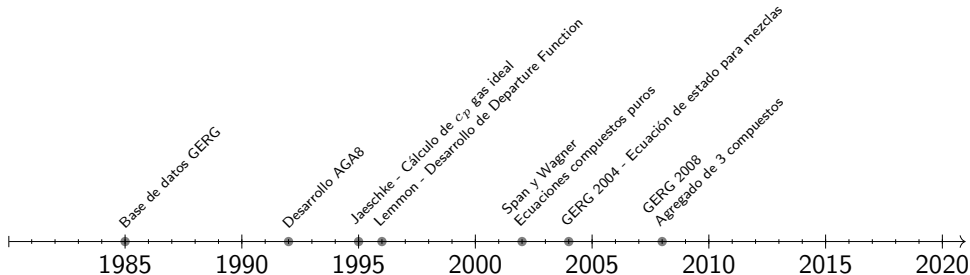
Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias



Son ecuaciones que se basan en el ajuste de datos experimentales para describir la energía libre de Helmholtz residual.

Estructura General

$$\frac{A}{RT} = \alpha(\delta, \tau, \bar{x}) = \alpha^o(\rho, T, \bar{x}) + \alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) \quad (3)$$

Ecuaciones de estado multiparamétricas - GERG 2008

Federico Benelli

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

GERG 2008

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación
de
incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Ecuación *AGA8-DC92* (1) limitada a rangos acotados ($250K \leq T \leq 350K$ y $p < 30MPa$). Además, presenta mayores incertidumbres al tratar con mezclas inusuales.

Objetivos GERG

- Válida en toda la región de fluidos.
- Incertidumbres \leq a 0,1 % en ρ y w .
- Incertidumbres \leq a 1 % en otras propiedades.
- Aceptable en rangos con datos de baja calidad.
- Estructura simple.

Federico
Benelli

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

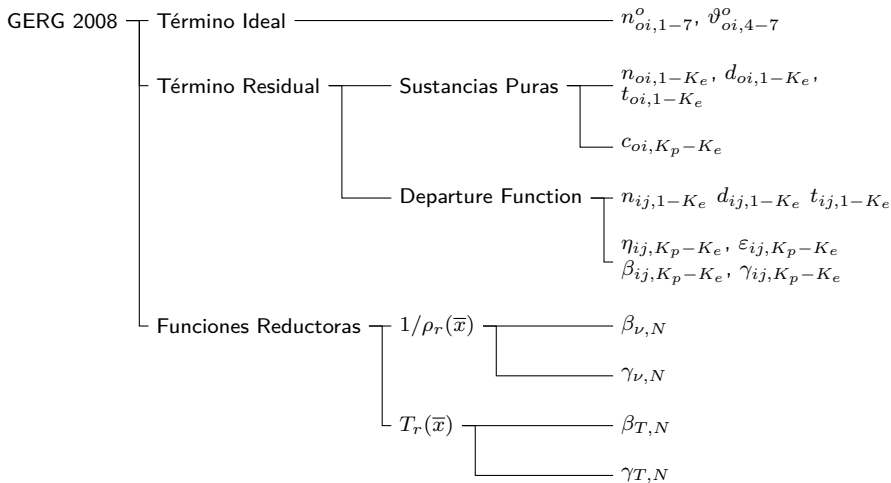
Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

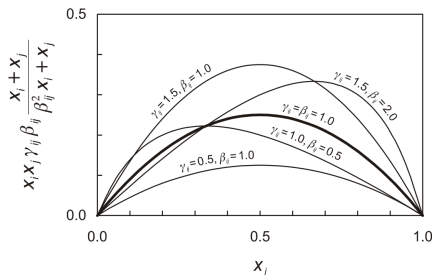


$$\alpha(\rho, \tau, \bar{x}) = \alpha^o(\rho, T, \bar{x}) + \sum_{i=1}^N x_i \alpha_{oi}^r(\delta, \tau) + \Delta \alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) \quad (2)$$

Son utilizadas para determinar las variables reducidas de mezclas. Se obtienen ajustando parámetros a datos de mezclas.

