

BR8409417

# COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

CNEN/SP

## EQUAÇÕES DE ESTADO PARA A ÁGUA LEVE

Gerson Antonio Rubin e Mario Roberto Granziera

INFORMAÇÃO IPEN 12  
IPEN - Inf - 12

JANEIRO/1983

**EQUAÇÕES DE ESTADO PARA A ÁGUA LEVE**

**Gerson Antonio Rubin e Mário Roberto Granziera**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE REATORES  
RTH**

**CNEN/SP  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
SÃO PAULO - BRASIL**

**Série INFORMAÇÃO IPEN**

**INIS Categories and Descriptors**

**E11  
F50**

**DENSITY  
ENTHALPY  
ENTROPY  
EQUATIONS  
LEAST SQUARE FIT  
THERMAL CONDUCTIVITY  
VISCOSITY  
WATER**

---

**Recebida em julho de 1982.**

**Aprovada para publicação em maio de 1982.**

**Nota: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade dos Autores.**

# EQUAÇÕES DE ESTADO PARA A ÁGUA LEVE

Gerson Antonio Rubin e Mario Roberto Granziera

## RESUMO

Equações de estado para água leve foram desenvolvidas neste trabalho, baseados nas tabelas de Keenan e Keyes. Equações descrevendo o volume específico, energia interna, entalpia e entropia do vapor saturado, líquido comprimido e vapor superaquecido são apresentadas em função da pressão e temperatura. Para cada propriedade, várias equações são mostradas com diferentes precisões e diferentes graus de complexidade.

## I – INTRODUÇÃO

A representação matemática do escoamento de fluidos requer a solução das equações diferenciais de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, e ainda, de uma ou mais equações de estado, que relacionem as propriedades termodinâmicas do fluido.

Conquanto as relações entre as propriedades de estado da água tenham sido extensivamente estudadas e se encontrem relacionadas em tabelas com admirável precisão, ao autor de programas de computação interessa um método rápido e eficiente de se obter estas propriedades termodinâmicas, na forma de equações algébricas compactas.

O presente trabalho visa suprir o leitor com um conjunto de equações de estado para as principais propriedades da água permitindo a escolha da opção mais conveniente para cada caso. Estas equações foram obtidas fazendo-se um ajuste por mínimos quadrados das tabelas de Keenan e Keyes<sup>(3)</sup>. Este ajuste foi feito com a preocupação de se determinar com clareza a precisão de cada equação, e mais importante ainda, a perda de precisão que a omissão de cada termo destas equações acarretaria. Isto permitirá ao leitor escolher uma equação cuja acuidade seja compatível com a acuidade de seus modelos físicos, eventualmente reduzindo o número de termos das equações (e o tempo de computação para processá-los), tendo um critério quantitativo para esta escolha.

Pretende-se com este trabalho poupar ao leitor a necessidade de desenvolver suas próprias equações quando tiver em mente uma aplicação específica, como tem ocorrido com pesquisadores deste Instituto<sup>(2)</sup>.

## II – METODOLOGIA

Para a obtenção das curvas de ajuste de cada uma das propriedades físicas estudadas, foi utilizado o programa SAS - Statistical Analysis System<sup>(1)</sup>, implantado no Centro de Processamento de Dados do IPEN.

É oportuno frisar que o programa SAS<sup>(1)</sup>, é um instrumento bastante poderoso e versátil para esse tipo de análise. O programa realiza o ajuste de curvas pelo método de mínimos quadrados fornecendo, como saída, os seguintes parâmetros de importância para este trabalho:

a) R - SQUARE ( $R^2$ ): mede a variação na variável dependente considerada pelo modelo.  $R^2$  varia no intervalo de 0 a 1 e é a relação entre a soma dos quadrados para o modelo e a soma dos quadrados para o total corrigido (modelo + erro). Em geral, quanto maior o valor de  $R^2$ , melhor é o modelo de ajuste considerado.

b) TYPE I SS: mede a contribuição de cada variável para o modelo.

c) ESTIMATE: dá o valor do coeficiente de cada uma das variáveis do modelo considerado.

Além desses, existem outros parâmetros que servem para uma análise mais detalhada dos resultados, os quais foram levados em conta, mas não serão descritos neste trabalho.

A entrada dos dados para o programa SAS<sup>(1)</sup> é feita em formato livre, por meio de um programa FORTRAN auxiliar bastante simples, onde se define também o modelo de ajuste.

Os valores das propriedades físicas utilizados neste trabalho foram obtidos das Tabelas de Keenan e Keyes<sup>(3)</sup>.

Foram analisadas as seguintes propriedades:

## 1 – SATURAÇÃO

- 1.1 Volume específico do líquido e do vapor.
- 1.2 Energia interna do líquido e do vapor.
- 1.3 Entalpia do líquido e do vapor.
- 1.4 Entropia do líquido e do vapor.
- 1.5 Pressão de saturação.
- 1.6 Temperatura de saturação.
- 1.7 Densidade do líquido e do vapor.

## 2 – PROPRIEDADES DE TRANSPORTE

- 2.1 Condutividade térmica do líquido e do vapor.
- 2.2 Viscosidade dinâmica do líquido e do vapor.

## 3 – VAPOR SUPERAQUECIDO

- 3.1 Entalpia
- 3.2 Entropia
- 3.3 Energia interna
- 3.4 Volume específico
- 3.5 Densidade

#### 4 – LÍQUIDO COMPRIMIDO

##### 4.1 Entalpia

##### 4.2 Entropia

##### 4.3 Energia interna

##### 4.4 Volume específico

##### 4.5 Densidade

Para o caso da saturação, as propriedades foram tomadas para a temperatura variando entre 20 e 350°C, e pressão variando entre 0,02339 e 165,13 bars, em 316 pontos.

Para viscosidade dinâmica foram consideradas a pressão entre 1 e 800 bars, e temperaturas de 50, 100, 150, 200, 250, 300 e 350°C, enquanto que, para a condutividade térmica as temperaturas foram as mesmas, porém, com a pressão variando entre 1 e 500 bars.

Para o vapor superaquecido, as propriedades consideradas estavam no intervalo de temperatura de 100 a 300°C, enquanto que o intervalo de variação da pressão foi de 0,1 a 85 bars.

Finalmente, para as propriedades do líquido comprimido, a temperatura variou entre 0 e 340°C para pressões de 100, 125, 150, e 175 bars.

Em todos os casos, foram estudados polinômios de graus 1, 2, 3, 4, e 5.

### III – RESULTADOS

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos para cada uma das propriedades estudadas. Estes resultados foram sintetizados na forma de tabelas que mostram os coeficientes das funções de ajuste e os valores de  $R^2$ .

#### OBSERVAÇÃO:

Recomenda-se tomar certos cuidados ao usar as tabelas marcadas com (\*) por apresentarem valores negativos para alguns pontos dentro da faixa estudada.

#### 1 – SATURAÇÃO

##### 1.1 – Volume Específico

Foram analisadas duas curvas de ajuste para o volume específico do líquido: uma, como função da temperatura de saturação (T); outra, como função da pressão de saturação (P). Essas funções são do tipo:

$$V = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2, \dots, 5 \quad (1)$$

$$V = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2, \dots, 5 \quad (2)$$

Para o volume específico do vapor foram analisadas as seguintes curvas de ajuste:

$$V = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (3)$$

$$V = \sum_{i=0}^n a_i (\ln T)^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (4)$$

$$V = \sum_{i=0}^n a_i (\ln P)^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (5)$$

$$\ln V = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (6)$$

O volume específico é medido em  $\text{cm}^3/\text{g}$ ; a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ ; e a pressão em bar.

Os valores dos coeficientes das variáveis independentes para cada uma das curvas representadas pelas expressões (1) a (6) e os valores de  $R^2$  para cada ajuste, são mostrados nas Tabelas (I.1a), (I.1b), (I.1c), (I.1d), (I.1e) e (I.1f).

### 1.2 – Energia Interna

Para a energia interna, tanto do líquido, quanto do vapor, foram estudados dois tipos de curvas de ajuste: uma, em função da temperatura de saturação; outra, em função da pressão de saturação. As curvas são da seguinte forma:

$$u = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (7)$$

$$u = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (8)$$

com a energia interna em  $\text{J/g}$ ; a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ ; e a pressão em bar.

Tabela (I.1a)

Volume Específico do Líquido Saturado

$$V = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	0,977433	1,02445	0,956795	1,04572	0,878951
$a_1$	0,00127364	-0,00112370	0,00150618	-0,00086498	0,00166504
$a_2$	-1,78184E - 05	2,05698E - 05	-8,52196E - 06	7,06718E - 06	-
$a_3$	1,68181E - 07	-9,12081E - 08	2,87629E - 08	-	-
$a_4$	-6,10505E - 10	1,64499E - 10	-	-	-
$a_5$	8,44437E - 13	-	-	-	-
$R^2$	0,999844	0,999287	0,996222	0,983199	0,872702

Tabela (I.1b)

Volume Específico do Líquido Saturado

$$v = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	1,02350	1,02766	1,03355	1,04529	1,05524
$a_1$	0,0126409	0,0101965	0,00794024	0,00528082	0,00417458
$a_2$	-0,00030309	-0,00015341	-6,54539E - 05	-9,42335E - 06	-
$a_3$	4,24931E - 06	1,28055E - 06	2,89571E - 07	-	-
$a_4$	-2,86651E - 06	-3,47523E - 09	-	-	-
$a_5$	6,19509E - 11	-	-	-	-
$R^2$	0,998601	0,994450	0,990812	0,977502	0,968573

Tabela (I.1c)