Condiciones

- $x_i \rightarrow 0$ debe conectar suavemente a los parámetros de la sustancia pura.
- Describir tanto mezclas binarias como multicomponentes.
- Su forma matemática no debe depender del orden de los componentes.
- Flexible como para describir formas simétricas y asimétricas en mezclas equimolares.
- Deben asegurar valores físicamente razonables al usarse en las propiedades derivadas.



Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación
de
incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Las funciones reductoras se utilizan para posteriormente obtener la densidad reducida δ y la temperatura reducida τ .

GERG-2008 utiliza funciones basadas en reglas de mezclado cuadráticas.

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j \beta_{\nu,ij} \gamma_{\nu,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{\nu,ij}^2 x_i + x_j} \frac{1}{8} \left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}} + \right)^3 \quad (4)$$

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j \beta_{T,ij} \gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} \cdot T_{c,j})^{0,5} \quad (5)$$

En casos donde no haya datos de calidad, los parámetros de ajuste se ajustan a 1, convirtiendo la ecuación a una regla de mezclado clásica.

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Término ideal

$\alpha^0(\rho, T, \bar{x})$ - Término ideal

$$\alpha^o(\rho, T, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i [\alpha_{oi}^o(\rho, T) + \ln x_i] \quad (6)$$

x_i Fracción molar compuesto i .

$\alpha_{oi}^o(\rho, T)$ Energía de Helmholtz compuesto puro.

$\ln x_i$ Entropía de mezclado.

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

$\alpha_{oi}^o(\rho, T)$ corresponde a la energía libre de Helmholtz de la sustancia pura. Se obtiene a partir de la definición de la energía libre de Helmholtz:

$$a^o(\rho, T) = h^o(T) - RT - Ts^o(\rho, T) \quad (7)$$

Que en el caso de un gas ideal se resuelve como:

$$a^o(\rho, T) = \left[\int_{T_0}^T c_p^o dT + h_0^o \right] - RT - T \left[\int_{T_0}^T \frac{c_p^o - R}{T} dT - R \ln \left(\frac{\rho}{\rho_o^o} \right) + s_0^o \right] \quad (8)$$

Jaeschke y Schley 1996 determinaron coeficientes para el cálculo de c_p . Con la aplicación de estos coeficientes en la integración anterior se obtiene:

$$\alpha_{oi}^o(\rho, T) = \ln \left(\frac{\rho}{\rho_{c,i}} \right) + \frac{R^*}{R} \left[n_{oi,1}^o + n_{oi,2}^o \frac{T_{c,i}}{T} + n_{oi,3}^o \ln \frac{T_{c,i}}{T} \right] \\ + \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \ln \left(\left| \sinh \left(\vartheta_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right) \\ - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o \ln \left(\cosh \left(\vartheta_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right) \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \alpha_{oi}^r(\delta, \tau) + \Delta \alpha^r(\delta, \tau, \bar{x})$$

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

- El primer término corresponde a la combinación lineal de los compuestos puros.
- El segundo término corresponde a una función denominada “*Departure Function*”

$$\sum_{i=1}^N x_i \alpha_{oi}^r(\delta, \tau)$$

$$\Delta \alpha^r(\delta, \tau, \bar{x})$$

Para poder realizar el ajuste de datos experimentales, es necesario establecer una estructura matemática que describa a la energía residual $\alpha_{oi}^r(\delta, \tau)$.

Se planteó una forma funcional como una combinación de sumatorias de dos tipos de términos:

Términos polinómicos

$$\alpha_i^r = n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} \quad (10)$$

Términos Exponenciales

$$\alpha_i^r = n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{c_i}} \quad (11)$$

Para poder realizar el ajuste de datos experimentales, es necesario establecer una estructura matemática que describa a la energía residual $\alpha_{oi}^r(\delta, \tau)$.

Se planteó una forma funcional como una combinación de sumatorias de dos tipos de términos:

Términos polinómicos

$$\alpha_i^r = n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} \quad (10)$$

Términos Exponenciales

$$\alpha_i^r = n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{c_i}} \quad (11)$$

Forma funcional

$$\alpha^r(\delta, \tau) = \sum_{k=1}^{K_{Pol}} n_k \delta^{d_k} \tau^{t_k} + \sum_{k=K_{Pol}+1}^{K_{Pol}+K_{Exp}} n_k \delta^{d_k} \tau^{t_k} e^{-\delta^{c_k}} \quad (12)$$

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Término residual

$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \overline{x})$ - Departure Function

$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \overline{x})$ fue utilizada por primera vez por Tillner-Roth 1993 y Lemmon 1996 con el propósito de mejorar la precisión de modelos multi-fluidos.

Originalmente se utilizaban en mezclas binarias:

$$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = f^\Delta(x_1, x_2) \cdot \alpha_{12}^r(\rho, \tau) \quad (13)$$

Originalmente se utilizaban en mezclas binarias:

$$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = f^\Delta(x_1, x_2) \cdot \alpha_{12}^r(\rho, \tau) \quad (13)$$

Forma Generalizada:

$$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \alpha_{ij}^r(\delta, \tau) \quad (14)$$

Originalmente se utilizaban en mezclas binarias:

$$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = f^\Delta(x_1, x_2) \cdot \alpha_{12}^r(\rho, \tau) \quad (13)$$

Forma Generalizada:

$$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \alpha_{ij}^r(\delta, \tau) \quad (14)$$

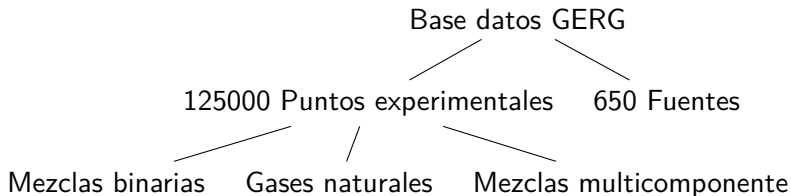
Forma funcional de α_{ij}^r :

$$\alpha_{ij}^r = \sum_{k=1}^{K_{Pol,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} + \sum_{k=K_{Pol,ij}+1}^{K_{Pol,ij}+K_{exp,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} \exp \left[-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k}) \right] \quad (15)$$

Tanto la energía de Helmholtz residual (α^r) como la función de salida ($\Delta\alpha^r$) requieren un proceso de ajuste de parámetros:

- 1 Selección de datos.
- 2 Ponderación de datos.
- 3 Precorrelación de cantidades auxiliares.
- 4 Ajuste linear según mínimos cuadrados.
- 5 Ajuste no-linear.

Desde antes de 1985, el grupo GERG expande continuamente su base de datos relacionada a propiedades de mezclas y compuestos puros.



Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación
de
incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

La base de datos utilizada por GERG cubre tanto regiones de gas homogéneo, líquido y supercrítico como también estados de equilibrio líquido-vapor en rangos de $16 < T < 2500$ K y $P < 2000$ MPa.

Tipos de datos

- $p\rho T$
- Capacidad calorífica isocórica c_v
- Velocidad del sonido: w
- Capacidad calorífica isobárica: c_p
- Diferencias de entalpía: Δh
- Densidad de líquido saturado: ρ'
- VLE: $pTxy$

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación
de
incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