Volume Específico do Vapor Saturado

$$v = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4 (*)	n = 3 (*)	n = 2 (*)	n = 1 (*)
$a_0$	91829,9	71862,8	50017,8	30340,5	14369,9
$a_1$	-2735,92	-1875,84	-826,809	-301,919	-59,8339
$a_2$	30,8201	13,5205	4,12635	0,678783	-
$a_3$	-0,183344	-0,0451051	-0,00636484	-	-
$a_4$	0,00040907	5,31191E - 05	-	-	-
$a_5$	-3,89925E - 07	-	-	-	-
$R^2$	0,979718	0,938215	0,841176	0,647568	0,339891

(\*) Valores Negativos Dentro da Faixa Permitida



Tabela (I.1d)

Volume Específico do Vapor Saturado

$$V = \sum_{i=0}^n a_i (\ln T)^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1 (*)
$a_0$	-684723,9	856587,	732403,	281716,	57753,5
$a_1$	1261767,	-531800,	-417093,	-108330,	-10814,8
$a_2$	-708007,	118228,	79127,4	10547,7	-
$a_3$	176239,	-10833,8	-4999,10	-	-
$a_4$	-20660,1	321,953	-	-	-
$a_5$	930,920	-	-	-	-
$R^2$	0,999965	0,999574	0,999485	0,959267	0,624368

(\*) Valores Negativos Dentro da Faixa Permitida

Tabela (I.1e)

Volume Específico do Vapor Saturado

$$V = \sum_{i=0}^n a_i (\ln P)^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4 (*)	n = 3 (*)	n = 2 (*)	n = 1 (*)
$a_0$	1823,15	1118,77	102,262	3314,09	8528,90
$a_1$	-1283,86	-852,944	-2437,13	-4875,86	-2759,78
$a_2$	548,326	1034,12	1724,67	1010,67	-
$a_3$	-306,121	-452,072	-266,694	-	-
$a_4$	94,2363	55,6228	-	-	-
$a_5$	-9,61064	-	-	-	-
$R^2$	0,999511	0,995447	0,968613	0,844669	0,500059

(\*) Valores Negativos Dentro da Faixa Permitida

Tabela (I.1f)

Volume Especifico do Vapor Saturado

$$\ln V = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	12,2339	12,1464	12,0383	11,4387	10,1774
a <sub>1</sub>	-0,0686591	-0,0641664	-0,0599643	-0,0439772	-0,0248422
a <sub>2</sub>	0,00027722	0,00020504	0,00015856	5,34508E - 05	-
a <sub>3</sub>	8,74348E - 07	-3,85624E - 07	-1,93928E - 07	-	-
a <sub>4</sub>	1,72505E - 09	2,62844E - 10	-	-	-
a <sub>5</sub>	-1,59475E - 11	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	1,00000	0,999990	0,999951	0,997008	0,987391

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida.

As Tabelas (1.2a), (1.2b), (1.2c) e (1.2d) mostram os valores dos coeficientes das variáveis independentes para cada uma das curvas representadas pelas expressões (7) e (8); e os valores de  $R^2$  para cada um dos ajustes.

### 1.3 – Entalpia

Para as entalpias do líquido e do vapor, saturados, também foram analisadas duas funções de ajuste: a primeira, com relação à temperatura de saturação; a segunda, com relação à pressão de saturação. Essas funções são do tipo:

$$h = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2, \dots, 5 \quad (9)$$

$$h = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2, \dots, 5 \quad (10)$$

com a entalpia em J/g; a temperatura em °C, e a pressão em bar.

Os valores dos coeficientes para as curvas de ajuste representadas pelas expressões (9) e (10), e os valores de  $R^2$  são mostrados nas Tabelas (1.3a), (1.3b), (1.3c) e (1.3d).

Tabela (1.2a)

#### Energia Interna do Líquido Saturado

$$u = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	-4,76357	8,17589	-10,9950	23,3640	-33,8677
$a_1$	4,48515	3,82438	4,56065	3,65348	4,52173
$a_2$	-0,00594283	0,0464615	-0,00359806	0,00242530	—
$a_3$	4,86086E - 05	-2,28847E - 05	1,11135E - 05	—	—
$a_4$	-1,67328E - 07	4,66167E - 08	—	—	—
$a_5$	2,33164E - 10	—	—	—	—
$R^2$	0,999999	0,999992	0,999954	0,999853	0,997636

Tabela (1.2b)

Energia Interna do Líquido Saturado

$$u = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	292,749	317,531	353,886	408,906	496,680
$a_1$	60,5619	45,6812	31,7544	19,2919	9,53294
$a_2$	-1,80220	-0,888593	-0,345695	-0,0831457	-
$a_3$	0,0256428	0,00750354	0,00126316	-	-
$a_4$	-0,00016322	-2,14512E - 06	-	-	-
$a_5$	3,78870E - 07	-	-	-	-
$R^2$	0,970269	0,957436	0,935953	0,890653	0,782899

Tabela (1.2c)

Energia Interna do Vapor Saturado

$$u = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	2383,72	2365,28	2393,17	2329,95	2464,13
$a_1$	0,000234	1,85188	0,767464	2,45338	0,417617
$a_2$	0,00846365	-0,00659840	0,00539743	-0,00568656	-
$a_3$	-7,27536E - 05	2,90188E - 05	-2,04506E - 05	-	-
$a_4$	2,36242E - 07	-6,78300E - 08	-	-	-
$a_5$	-3,31312E - 10	-	-	-	-
$R^2$	0,999762	0,999124	0,995225	0,945971	0,410734

Tabela (1.2d)

Energia Interna do Vapor Saturado

$$u = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	2469,97	2477,43	2488,45	2503,56	2531,18
$a_1$	15,4618	10,9662	6,74562	3,32266	0,252103
$a_2$	-0,538937	-0,262799	-0,0982730	-0,0261609	-
$a_3$	0,00772168	0,00223810	0,00034694	-	-
$a_4$	-4,93630E - 05	-6,50085E - 06	-	-	-
$a_5$	1,14552E - 07	-	-	-	-
$R^2$	0,857403	0,801463	0,708239	0,541294	0,026427

Tabela (1.3a)

Entalpia do Líquido Saturado

$$h = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	-5,44309	9,19929	-13,1049	27,4689	-39,2782
a <sub>1</sub>	4,52448	3,77681	4,64389	3,56199	4,57459
a <sub>2</sub>	-0,00667389	0,00530735	-0,00428435	0,00282854	-
a <sub>3</sub>	5,45620E - 05	-2,64313E - 05	1,31237E - 05	-	-
a <sub>4</sub>	-1,87828E - 07	5,42359E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	2,63807E - 10	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999999	0,999990	0,999940	0,999530	0,996851

**Tabela (1.3b)**  
Entalpia do Líquido Saturado

$$h = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	292,744	317,526	353,866	408,916	496,289
a <sub>1</sub>	60,6707	45,7904	31,8694	19,3999	9,68565
a <sub>2</sub>	-1,80172	-0,888134	-0,345461	-0,0827649	-
a <sub>3</sub>	0,0256405	0,00750166	0,00126387	-	-
a <sub>4</sub>	-0,00016321	-2,14424E - 05	-	-	-
a <sub>5</sub>	3,78861E - 07	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,970981	0,958450	0,937496	0,893221	0,788989

**Tabela (1.3c)**  
Entalpia do Vapor Saturado

$$h = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	2511,86	2489,44	2522,83	2442,13	2619,94
a <sub>1</sub>	1,26024	2,39341	1,09542	3,24730	0,549767
a <sub>2</sub>	0,0103995	-0,00774604	0,00661241	-0,00753512	-
a <sub>3</sub>	-8,94999E - 05	3,31095E - 05	-2,61030E - 05	-	-
a <sub>4</sub>	2,85144E - 07	-8,11894E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	-3,99154E - 10	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999807	0,999274	0,996061	0,949909	0,409394

**Tabela (1.3d)**  
Entalpia do Vapor Saturado

$$h = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	2627,44	2637,39	2652,03	2672,19	2708,27
a <sub>1</sub>	20,5119	14,5159	8,90845	4,34007	0,329453
a <sub>2</sub>	-0,717297	-0,349004	-0,130413	-0,0341702	-
a <sub>3</sub>	0,0102892	0,00297564	0,00046304	-	-
a <sub>4</sub>	-6,58034E - 05	-8,63075E - 06	-	-	-
a <sub>5</sub>	1,52780E - 07	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,854009	0,796816	0,700141	0,531159	0,025957

#### 1.4 – Entropia

As entropias do líquido e do vapor saturados foram ajustadas pelas seguintes funções de temperatura e pressão de saturação:

$$S = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (11)$$

$$S = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (12)$$

com a entropia em J/g °K; a temperatura em °C, e a pressão em bar.

Os coeficientes para as curvas de ajuste analisadas, representadas pelas expressões (11) e (12) e os valores de  $R^2$  são mostrados nas Tabelas (1.4a), (1.4b), (1.4c) e (1.4d).

#### 1.5 – Pressão

Para a pressão de saturação, foram analisadas as seguintes curvas em função da temperatura:

$$P = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (13)$$

$$\ln P = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (14)$$

$$P = \sum_{i=0}^n a_i (\ln T)^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (15)$$

com a pressão em bar, e a temperatura em °C.

As Tabelas (1.5a), (1.5b) e (1.5c), mostram os valores dos coeficientes das curvas de ajuste, representadas pelas expressões (13), (14) e (15), e os valores de  $R^2$  para cada ajuste.

#### 1.6 – Temperatura

A temperatura de saturação foi ajustada, em função da pressão, por meio das seguintes curvas:

$$T = \sum_{i=0}^n a_i (\ln P)^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (16)$$

$$T = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (17)$$

$$\ln T = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (18)$$

$$T = \sum_{i=0}^n a_i \ln(P^i), \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (19)$$

com a temperatura em °C e a pressão em bar.