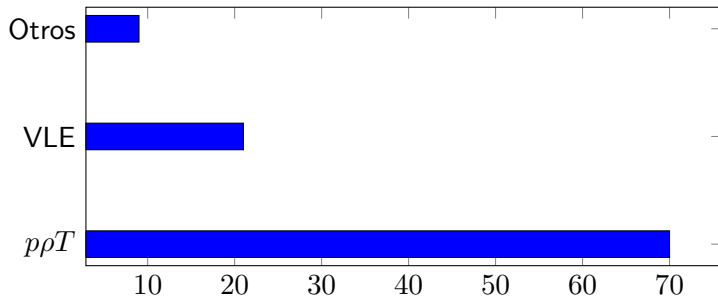
Punto burbuja

Conclusiones

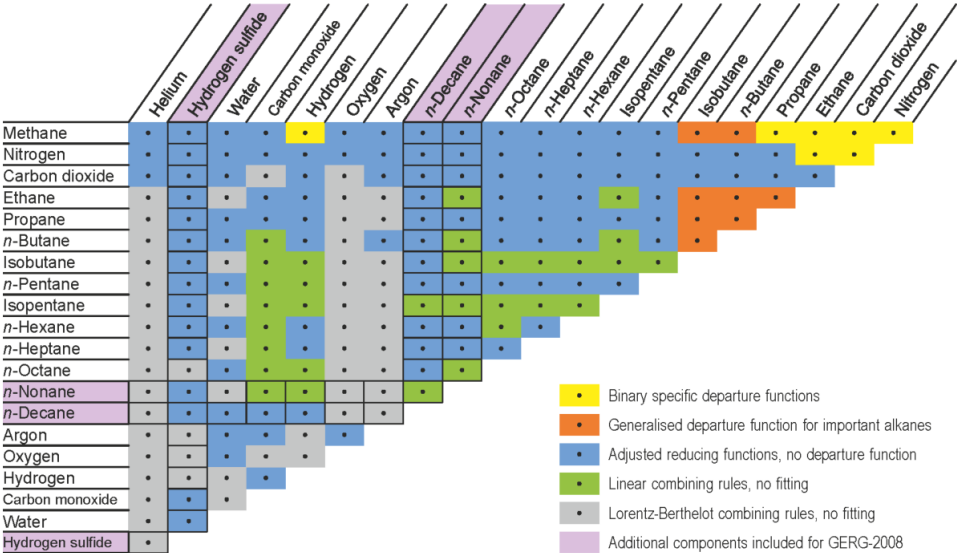
Referencias

Estos datos se distribuyen como:

- 70 % $p\rho T$.
- 21 % Puntos VLE.
- 9 % Otras propiedades.



Tipo de dato	Propiedad	Incertidumbre relativa (%)
$p\rho T$	$\Delta\rho/\rho$	(0,03 a 0,1)
c_v	$\Delta c_v/c_v$	(1 a 2)
w	$\Delta w/w$	(0,02 a 0,01)
c_p	$\Delta c_p/c_p$	(1 a 2)
Δh	$\Delta(\Delta h)/\Delta h$	(0,2 a 0,5)
ρ'	$\Delta\rho'/\rho'$	(0,1 a 0,3)
VLE	$\Delta p_s/p_s$	(1 a 3)



La energía libre de Helmholtz no es medible, pero si se pueden obtener variables medibles a través de sus derivadas:

$$\frac{p(\delta, \tau, \bar{x})}{\rho RT} = 1 + \delta \alpha_{\delta}^r \quad (16)$$

$$\frac{w^2(\delta, \tau, \bar{x})}{RT} M = 1 + 2\delta \alpha_{\delta}^r + \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^r - \frac{(1 + \delta \alpha_{\delta}^r - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^2}{\tau^2 (\alpha_{\tau\tau}^o + \alpha_{\tau\tau}^r)} \quad (17)$$

$$\frac{c_v(\delta, \tau, \bar{x})}{R} = -\tau^2 (\alpha_{\tau\tau}^o + \alpha_{\tau\tau}^r) \quad (18)$$

$$Z(\delta, \tau, \bar{x}) = 1 + \delta \alpha_{\delta}^r \quad (19)$$

Cálculo de VLE

$$\varphi_i' / \varphi_i'' = x_i'' / x_i' \quad (20)$$

$$K_i = x_i'' / x_i' \quad (21)$$

$$f_i = x_i \rho R T \exp \left(\frac{\partial n \alpha^r}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_j} \quad (22)$$

$$\ln \varphi_i = \left(\frac{\partial n \alpha^r}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_j} - \ln Z \quad (23)$$

$$x_i = (1 - \beta) x_i' + \beta x_i'' \quad (24)$$

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Comparación de incertidumbres

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Comparación de incertidumbres

Se compararon datos experimentales con datos calculados con la ecuación GERG y otras ecuaciones de estado.