Tabela (I.4a)

Entropia do Líquido Saturado

$$S = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	-0,00598833	0,0184365	0,00029765	0,104028	0,254133
a <sub>1</sub>	0,0157417	0,0144927	0,0152210	0,0124392	0,0101619
a <sub>2</sub>	-3,66260E - 05	-1,65935E - 05	-2,46499E - 05	-6,36100E - 06	-
a <sub>3</sub>	1,36009E - 07	5,20521E - 10	3,37442E - 08	-	-
a <sub>4</sub>	-3,59516E - 10	4,55547E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	4,41560E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999999	0,999995	0,999988	0,999438	0,996693

Tabela (I.4b)

Entropia do Líquido Saturado

$$S = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	0,947921	1,01622	1,11500	1,25894	1,47869
a <sub>1</sub>	0,156489	0,115177	0,0773386	0,0447336	0,0203019
a <sub>2</sub>	-0,00490872	0,00237008	-0,00089505	0,00020816	-
a <sub>3</sub>	7,06810E - 05	2,02596E - 05	3,30474E - 06	-	-
a <sub>4</sub>	-4,52436E - 07	5,82821E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	5,05346E - 09	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,948454	0,928666	0,897298	0,835964	0,702374

Tabela (I.4c)

Entropia do Vapor Saturado

$$S = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	9,16216	9,10851	9,08273	8,77442	8,40223
$a_1$	-0,0269876	-0,0242398	-0,0232379	-0,0150167	-0,00937033
$a_2$	0,00012501	8,09058E - 05	6,98219E - 05	1,57723E - 05	-
$a_3$	-4,43857E - 07	-1,45434E - 07	-9,97246E - 08	-	-
$a_4$	9,55152E - 10	6,26739E - 11	-	-	-
$a_5$	-9,73090E - 13	-	-	-	-
$R^2$	0,999997	0,999971	0,999955	0,994433	0,975018

Tabela (I.4d)

Entropia do Vapor Saturado

$$S = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	7,78304	7,70806	7,60204	7,45491	7,25044
$a_1$	-0,160618	-0,114607	-0,0739937	-0,0406653	-0,0179327
$a_2$	0,00531139	0,00247900	0,00089581	0,00019368	-
$a_3$	-7,70711E - 05	-2,15762E - 05	-3,37806E - 06	-	-
$a_4$	5,02789E - 07	6,25558E - 08	-	-	-
$a_5$	-1,17689E - 09	-	-	-	-
$R^2$	0,907835	0,878870	0,837294	0,763562	0,630499

Tabela (I.5a)

Pressão de Saturação

$$P = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2 (*)	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	-0,110453	0,196142	-5,94429	21,6815	-35,6583
a <sub>1</sub>	0,00533075	-0,0102923	0,229196	-0,507974	0,361915
a <sub>2</sub>	-1,74543E - 05	0,00023261	-0,00241662	0,00242989	-
a <sub>3</sub>	-2,93780E - 07	-1,98299E - 06	8,94209E - 06	-	-
a <sub>4</sub>	9,93381E - 09	1,49799E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	5,49755E - 12	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	1,000000	0,999999	0,999542	0,976895	0,741862

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida

Tabela (I.5b)

Pressão de Saturação

$$\ln P = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4 (*)	n = 3 (*)	n = 2 (*)	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	-5,07745	-5,02749	-4,86771	-4,34829	-2,83011
a <sub>1</sub>	0,0712874	0,0687138	0,0625022	0,0486519	0,0256199
a <sub>2</sub>	-0,00026555	-0,00022411	-0,00015539	-6,43359E - 05	-
a <sub>3</sub>	7,32371E - 07	4,51369E - 07	1,68008E - 07	-	-
a <sub>4</sub>	-1,23003E - 09	-3,88532E - 10	-	-	-
a <sub>5</sub>	9,18378E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	1,000000	0,999997	0,999918	0,997883	0,955515

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida

Tabela (I.5c)

Pressão de Saturação

$$P = \sum_{i=0}^n a_i (\ln T)^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4	n = 3 (*)	n = 2 (*)	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	-24930,5	8906,89	-2754,49	730,739	-165,702
a <sub>1</sub>	30627,9	-8747,68	2024,61	-355,376	38,9438
a <sub>2</sub>	-14911,3	3183,67	-429,118	42,2186	-
a <sub>3</sub>	3597,70	-509,244	38,6588	-	-
a <sub>4</sub>	-430,399	30,2328	-	-	-
a <sub>5</sub>	20,4371	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,997587	0,986415	0,940253	0,797729	0,479775

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida

Os coeficientes para as curvas representadas pelas expressões (16) a (19) e os valores de  $R^2$  para cada ajuste, são mostrados nas Tabelas (I.6a), (I.6b), (I.6c) e (I.6d).

### 1.7 – Densidade

Foram analisadas duas curvas de ajuste para a densidade do líquido: uma, como função de temperatura de saturação, outra, como função da pressão de saturação. Essas funções têm a forma:

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (20)$$

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (21)$$

Para a densidade do vapor, foram analisadas as seguintes curvas de ajuste:

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (22)$$

$$\ln \rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (23)$$

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (24)$$

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i (\ln T)^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (25)$$

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i (\ln P)^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (26)$$

A densidade é medida em  $\text{g/cm}^3$ ; a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ ; e a pressão em bar.

Os valores dos coeficientes das variáveis independentes para cada uma das curvas de ajuste representadas pelas expressões (20) a (26), bem como os valores de  $R^2$  para cada um desses ajustes; são mostrados nas Tabelas (I.7a), (I.7b), (I.7c), (I.7d), (I.7e), (I.7f) e (I.7g).

## 2 – PROPRIEDADES DE TRANSPORTE

### 2.1 – Condutividade Térmica

As condutividades térmicas do líquido e do vapor foram ajustadas por dois tipos de curvas, que são combinações de funções de pressão e temperatura. Essas curvas são do tipo:

$$k(P, T) = f(P) + g(T) \quad (27)$$

$$k(P, T) = f(P) \times g(T) \quad (28)$$

onde:

$$f(P) = \sum_{i=0}^n a_i P^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (29)$$

$$g(T) = \sum_{i=0}^m b_i T^i, \quad m = 1, 2, \dots, 5 \quad (30)$$

com a condutividade térmica em miliwatt/m °k; a temperatura em °C; e a pressão em bar.

**Tabela (I.6a)**

Temperatura de Saturação

$$T = \sum_{i=0}^n a_i (\ln P)^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	99,6357	99,6993	99,2753	95,5527	113,464
a <sub>1</sub>	27,9325	27,8936	27,2328	30,0511	37,2957
a <sub>2</sub>	2,38739	2,34350	2,63153	3,46518	—
a <sub>3</sub>	0,219573	0,232757	0,310077	—	—
a <sub>4</sub>	0,0197119	0,0231999	—	—	—
a <sub>5</sub>	0,00086815	—	—	—	—
R <sup>2</sup>	1,000000	1,000000	0,999951	0,998213	0,955515

Os valores obtidos para os coeficientes de cada variável e os valores de R<sup>2</sup> para cada um dos ajustes são mostrados nas Tabelas (II.1a), (II.1b), (II.1c) e (II.1d).

## 2.2 – Viscosidade Dinâmica

Foram analisadas, para as viscosidades dinâmicas do líquido e do vapor, as seguintes curvas de ajuste, em função da pressão e temperatura:

$$v(P, T) = f(P) + g(T) \quad (31)$$

$$v(P, T) = f(P) \times g(T) \quad (32)$$

onde f(P) e g(T) são representadas pelas expressões (29) e (30). A viscosidade dinâmica é medida em micropoise; a temperatura em °C; e a pressão em bar.

Os resultados obtidos para os coeficientes das curvas de ajuste representadas pelas expressões (31) e (32) e para R<sup>2</sup>, são mostrados nas Tabelas (II.2a), (II.2b), (II.2c) e (II.2d).

Tabela (1.6b)

Temperatura de Saturação

$$T = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	70,0163	75,9275	84,6071	97,6132	119,011
$a_1$	14,2501	10,6998	7,37494	4,42887	2,04983
$a_2$	-0,429925	-0,211946	-0,0823345	-0,0202692	-
$a_3$	0,00611637	0,00178843	0,00029860	-	-
$a_4$	-3,89474E - 05	-5,12127E - 06	-	-	-
$a_5$	9,03972E - 08	-	-	-	-
$R^2$	0,965030	0,950076	0,924983	0,873101	0,741862

Tabela (1.6c)

Temperatura de Saturação

$$\ln T = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	4,17090	4,23725	4,33347	4,46133	4,63853
a <sub>1</sub>	0,140108	0,0978414	0,0609837	0,0320210	0,0123197
a <sub>2</sub>	-0,00482821	-0,00221481	-0,00077801	-0,00016785	-
a <sub>3</sub>	7,14832E - 05	1,94509E - 05	2,93557E - 06	-	-
a <sub>4</sub>	-4,64047E - 07	-5,67714E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	1,08941E - 09	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,828400	0,785899	0,730690	0,640914	0,479775

Tabela (1.6d)

Temperatura de Saturação

$$T = \sum_{j=0}^n a_j \ln(P^j)$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	113,464	113,464	113,464	113,464	113,464
a <sub>1</sub>	37,2957	37,2957	37,2957	37,2957	37,2957
a <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	-
a <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	-	-
a <sub>4</sub>	0,0	0,0	-	-	-
a <sub>5</sub>	0,0	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,955515	0,955515	0,955515	0,955515	0,955515

Tabela (1.7a)

Densidade do Líquido Saturado

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	1,00577	0,996521	1,01549	0,994952	1,06795
a <sub>1</sub>	-0,00031423	0,00016054	-0,00057689	-2,92341E - 05	-0,00113665
a <sub>2</sub>	-2,14676E - 08	-7,65029E - 06	5,07179E - 07	-3,09338E - 06	-
a <sub>3</sub>	-2,46602E - 08	2,69972E - 08	-6,64325E - 09	-	-
a <sub>4</sub>	1,08435E - 10	-4,61262E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	-1,68577E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999985	0,999932	0,999370	0,997750	0,948382