Densidad calculada en gases naturales.

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

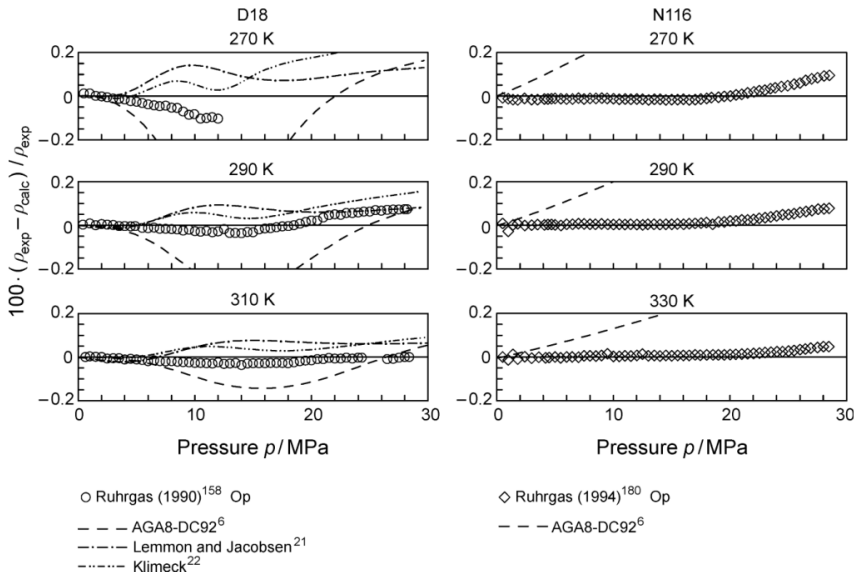
Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias



Densidad calculada en gases naturales.

Introducción

- Ecuaciones de estado
- Ecuaciones de estado multiparamétricas
- Antecedentes
- Estructura General

GERG 2008

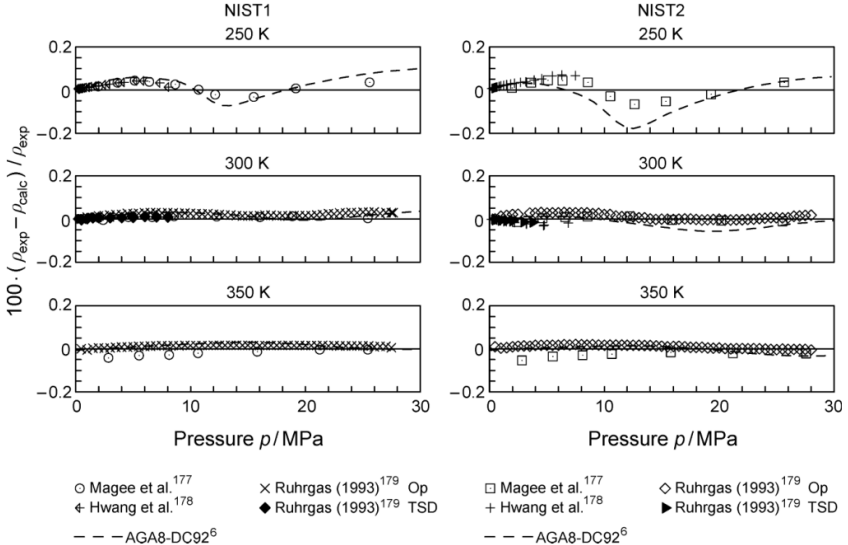
- Origen
- Estructura
- Funciones reductoras
- Sustancia pura
- Término residual
- Ajuste a datos experimentales
- Base de datos
- Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