Tabela (1.7b)

Densidade do Líquido Saturado

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	0,976951	0,972822	0,966952	0,957096	0,941792
a <sub>1</sub>	-0,0111712	-0,00882994	-0,00658149	-0,00434895	-0,00264740
a <sub>2</sub>	0,00029187	0,00014918	6,15304E - 05	1,44971E - 05	-
a <sub>3</sub>	-4,05868E - 06	-1,23378E - 06	-2,26284E - 07	-	-
a <sub>4</sub>	2,65074E - 08	3,46326E - 09	-	-	-
a <sub>5</sub>	-5,88532E - 11	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,992321	0,987933	0,979510	0,957639	0,908358



Tabela (1.7c)

Densidade do Vapor Saturado

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4 (*)	n = 3	n = 2 (*)	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	-0,00391130	0,00E+0402	-0,00855923	0,0152531	-0,0206197
a <sub>1</sub>	0,00022937	-0,00024354	0,00029539	-0,00033956	0,00020466
a <sub>2</sub>	-4,29166E - 06	3,30744E - 06	-2,65429E - 06	1,52018E - 06	-
a <sub>3</sub>	3,45728E - 08	-1,68833E - 08	7,70215E - 09	-	-
a <sub>4</sub>	-1,20248E - 10	3,37104E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	1,67920E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999679	0,998518	0,991880	0,943717	0,680026

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida

Tabela (1.7d)

Densidade do Vapor Saturado

$$\ln \rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4	n = 3 (*)	n = 2 (*)	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	-12,2339	-12,1464	-12,0383	-11,4387	-10,1774
a <sub>1</sub>	0,0686557	0,0641664	0,0599643	0,0439772	0,0248472
a <sub>2</sub>	-0,00027718	-0,00020504	-0,00015856	-5,34506E - 05	-
a <sub>3</sub>	8,74088E - 07	3,85624E - 07	1,93928E - 07	-	-
a <sub>4</sub>	-1,72435E - 09	-2,62844E - 10	-	-	-
a <sub>5</sub>	1,59404E - 12	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	1,000000	0,999990	0,999951	0,997008	0,965591

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida

Tabela (I.7e)

Densidade do Vapor Saturado

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i P^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	5,98206E - 05	9,87298E - 05	7,36365E - 05	0,00046980	-0,00107620
a <sub>1</sub>	0,00051741	0,00049535	0,00050496	0,00041522	0,00058711
a <sub>2</sub>	1,39601E - 06	-5,12899E - 08	-4,26006E - 07	1,46447E - 06	-
a <sub>3</sub>	3,14099E - 08	4,78813E - 09	9,09533E - 09	-	-
a <sub>4</sub>	1,92937E - 10	1,48059E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	5,54630E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999998	0,999989	0,999986	0,999204	0,988082

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida.

Tabela (I.7f)

Densidade do Vapor Saturado

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i (\ln T)^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4	n = 3 (*)	n = 2 (*)	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	23,3184	6,54289	-1,74620	0,426675	-0,0928369
a <sub>1</sub>	28,3663	-6,38006	1,27705	-0,206762	0,0217577
a <sub>2</sub>	13,6638	2,30379	-0,306173	0,0244669	-
a <sub>3</sub>	3,25875	-0,365356	0,0241019	-	-
a <sub>4</sub>	0,384987	0,0214899	-	-	-
a <sub>5</sub>	0,0180343	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,985973	0,961035	0,894178	0,736378	0,429279

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida.

Tabela (I.7g)

Densidade do Vapor Saturado

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i (\ln P)^i$$

Coef.	n = 5 (*)	n = 4 (*)	n = 3 (*)	n = 2 (*)	n = 1 (*)
a <sub>0</sub>	0,00024567	0,00330668	0,00019743	-0,00775224	0,00417820
a <sub>1</sub>	0,00259294	0,00072029	0,00412530	0,00190155	0,00672015
a <sub>2</sub>	0,00053113	-0,00157997	0,00053224	0,00230628	-
a <sub>3</sub>	0,00054010	0,41617E - 05	0,00066118	-	-
a <sub>4</sub>	2,33223E - 06	0,00017014	-	-	-
a <sub>5</sub>	4,17650E - 05	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,994227	0,981190	0,938543	0,811117	0,503664

(\*) Valores negativos dentro da faixa permitida.

## 3 – VAPOR SUPERAQUECIDO

Para o caso do vapor superaquecido, foram estudadas, como função da pressão e da temperatura, as seguintes propriedades:

- entropia; em J/g °k
- entalpia; em J/g
- energia interna; em J/g
- volume específico; em cm<sup>3</sup>/g
- densidade; em g/cm<sup>3</sup>

Tabela (II.1a)

Condutividade Térmica do Líquido

$$k(P,T) = f(P) + g(T)$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	569,966	570,785	572,336	574,307	655,649
a <sub>1</sub>	0,0713665	-0,00501844	-0,0203582	0,0442971	0,0571307
b <sub>1</sub>	1,90131	1,93498	1,74159	1,51503	-0,183001
a <sub>2</sub>	-0,00085558	0,00029233	0,00045552	0,00010645	-
b <sub>2</sub>	-0,00910007	-0,00994402	-0,00899053	-0,00519823	-
a <sub>3</sub>	6,33719E - 06	7,02796E - 06	-4,80308E - 07	-	-
b <sub>3</sub>	1,04128E - 05	1,74878E - 05	3,53245E - 06	-	-
a <sub>4</sub>	-1,47505E - 08	-5,71543E - 10	-	-	-
b <sub>4</sub>	3,46816E - 09	-2,03442E - 0	-	-	-
a <sub>5</sub>	1,12910E - 11	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	-2,77629E - 11	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,981552	0,981481	0,980501	0,976190	0,108978

Cada uma destas quantidades foi relacionada com a pressão e temperatura por meio de funções do tipo:

$$a) \frac{Q(P, T)}{Q_{\text{sat}}(T)} = f(P_1) \times g(T_1) \quad (33)$$

$$b) \frac{Q(P, T)}{Q_{\text{sat}}(T)} = f(P_2) \times g(T_2) \quad (34)$$

$$c) \frac{Q(P, T)}{Q_{\text{sat}}(T)} = f(P_1) + g(T_1) \quad (35)$$

$$d) \frac{Q(P, T)}{Q_{\text{sat}}(T)} = f(P_2) + g(T_2) \quad (36)$$

onde:

$$f(P_1) = \sum_{i=0}^n a_i P_1^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (37)$$

$$f(P_2) = \sum_{i=0}^n a_i P_2^i, \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (38)$$

$$g(T_1) = \sum_{j=0}^m a_j T_1^j, \quad m = 1, 2 \dots 5 \quad (39)$$

$$g(T_2) = \sum_{j=0}^m a_j T_2^j, \quad m = 1, 2 \dots 5 \quad (40)$$

$$P_1 = P_{\text{sat}}/P \quad (41)$$

$$P_2 = P/P_{\text{sat}} \quad (42)$$

$$T_1 = T_{\text{sat}}/T \quad (43)$$

$$T_2 = T/T_{\text{sat}} \quad (44)$$

com a temperatura em °C e a pressão em bar.

Tabela (II.1b)

Conductividade Térmica do Líquido

$$k(P,T) = f(P) \cdot g(T)$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	568,865	568,727	569,367	569,624
$a_0 b_1$	1,83887	1,96306	1,77573	1,756896
$a_0 b_2$	-0,00680613	-0,0104351	-0,00661496	-0,00646963
$a_0 b_3$	-1,10150E - 05	2,34158	3,01001E - 07	-
$a_0 b_4$	8,78356E - 08	-4,18957E - 08	-	-
$a_0 b_5$	-1,67873E - 10	-	-	-
$a_1 b_0$	0,0848566	0,0829127	0,100844	0,0921268
$a_1 b_1$	0,00027531	0,00067614	-0,00120418	-0,00072397
$a_1 b_2$	-7,64116E - 06	-1,33452E - 05	8,21099E - 06	4,42342E - 06
$a_1 b_3$	4,53831E - 08	5,85941E - 08	-7,36951E - 09	-
$a_1 b_4$	-1,07904E - 10	-4,03799E - 11	-	-
$a_1 b_5$	2,05016E - 13	-	-	-
$a_2 b_0$	-2,11063E - 05	-1,67254E - 05	-5,10315E - 05	-5,18892E - 06
$a_2 b_1$	-4,60203E - 07	-1,69307E - 06	2,23199E - 06	-2,06313E - 07
$a_2 b_2$	6,16885E - 09	3,011704E - 08	-1,92574E - 08	-4,57677E - 10
$a_2 b_3$	4,37963E - 13	-1,44715E - 10	3,60499E - 11	-
$a_2 b_4$	-1,29417E - 13	1,82806E - 13	-	-
$a_2 b_5$	1,69375E - 16	-	-	-
$R^2$	0,999972	0,999816	0,997065	0,995714

Tabela (II.1c)

Conductividade Térmica do Vapor

$$k(P,T) = f(P) + g(T)$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	55,0738	8,22336	28,4732	11,7662	16,1143
a <sub>1</sub>	0,128999	0,099677	0,226288	0,0399952	0,308986
b <sub>1</sub>	-0,959059	0,287323	-0,122522	0,125113	0,0817167
a <sub>2</sub>	-0,00072207	0,00596982	-0,00175832	0,00205288	-
b <sub>2</sub>	0,0106958	-0,00181550	0,00100875	-5,95281E - 05	-
a <sub>3</sub>	6,56496E - 05	-7,14783E - 05	1,82244E - 05	-	-
b <sub>3</sub>	-5,31129E - 05	6,77138E - 06	-1,44997E - 06	-	-
a <sub>4</sub>	-7,94431E - 07	3,15218E - 07	-	-	-
b <sub>4</sub>	1,28714E - 07	-8,58812E - 09	-	-	-
a <sub>5</sub>	3,08237E - 09	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	-1,21161E - 10	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,994888	0,994631	0,992451	0,987093	0,949695

Tabela (II.1d)

## Condutividade Térmica do Vapor

$$k(P,T) = f(P) \cdot g(T)$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	8,12235	21,1283	16,4939	18,9438
$a_0 b_1$	0,312436	-0,0262506	0,0819611	0,0430682
$a_0 b_2$	-0,00258747	0,00079649	-4,90793E - 05	0,00013285
$a_0 b_3$	1,37618E - 05	-2,43104E - 06	2,60689E - 07	-
$a_0 b_4$	-3,41729E - 08	3,00422E - 09	-	-
$a_0 b_6$	3,28671E - 11	-	-	-
$a_1 b_0$	2,18112	1,48623	0,616623	0,407160
$a_1 b_1$	-0,0232036	-0,0153881	-0,00452812	-0,00092896
$a_1 b_2$	8,65858E - 05	5,81399E - 05	1,56155E - 05	-1,30739E - 06
$a_1 b_3$	-1,10711E - 07	-7,70285E - 08	-2,38903E - 08	-
$a_1 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_1 b_6$	0,0	-	-	-
$a_2 b_0$	0,0387834	0,0322108	0,0191310	0,0100349
$a_2 b_1$	-0,00020048	-0,00017194	-8,99079E - 05	-3,14388E - 05
$a_2 b_2$	2,95474E - 07	2,51257E - 07	1,23639E - 07	3,07723E - 08
$a_2 b_3$	0,0	0,0	0,0	-
$a_2 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_2 b_6$	0,0	-	-	-
$R^2$	0,996217	0,996216	0,995210	0,996198

Tabela (II.2a)

Viscosidade Dinamica do Líquido

$$\nu (P,T) = f (P) + g (T)$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	11945,8	10667,4	9154,43	7159,15	4754,51
a <sub>1</sub>	-0,0575524	-0,0632575	-0,0134520	0,163906	0,384690
b <sub>1</sub>	-192,160	-141,369	-92,9190	-46,6430	-14,2452
a <sub>2</sub>	0,00131206	0,00111060	0,00062320	2,01405E - 05	-
b <sub>2</sub>	1,51760	0,832403	0,360554	0,0839730	-
a <sub>3</sub>	-2,78029E - 06	-1,69818E - 06	-4,68710E - 07	-	-
b <sub>3</sub>	-0,00632211	-0,00223470	-0,00046962	-	-
a <sub>4</sub>	2,74889E - 09	8,82218E - 10	-	-	-
b <sub>4</sub>	1,33074E - 05	2,22698E - 06	-	-	-
a <sub>5</sub>	-1,04474E - 12	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	-1,11348E - 08	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999914	0,999427	0,994448	0,952852	0,751507



Tabela (II.2b)

Viscosidade Dinâmica do Líquido

$$\nu (P,T) = f (P) \times g (T)$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	12195,8	10949,3	9608,77	7871,88
$a_0 b_1$	-200,845	-150,032	-104,438	-58,6585
$a_0 b_2$	1,62751	0,916376	0,437813	0,121520
$a_0 b_3$	-0,00698124	-0,00255868	-0,00061932	-
$a_0 b_4$	1,51633E - 05	2,65008E - 06	-	-
$a_0 b_5$	-1,31115E - 08	-	-	-
$a_1 b_0$	-0,851329	-1,22010	-2,06048	-3,47642
$a_1 b_1$	0,0372221	0,0440886	0,0563504	0,0605133
$a_1 b_2$	-0,00049035	-0,00044084	-0,00037762	-0,00018617
$a_1 b_3$	3,00018E - 06	1,72124E - 06	7,24406E - 07	-
$a_1 b_4$	-8,35089E - 09	-2,26024E - 09	-	-
$a_1 b_5$	9,11454E - 12	-	-	-
$a_2 b_0$	0,00059613	0,00110517	0,00196453	0,00342684
$a_2 b_1$	-2,58909E - 05	-3,81821E - 05	-5,11674E - 05	-5,71224E - 05
$a_2 b_2$	3,82591E - 07	4,04176E - 07	3,50813E - 07	1,76843E - 07
$a_2 b_3$	2,48799E - 09	1,62193E - 09	-6,78771E - 10	-
$a_2 b_4$	7,33308E - 12	2,16299E - 12	-	-
$a_2 b_5$	-8,01192E - 15	-	-	-
$R^2$	0,999982	0,999505	0,994944	0,956914

Tabela (II.2c)

Viscosidade Dinâmica do Vapor

$$\nu (P,T) = f (P) + g (T)$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	53,0824	56,9381	89,9322	82,9794	78,8877
a <sub>1</sub>	-0,245438	-0,253379	-0,274480	-0,111217	-0,0482207
b <sub>1</sub>	1,06120	0,959365	0,258919	0,373610	0,411299
a <sub>2</sub>	0,00473311	0,00585476	0,00714254	0,00093354	-
b <sub>2</sub>	-0,00547486	-0,00445948	0,00068013	8,48990E - 05	-
a <sub>3</sub>	1,73788E - 05	-3,64716E - 05	-5,66611E - 05	-	-
b <sub>3</sub>	1,95972E - 05	1,47845E - 05	-9,37046E - 07	-	-
a <sub>4</sub>	-1,09401E - 06	-9,98175E - 08	-	-	-
b <sub>4</sub>	-2,80556E - 08	-1,71308E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	6,09710E - 09	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	9,55556E - 12	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999502	0,999502	0,999322	0,998971	0,998383

Tabela (11.2d)

## Viscosidade Dinâmica do Vapor

$$\nu (P,T) = f (P) \times g (T)$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	75,3867	83,7768	82,6057	83,2304
$a_0 b_1$	0,595465	0,376305	0,401785	0,389161
$a_0 b_2$	-0,00205094	0,00015309	-3,84428E - 05	2,86630E - 05
$a_0 b_3$	1,01116E - 05	-4,90699E - 07	1,04938E - 07	-
$a_0 b_4$	-2,37564E - 08	6,54582E - 10	-	-
$a_0 b_5$	2,15893E - 11	-	-	-
$a_1 b_0$	-2,65932	-3,03877	-3,05270	-2,73514
$a_1 b_1$	0,0157532	0,0186948	0,0189010	0,0165200
$a_1 b_2$	-2,32831E - 05	-2,887822E - 05	-2,94204E - 05	-2,50404E - 05
$a_1 b_3$	0,0	0,0	0,0	-
$a_1 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_1 b_5$	0,0	-	-	-
$a_2 b_0$	0,103375	0,122972	0,120189	0,100999
$a_2 b_1$	-0,00076014	-0,00090854	-0,00089104	-0,00074788
$a_2 b_2$	1,38298E - 06	1,65998E - 06	1,63266E - 06	1,36897E - 06
$a_2 b_3$	0,0	0,0	0,0	-
$a_2 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_2 b_5$	0,0	-	-	-
$R^2$	0,999999	0,999998	0,999998	0,999997

Os valores dos coeficientes para as curvas de ajuste representadas pelas expressões (33) a (36), utilizadas para cada uma das propriedades do vapor superaquecido anteriormente citadas, bem como os valores de  $R^2$  para cada função, são mostrados: nas Tabelas (III.1a), (III.1b), (III.1c) e (III.1d), para a entropia; nas Tabelas (III.2a), (III.2b), (III.2c) e (III.2d), para o volume específico; e nas Tabelas (III.3a), (III.3b), (III.3c) e (III.3d) para a densidade.

As tabelas para a entalpia e energia interna foram suprimidas devido a impossibilidade de se obter correlações suficientemente boas para estas propriedades.

#### 4 – LÍQUIDO COMPRIMIDO

Para o líquido comprimido, foram estudadas, como função da temperatura, as seguintes propriedades:

- volume específico; em  $\text{cm}^3/\text{g}$
- energia interna; em  $\text{J/g}$
- entalpia;  $\text{J/g}$
- entropia;  $\text{J/g}^\circ\text{k}$
- densidade; em  $\text{g/cm}^3$

Cada uma destas quantidades, tomadas para pressões de 100, 125, 150 e 175 bar, foi ajustada por uma função da temperatura, da forma:

$$f(T) = \sum_{i=0}^n a_i T^i \quad n = 1, 2 \dots 5 \quad (45)$$

com a temperatura medida em  $^\circ\text{C}$ , variando de 0 a  $350^\circ\text{C}$ .

Os valores dos coeficientes das variáveis independentes para as curvas de ajuste de cada uma das propriedades do líquido comprimido, assim como os valores de  $R^2$  para cada ajuste, são mostrados: nas Tabelas (IV.1a), (IV.1b), (IV.1c) e (IV.1d) para o volume específico; nas Tabelas (IV.2a), (IV.2b), (IV.2c) e (IV.2d) para a energia interna; nas Tabelas (IV.3a), (IV.3b), (IV.3c) e (IV.3d) para a entalpia, nas Tabelas (IV.4a), (IV.4b), (IV.4c) e (IV.4d) para a entropia; e nas Tabelas (IV.5a), (IV.5b), (IV.5c) e (IV.5d) para a densidade.