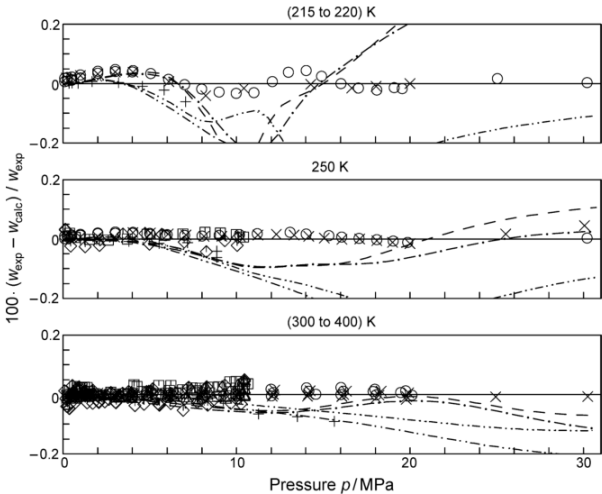
- Densidad
- Velocidad del sonido
- Punto de rocío
- Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

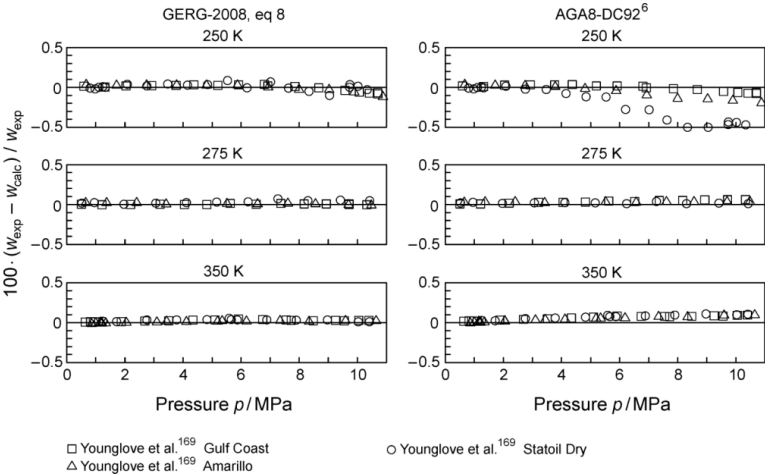


Velocidad del sonido en mezcla Metano-Nitrógeno.

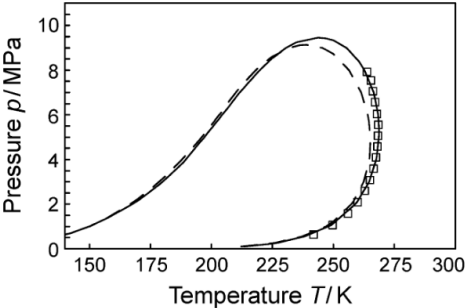


× Estela-Urbe et al. ¹⁶⁸ $x_{N_2} = 0.10$	— — — AGA8-DC92 ⁶ $x_{N_2} = 0.10$	
○ Estela-Urbe et al. ¹⁶⁸ $x_{N_2} = 0.20$	- - - - AGA8-DC92 ⁶ $x_{N_2} = 0.20$	
+ Estela-Urbe et al. ¹⁶⁸ $x_{N_2} = 0.54$	- · - · - Lemmon and Jacobsen ²¹ $x_{N_2} = 0.10$	
□ Younglove et al. ¹⁶⁹ $x_{N_2} = 0.05$	- · - · - Lemmon and Jacobsen ²¹ $x_{N_2} = 0.20$	
◇ Younglove et al. ¹⁶⁹ $x_{N_2} = 0.29$		
△ Younglove et al. ¹⁶⁹ $x_{N_2} = 0.15$		

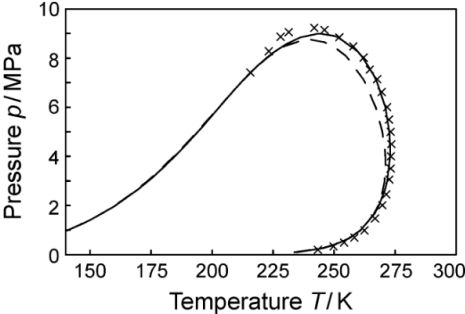
Velocidad del sonido en gases naturales.