Tabela (III.1a)

Entropia do Vapor Superaquecido

$$S(P,T)/S_{\text{sat}}(T) = f(P_{\text{sat}}/P) + g(T_{\text{sat}}/T)$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	-13,3757	-13,3757	3,03516	0,0450839	1,23836
a <sub>1</sub>	0,462207	0,462207	0,194245	0,0780158	0,00184237
b <sub>1</sub>	68,3877	68,3877	-8,71975	1,78222	-0,236751
a <sub>2</sub>	-0,154599	-0,154599	-0,0324220	-0,00306728	-
b <sub>2</sub>	-125,244	-125,244	10,6639	-0,899919	-
a <sub>3</sub>	0,0226627	0,0226627	0,00156561	-	-
b <sub>3</sub>	101,058	101,058	-4,14107	-	-
a <sub>4</sub>	-0,00107151	-0,00107151	-	-	-
b <sub>4</sub>	-30,1540	-30,1540	-	-	-
a <sub>5</sub>	0,000000	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	0,000000	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,989410	0,989410	0,987560	0,985461	0,981154

Tabela (III.1b)

Entropia do Vapor Superaquecido

$$S(P,T)/S_{sat}(T) = f(P_{sat}/P) \times g(T_{sat}/T)$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	1425,20	51,5460	-7,71794	5,02885
$a_0 b_1$	-6319,94	-307,518	32,8816	-7,53524
$a_0 b_2$	11348,5	323,250	-38,0037	3,26402
$a_0 b_3$	-10315,9	-511,572	13,3466	-
$a_0 b_4$	4744,21	145,301	-	-
$a_0 b_5$	-885,342	-	-	-
$a_1 b_0$	11,4567	48,0838	-3,89244	0,391561
$a_1 b_1$	-254,303	-238,728	16,4969	-2,29713
$a_1 b_2$	576,951	481,945	-24,7129	2,09083
$a_1 b_3$	-394,671	-457,176	12,6013	-
$a_1 b_4$	0,0	165,037	-	-
$a_1 b_5$	68,2744	-	-	-
$a_2 b_0$	0,0	-0,408853	0,0442349	-0,298783
$a_2 b_1$	0,0	0,0	0,0	0,0893717
$a_2 b_2$	5,40635	0,0	-0,0420810	0,0
$a_2 b_3$	0,0	1,23995	0,0	-
$a_2 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_2 b_5$	8,82169	-	-	-
$R^2$	0,992798	0,992416	0,990572	0,988516

Tabela (III.1c)

## Entropia do Vapor Superaquecido

$$S(P,T)/S_{\text{sat}}(T) = f(P/P_{\text{sat}}) + g(T/T_{\text{sat}})$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	11,4367	6,36824	2,32941	1,04856	0,973462
a <sub>1</sub>	-2,80774	1,05299	-0,945149	-0,105831	-0,0546310
b <sub>1</sub>	-25,9423	-12,5396	-1,42456	0,0215826	0,0835540
a <sub>2</sub>	9,93883	-3,01749	0,797834	0,0249613	-
b <sub>2</sub>	24,7806	10,7077	0,624585	0,0134733	-
a <sub>3</sub>	-17,4436	2,85868	-0,288427	-	-
b <sub>3</sub>	-10,3545	-4,00161	-0,0924342	-	-
a <sub>4</sub>	14,1851	-0,986699	-	-	-
b <sub>4</sub>	1,59255	0,558302	-	-	-
a <sub>5</sub>	-4,38604	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	0,0	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,991669	0,990755	0,989131	0,983618	0,983414

Tabela (III.1d)

## Entropia do Vapor Superaquecido

$$S(P,T)/S_{\text{sat}}(T) = f(P/P_{\text{sat}}) \times g(T/T_{\text{sat}})$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	-127,684	-127,684	9,70867	0,588883
$a_0 b_1$	261,295	261,295	-15,3548	0,403831
$a_0 b_2$	-187,166	-187,166	8,22628	-0,0799440
$a_0 b_3$	69,2559	69,2559	-1,13428	-
$a_0 b_4$	-7,46088	-7,46088	-	-
$a_0 b_5$	0,0	-	-	-
$a_1 b_0$	-124,571	-124,571	34,5208	0,995380
$a_1 b_1$	426,452	426,542	-91,0593	-0,624020
$a_1 b_2$	-398,840	-398,840	79,0376	0,262460
$a_1 b_3$	103,445	103,445	-22,8163	-
$a_1 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_1 b_5$	0,0	-	-	-
$a_2 b_0$	19,5934	19,5934	-1,93182	1,07385
$a_2 b_1$	0,0	0,0	1,80305	-1,60894
$a_2 b_2$	-57,8785	-57,8785	0,0	0,0
$a_2 b_3$	0,0	0,0	0,0	-
$a_2 b_4$	34,5593	34,5593	-	-
$a_2 b_5$	0,0	-	-	-
$R^2$	0,992649	0,992649	0,991497	0,990198



Tabela (III.2a)

Volume Específico do Vapor Superaquecido

$$V(P, T)/V_{\text{sat}}(T) = f(P_{\text{sat}}/P) + g(T_{\text{sat}}/T)$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	60,4316	60,4316	12,4149	-5,61551	0,124633
a <sub>1</sub>	-0,605005	-0,605005	1,21325	1,29875	1,00542
b <sub>1</sub>	-277,061	-277,061	-45,6889	10,2178	-0,115557
a <sub>2</sub>	0,682356	0,682356	-0,0485029	-0,00895571	-
b <sub>2</sub>	477,304	477,304	54,3592	-4,88760	-
a <sub>3</sub>	-0,111606	-0,111606	0,00203195	-	-
b <sub>3</sub>	-358,075	-358,075	-21,2537	-	-
a <sub>4</sub>	0,00557534	0,00557534	-	-	-
b <sub>4</sub>	98,3290	98,3290	-	-	-
a <sub>5</sub>	0,0	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	0,0	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,994933	0,994933	0,994897	0,994842	0,994734

Tabela (III.2b)

Volume Específico do Vapor Superaquecido

$$V(P,T)/V_{sat}(T) = f(P_{sat}/P) \cdot g(T_{sat}/T)$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	32248,1	-654,637	-1367,19	-91,4123
$a_0 b_1$	-136379,	440,134	3372,55	161,518
$a_0 b_2$	232798,	1441,66	-2832,07	-70,3765
$a_0 b_3$	-202757,	-1897,34	802,212	-
$a_0 b_4$	90442,9	631,183	-	-
$a_0 b_5$	-16550,6	-	-	-
$a_1 b_0$	130,440	-54,6724	-129,239	3,02627
$a_1 b_1$	-5610,27	218,854	828,653	26,5234
$a_1 b_2$	12113,5	354,293	-1058,68	-26,3985
$a_1 b_3$	-7054,01	-795,967	408,972	-
$a_1 b_4$	0,0	355,974	-	-
$a_1 b_5$	814,606	-	-	-
$a_2 b_0$	0,0	1,03963	2,30708	0,599345
$a_2 b_1$	0,0	0,0	0,0	-2,48141
$a_2 b_2$	169,345	0,0	-26,6132	0,0
$a_2 b_3$	0,0	-39,5279	0,0	-
$a_2 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_2 b_5$	-364,841	-	-	-
$R^2$	0,995104	0,995003	0,994984	0,994937

Tabela (III.2c)

Volume Específico do Vapor Superaquecido

$$V(P,T)/V_{\text{sat}}(T) = f(P/P_{\text{sat}}) + g(T/T_{\text{sat}})$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	-45,3466	-31,6886	17,0648	1,28043	-9,79423
a <sub>1</sub>	-32,2420	-42,6455	-8,71538	-0,231071	1,89531
b <sub>1</sub>	147,374	111,257	-23,0665	-3,51707	8,96315
a <sub>2</sub>	39,6069	74,5201	7,31088	-0,0323664	—
b <sub>2</sub>	-142,579	-104,657	12,5438	3,50721	—
a <sub>3</sub>	-5,51733	-60,2256	-2,66415	—	—
b <sub>3</sub>	58,8142	41,6952	-1,48194	—	—
a <sub>4</sub>	-22,3014	18,5818	—	—	—
b <sub>4</sub>	-8,61628	-5,82930	—	—	—
a <sub>5</sub>	11,8190	—	—	—	—
b <sub>5</sub>	0,0	—	—	—	—
R <sup>2</sup>	0,994978	0,994975	0,994751	0,994464	0,988878

Tabela (III.2d)

Volume Específico do Vapor Superaquecido

$$v(P,T)/v_{\text{sat}}(T) = f(P/P_{\text{sat}})^m \cdot g(T/T_{\text{sat}})^n$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	-2133,14	-2133,14	-626,375	-9,62580
$a_0 b_1$	3715,07	3715,07	938,537	10,7683
$a_0 b_2$	-2399,23	-2399,23	-448,236	0,736715
$a_0 b_3$	682,166	682,166	64,5691	-
$a_0 b_4$	-77,8635	-77,8635	-	-
$a_0 b_5$	0,0	-	-	-
$a_1 b_0$	-2985,29	-2985,29	-1376,56	-35,2643
$a_1 b_1$	8316,47	8316,47	3759,45	76,1483
$a_1 b_2$	-6632,15	-6632,15	-3013,84	-42,8973
$a_1 b_3$	1735,56	1735,56	779,101	-
$a_1 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_1 b_5$	0,0	-	-	-
$a_2 b_0$	231,831	231,831	238,121	-1,67702
$a_2 b_1$	0,0	0,0	-313,771	2,61038
$a_2 b_2$	-438,516	-438,516	0,0	0,0
$a_2 b_3$	0,0	0,0	0,0	-
$a_2 b_4$	-13,9162	-13,9162	-	-
$a_2 b_5$	0,0	-	-	-
$R^2$	0,995158	0,995158	0,995043	0,994918

Tabela (III.3a)

Densidade do Vapor Superaquecido

$$\rho(P,T)/\rho_{\text{sat}}(T) = f(P_{\text{sat}}/P) + g(T_{\text{sat}}/T)$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	12,0938	12,0938	-14,1237	9,78933	-2,34816
a <sub>1</sub>	-1,18882	-1,18882	-0,843982	-0,481038	0,101410
b <sub>1</sub>	-63,0741	-63,0741	59,6839	-18,9584	3,21248
a <sub>2</sub>	0,316799	0,316799	0,151659	0,0159399	-
b <sub>2</sub>	140,847	140,847	-74,3044	10,6235	-
a <sub>3</sub>	-0,0367118	-0,0367118	-0,00718277	-	-
b <sub>3</sub>	-135,336	-135,336	30,4397	-	-
a <sub>4</sub>	0,00151559	0,00151559	-	-	-
b <sub>4</sub>	47,3736	47,3736	-	-	-
a <sub>5</sub>	0,0	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	0,0	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,978844	0,978844	0,978797	0,977567	0,958444

Tabela (III.3b)

Densidade do Vapor Superaquecido

$$\rho(P,T)/\rho_{\text{sat}}(T) = f(P_{\text{sat}}/P) \cdot g(T_{\text{sat}}/T)$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	15827,0	179,605	511,801	33,8453
$a_0 b_1$	66756,4	330,739	-1288,10	-59,1949
$a_0 b_2$	-115255,	-1635,26	1105,08	27,5828
$a_0 b_3$	101432,	1648,92	-317,215	-
$a_0 b_4$	-45618,6	-507,517	-	-
$a_0 b_5$	8399,53	-	-	-
$a_1 b_0$	-73,6563	-82,1644	58,3664	-3,34399
$a_1 b_1$	2723,06	423,346	-346,492	-2,88225
$a_1 b_2$	-5940,52	-1151,69	452,695	4,21845
$a_1 b_3$	3586,67	1268,52	-183,912	-
$a_1 b_4$	0,0	-486,386	-	-
$a_1 b_5$	-464,510	-	-	-
$a_2 b_0$	0,0	0,501439	-0,966624	-0,183825
$a_2 b_1$	0,0	0,0	0,0	0,951315
$a_2 b_2$	-77,5608	0,0	9,73169	0,0
$a_2 b_3$	0,0	12,3889	0,0	-
$a_2 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_2 b_5$	160,337	-	-	-
$R^2$	0,979916	0,979367	0,979147	0,978441

Tabela (III.3c)

Densidade do Vapor Superaquecido

$$\rho(P,T)/\rho_{\text{sat}}(T) = f(P/P_{\text{sat}}) + g(T/T_{\text{sat}})$$

Coef.	m = 5, n = 5	m = 4, n = 4	m = 3, n = 3	m = 2, n = 2	m = 1, n = 1
Int.	-9,23115	-8,84181	-0,145626	1,10547	-0,0751080
a <sub>1</sub>	2,40510	2,10854	1,45847	0,208416	1,02639
b <sub>1</sub>	24,9710	23,9415	0,0850387	-0,927871	0,0382533
a <sub>2</sub>	-4,31729	-3,32205	-0,858343	0,401366	-
b <sub>2</sub>	-25,1115	-24,0304	-0,0404392	0,208129	-
a <sub>3</sub>	5,15144	3,59191	0,487754	-	-
b <sub>3</sub>	10,9413	10,4533	0,0109707	-	-
a <sub>4</sub>	-2,40862	-1,24319	-	-	-
b <sub>4</sub>	-1,74102	-1,66158	-	-	-
a <sub>5</sub>	0,336915	-	-	-	-
b <sub>5</sub>	0,0	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,979011	0,979011	0,978960	0,978819	0,978052

Tabela (III.3d)

Densidade do Vapor Superaquecido

$$\rho (P,T)/\rho_{sat}(T) = f (P/P_{sat})^a \cdot g (T/T_{sat})$$

Coef.	m = 5, n = 2	m = 4, n = 2	m = 3, n = 2	m = 2, n = 2
$a_0 b_0$	1064,01	1064,01	206,268	3,63248
$a_0 b_1$	-1933,75	-1933,75	-306,080	-3,30447
$a_0 b_2$	1292,61	1292,61	146,505	0,666628
$a_0 b_3$	-381,026	-381,026	-21,0342	-
$a_0 b_4$	45,0899	45,0899	-	-
$a_0 b_5$	0,0	-	-	-
$a_1 b_0$	1368,39	1368,39	430,799	3,85894
$a_1 b_1$	-3974,66	-3974,66	-1184,08	-10,0289
$a_1 b_2$	3296,01	3296,01	945,921	4,73268
$a_1 b_3$	-866,409	-866,409	-244,635	-
$a_1 b_4$	0,0	0,0	-	-
$a_1 b_5$	0,0	-	-	-
$a_2 b_0$	-124,931	-124,931	-81,6251	-2,29565
$a_2 b_1$	0,0	0,0	108,956	3,73527
$a_2 b_2$	277,278	277,278	0,0	0,0
$a_2 b_3$	0,0	0,0	0,0	-
$a_2 b_4$	-61,6196	-61,6196	-	-
$a_2 b_5$	0,0	-	-	-
$R^2$	0,980164	0,980164	0,979423	0,978964



Tabela (IV. 1a)

Volume Específico do Líquido Comprimido (P = 100 bar)

$$V = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	0,994384	0,996938	0,987430	1,01003	0,921909
$a_1$	0,00018764	-0,00022320	0,00060304	-0,00038247	0,00136379
$a_2$	1,13081E - 08	1,01598E - 06	-2,39969E - 06	5,43345E - 06	-
$a_3$	4,25479E - 08	-4,64811E - 08	1,64158E - 08	-	-
$a_4$	-2,22547E - 10	9,98802E - 11	-	-	-
$a_5$	4,11734E - 13	-	-	-	-
$R^2$	0,999956	0,999802	0,998420	0,992295	0,897567

Tabela (IV. 1b)

Volume Específico do Líquido Comprimido (P = 125 bar)

$$V = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	0,992870	0,996533	0,984394	1,01272	0,912807
$a_1$	0,00025806	-0,00029931	0,00070912	-0,00047795	0,00141478
$a_2$	-1,81189E - 06	1,11446E - 05	-3,36486E - 06	5,73964E - 06	-
$a_3$	5,88741E - 08	-5,34019E - 08	1,84468E - 08	-	-
$a_4$	-2,82468E - 10	1,10560E - 10	-	-	-
$a_5$	4,85642E - 13	-	-	-	-
$R^2$	0,999925	0,999674	0,997813	0,989859	0,886690

Tabela (IV.1c)

Volume Específico do Líquido Comprimido (P = 150 bar)

$$V = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	0,990024	0,998819	0,976329	1,02161	0,888542
$a_1$	0,00058569	-0,00066502	0,00109941	-0,00075029	0,00166242
$a_2$	-1,06410E - 05	1,77339E - 05	-7,02262E - 06	6,81788E - 06	-
$a_3$	1,41218E - 07	-8,78589E - 08	2,68031E - 08	-	-
$a_4$	-5,93717E - 10	1,67710E - 10	-	-	-
$a_5$	8,90838E - 13	-	-	-	-
$R^2$	0,999637	0,998723	0,994563	0,980970	0,864485

Tabela (IV.1d)

Volume Específico do Líquido Comprimido (P = 175 bar)

$$V = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	0,987337	1,00063	0,969448	1,02850	0,874954
$a_1$	0,00085101	-0,00094835	0,00139199	-0,00093562	0,00176204
$a_2$	-1,72223E - 05	2,22041E - 05	-9,49598E - 06	7,39414E - 06	-
$a_3$	1,97707E - 07	-1,10250E - 07	3,17851E - 08	-	-
$a_4$	-7,89990E - 10	2,01545E - 10	-	-	-
$a_5$	1,12303E - 12	-	-	-	-
$R^2$	0,999250	0,997653	0,991381	0,972908	0,848848

Tabela (IV.2a)

Energia Interna do Líquido Comprimido (P = 100 bar)

$$u = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	-0,151313	1,00829	-2,28877	9,76841	-20,8134
$a_1$	4,23323	4,04702	4,33335	3,80768	4,41020
$a_2$	-0,00253991	0,00205972	-0,00229263	0,00188554	-
$a_3$	2,73108E - 05	-1,30401E - 05	8,75612E - 06	-	-
$a_4$	-1,11522E - 07	3,46124E - 08	-	-	-
$a_5$	1,86612E - 10	-	-	-	-
$R^2$	0,999999	0,999996	0,999979	0,999796	0,998600

Tabela (IV.2b)

Energia Interna do Líquido Comprimido (P = 125 bar)

$$u = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	-31,1228	-41,0129	-12,9383	53,7930	30,4705
$a_1$	7,40953	8,91446	6,58221	3,78609	4,22789
$a_2$	-0,0185627	-0,0543804	-0,0201057	0,00133974	-
$a_3$	-9,35289E - 05	0,00020962	4,34511E - 05	-	-
$a_4$	8,05504E - 07	-2,55789E - 07	-	-	-
$a_5$	-1,31125E - 09	-	-	-	-
$R^2$	0,999032	0,968810	0,967601	0,962242	0,961560

Tabela (IV.2c)

Energia Interna do Líquido Comprimido (P = 150 bar)

$$u = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	-0,679386	2,47977	-5,22056	15,0855	-32,2859
$a_1$	4,32731	3,87808	4,48218	3,65274	4,51164
$a_2$	-0,00549492	0,00469683	-0,00377922	0,00242707	-
$a_3$	5,50416E - 05	-2,72387E - 05	1,20189E - 05	-	-
$a_4$	-2,16075E - 07	5,74883E - 08	-	-	-
$a_5$	3,19974E - 10	-	-	-	-
$R^2$	0,999995	0,999976	0,999900	0,999472	0,997160

Tabela (IV.2d)

Energia Interna do Líquido Comprimido (P = 175 bar)

$$u = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	-1,04356	3,37523	-6,96411	17,8859	-36,5551
$a_1$	4,38388	3,78578	4,56175	3,58321	4,53877
$a_2$	-0,00708029	0,00602501	-0,00448561	0,00262159	-
$a_3$	6,86448E - 05	-3,37191E - 05	1,33749E - 06	-	-
$a_4$	-2,62657E - 07	6,68252E - 08	-	-	-
$a_5$	3,73291E - 10	-	-	-	-
$R^2$	0,999989	0,999958	0,999836	0,999257	0,996498