Punto de rocío en mezcla de metano, butano, isobutano y pentano.
Y mezcla sintética de $C_1, N_2, CO_2, C_2, C_3, C_4, iC_4, C_5, iC_5, C_6, C_7, C_8$

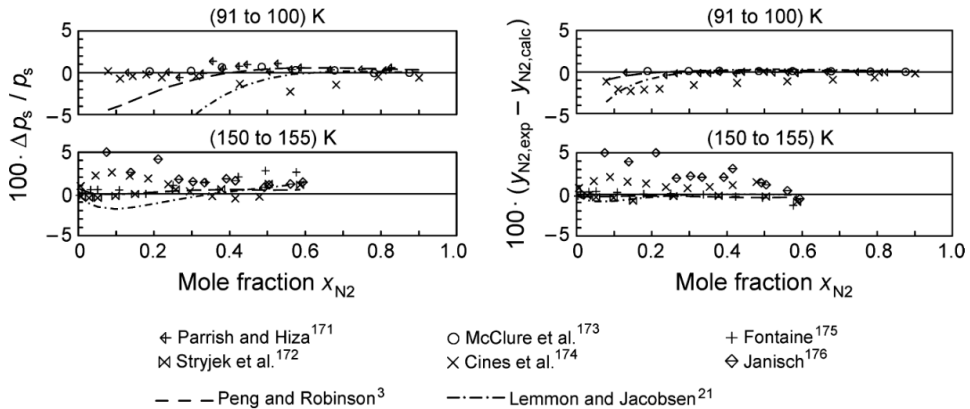


□ Morch et al.¹⁹²
—— GERG-2008, eq 8
- - - Peng and Robinson³



× Avila et al.¹⁸⁶
—— GERG-2008, eq 8
- - - Peng and Robinson³

Punto de burbuja en mezcla Metano-Nitrógeno



Comparada a otras ecuaciones de estado, la ecuación GERG 2008 logra una descripción precisa de propiedades de diversas mezclas sobre rangos de temperatura, presión y composición más amplios.

Rangos de validez Se dividieron dos secciones:

Rango Normal Puntos entre:

$$90K \leq T \leq 450K$$

$$p \leq 35MPa$$

Entre estos rangos las desviaciones se encontraron entre 0,1 y 0,5 % para la mayoría de las propiedades.

Rango Extendido Puntos entre

$$60K \leq T \leq 700K$$

$$p \leq 70MPa$$

Al expandir el rango hay ciertas mezclas en donde la incertidumbre de mediciones de densidad alcanza el 1 %. Se considera que puede ser utilizada en casos donde mayores incertidumbres sean aceptables

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado
multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones
reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos
experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación
de
incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias



Jaeschke y Schley (1996). "Ideal-gas thermodynamic properties for natural-gas applications". [En.](#)



Kunz y col. (2007). *The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures*.



Lemmon, W. E. (1996). "A generalized model for the prediction of the thermodynamic properties of mixtures including vapor-liquid equilibrium". [En.](#)



Tillner-Roth (1993). "Die thermodynamischen Eigenschaften von R152a R134a und ihren Gemischen-Messungen und Fundamentalgleichungen". [En.](#)



Wagner, Kunz; (2012). "The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG-2004". [En.](#)

Ecuaciones de estado multi-paramétricas - GERG 2008

Federico Benelli

Introducción

Ecuaciones de estado

Ecuaciones de estado multiparamétricas

Antecedentes

Estructura General

GERG 2008

Origen

Estructura

Funciones reductoras

Sustancia pura

Término residual

Ajuste a datos experimentales

Base de datos

Métodos de ajuste

Comparación de incertidumbres

Densidad

Velocidad del sonido

Punto de rocío

Punto burbuja

Conclusiones

Referencias

Muchas gracias!