Tabela (IV.3a)

Entalpia do Líquido Comprimido (P = 100 bar)

$$h = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	9,79105	10,9774	7,57448	19,8723	-11,5925
a <sub>1</sub>	4,23505	4,04423	4,33992	3,80376	4,42368
a <sub>2</sub>	-0,00254050	0,00217319	-0,00232157	0,00193999	-
a <sub>3</sub>	2,77730E - 05	-1,35785E - 05	8,93086E - 06	-	-
a <sub>4</sub>	-1,14014E - 07	3,57449E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	1,91239E - 10	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999999	0,999996	0,999978	0,999789	0,998530

Tabela (IV.3b)

Entalpia do Líquido Comprimido (P = 125 bar)

$$h = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	12,2118	13,7967	9,37649	24,0759	-12,3076
a <sub>1</sub>	4,24395	4,00276	4,36996	3,75403	4,44326
a <sub>2</sub>	-0,00297790	0,00275925	-0,00263395	0,00209002	-
a <sub>3</sub>	3,19935E - 05	-1,65908E - 05	9,57134E - 06	-	-
a <sub>4</sub>	-1,29817E - 07	4,02726E - 08	-	-	-
a <sub>5</sub>	2,10148E - 10	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999999	0,999994	0,999966	0,999721	0,998180

Tabela (IV.3c)

Entalpia do Líquido Comprimido (P = 150 bar)

$$h = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	14,1848	17,4676	9,43393	30,4081	-18,9501
$a_1$	4,33490	3,86809	4,49835	3,64162	4,53654
$a_2$	-0,00562923	0,00496134	-0,00388163	0,00252887	-
$a_3$	5,69574E - 05	-2,85427E - 05	1,24144E - 05	-	-
$a_4$	-2,24291E - 07	5,99769E - 08	-	-	-
$a_5$	3,32495E - 10	-	-	-	-
$R^2$	0,999994	0,999975	0,999892	0,999441	0,996959

Tabela (IV.3d)

Entalpia do Líquido Comprimido (P = 175 bar)

$$h = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	16,2448	20,8879	10,0069	35,9009	-21,2531
$a_1$	4,39796	3,76950	4,58613	3,56554	4,56967
$a_2$	-0,00736287	0,00640774	-0,00465355	0,00275224	-
$a_3$	7,19380E - 05	-3,56245E - 05	1,38367E - 05	-	-
$a_4$	-2,75883E - 07	7,03262E - 08	-	-	-
$a_5$	3,92241E - 10	-	-	-	-
$R^2$	0,999980	0,999954	0,999821	0,999201	0,996202

Tabela (IV.4a)

Entropia do Líquido Comprimido (P = 100 bar)

$$S = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	-8,58829E - 05	0,00233026	0,00065264	0,0468594	0,181638
a <sub>1</sub>	0,0153407	0,0149520	0,0150978	0,0130833	0,0104278
a <sub>2</sub>	-3,17063E - 05	-2,21059E - 05	-2,43219E - 05	-8,30986E - 06	—
a <sub>3</sub>	1,06679E - 07	2,24589E - 08	3,35561E - 08	—	—
a <sub>4</sub>	-2,87391E - 10	1,76222E - 11	—	—	—
a <sub>5</sub>	3,89496E - 13	—	—	—	—
R <sup>2</sup>	1,000000	0,999997	0,999996	0,999518	0,995376

Tabela (IV.4b)

Entropia do Líquido Comprimido (P = 125 bar)

$$S = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	-0,00012752	0,00295976	6,99288E - 05	0,0519218	0,187976
a <sub>1</sub>	0,0153319	0,0148622	0,0151023	0,0129296	0,0103523
a <sub>2</sub>	-3,21274E - 05	-2,09532E - 05	-2,44792E - 05	-7,81553E - 06	—
a <sub>3</sub>	1,11286E - 07	1,66583E - 08	3,37625E - 08	—	—
a <sub>4</sub>	-3,04952E - 10	2,63293E - 11	—	—	—
a <sub>5</sub>	4,09303E - 13	—	—	—	—
R <sup>2</sup>	1,000000	0,999996	0,999994	0,999435	0,995424

Tabela (IV.4c)

Entropia do Líquido Comprimido (P = 160 bar)

$$S = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	-0,00083786	0,00496975	0,00303636	0,0596929	0,192747
$a_1$	0,0154473	0,0146214	0,0152495	0,0126872	0,0102748
$a_2$	-3,59128E - 05	-1,71768E - 05	-2,59895E - 05	-6,81703E - 06	-
$a_3$	1,47572E - 07	-3,68775E - 09	3,71286E - 08	-	-
$a_4$	-4,43131E - 10	5,97711E - 11	-	-	-
$a_5$	5,88221E - 13	-	-	-	-
$R^2$	0,999998	0,999985	0,999970	0,999183	0,995672

Tabela (IV.4d)

Entropia do Líquido Comprimido (P = 175 bar)

$$S = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
$a_0$	-0,00147256	-0,00647093	-0,00541374	0,0664711	0,196679
$a_1$	0,0155216	0,0144464	0,0153384	0,0125051	0,0102175
$a_2$	-3,83067E - 05	-1,47479E - 05	-2,68294E - 05	-6,27013E - 06	-
$a_3$	1,68573E - 07	-1,54427E - 08	3,86899E - 08	-	-
$a_4$	-5,15484E - 10	7,68129E - 11	-	-	-
$a_5$	6,71049E - 13	-	-	-	-
$R^2$	0,999995	0,999975	0,999943	0,998988	0,995675



Tabela (IV.5a)

Densidade do Líquido Comprimido (P = 100 bar)

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	1,00517	1,00456	1,00853	1,00333	1,04969
a <sub>1</sub>	-6,99359E - 05	2,85785E - 05	-0,00031652	8,97540E - 05	-0,00100323
a <sub>2</sub>	-3,86848E - 06	-6,30199E - 06	-1,06627E - 06	-2,86863E - 06	-
a <sub>3</sub>	1,14464E - 09	2,24929E - 08	-3,77719E - 09	-	-
a <sub>4</sub>	3,55980E - 11	-4,17170E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	-9,87299E - 14	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999989	0,999972	0,999507	0,998884	0,948425

Tabela (IV.5b)

Densidade do Líquido Comprimido (P = 125 bar)

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	1,00648	1,00557	1,01034	1,00349	1,05421
a <sub>1</sub>	-9,89017E - 05	4,14958E - 05	-0,00035475	-6,79443E - 05	-0,00102852
a <sub>2</sub>	-3,24095E - 06	-6,53301E - 06	-7,13185E - 07	-2,91291E - 06	-
a <sub>3</sub>	-4,10356E - 09	2,37748E - 08	-4,45690E - 09	-	-
a <sub>4</sub>	5,41414E - 11	-4,34584E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	-1,20586E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999983	0,999952	0,999373	0,998436	0,944859

Tabela (IV.5c)

Densidade do Líquido Comprimido (P = 150 bar)

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	1,00813	1,00589	1,01361	1,00185	1,06414
a <sub>1</sub>	-0,00018815	0,00013107	-0,00047479	5,65248E - 06	-0,00112376
a <sub>2</sub>	-8,55218E - 07	-8,09729E - 06	4,03396E - 07	-3,19151E - 06	-
a <sub>3</sub>	-2,60569E - 08	3,24099E - 08	-6,96179E - 09	-	-
a <sub>4</sub>	1,36734E - 10	-5,76553E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	-2,27367E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999931	0,999790	0,998628	0,996455	0,935976

Tabela (IV.5d)

Densidade do Líquido Comprimido (P = 175 bar)

$$\rho = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

Coef.	n = 5	n = 4	n = 3	n = 2	n = 1
a <sub>0</sub>	1,00973	1,00639	1,01838	1,00101	1,06964
a <sub>1</sub>	-0,00025984	0,00019141	-0,0005577	4,79949E - 05	-0,00115770
a <sub>2</sub>	8,30830E - 07	-9,05676E - 06	1,09096E - 06	-3,30473E - 06	-
a <sub>3</sub>	-4,00350E - 08	3,71958E - 08	-8,27213E - 09	-	-
a <sub>4</sub>	1,84068E - 10	-6,45179E - 11	-	-	-
a <sub>5</sub>	-2,81638E - 13	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0,999866	0,999611	0,997976	0,994795	0,931779

**ABSTRACT**

The equations of state for light water were developed in this work based on the tables of Keenan and Keyes. Equation describing the specific volume, internal energy, enthalpy and entropy of saturate steam, superheated vapor and subcooled liquid are presented as a function of pressure and temperature. For each property several equations are presented, with different precision and different degree of complexity.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS\***

1. BARR, J. A.; GOODNIGHT, J. H.; SALL, J. P. *SAS User's guide*. Raleigh, N. C., SAS Institute, 1979.
2. HUNTER, D. A. A. *Utilização dos gases residuais de uma planta HTGR - Turbina a gás para dessalinização da água do mar*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1981. (Dissertação de mestrado)
3. KEENAN, J. H.; KEYES, F. G.; HILL, P. G.; MOORE, J. G. *Steam tables Thermodynamics properties of water including vapor, liquid, and solid phases*. New York, Wiley, 1979.

---

(\*) As referências bibliográficas relativas a documentos localizados pela IPEN foram revistas e enquadradas na NB-66 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

Caixa Postal, 11049 – Pinheiros

CEP 05508

01000 – São Paulo – SP

Telefone: 211-6011

Endereço Telegráfico – IPENUCLEAR

Telex – (011) 23592 - IPEN - BR