

ATUALIDADES NAS FORMULAÇÕES DAS PROPRIEDADES DA ÁGUA E VAPOR PARA FINS INDUSTRIAIS E CIENTÍFICOS

Benedito Dias Baptista Filho

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP)
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP
bdbfilho@ipen.br

ABSTRACT

This paper presents a description of the activities of an international association that has the aim of establish global references for every kind of water property, *the International Association for the Properties of Water and Steam*, IAPWS. The paper reports few activities of the Argentina and Brazil Bi-national Committee within IAPWS. Actual notes on the scientific formulation, IAPWS95, on the Industrial Formulation, IF97 are presented. Releases on previous backward equations are cited and the supplementary release on backward equations for specific volume as a function of pressure and temperature for region 3 of IAPWS-IF97 is announced. FORTRAN routines, Excel supplements, dynamic link libraries and also tests with artificial neural networks are referenced. Finally, the launching of a Steam Table in Spanish and Portuguese is announced to the end of 2005.

1. INTRODUÇÃO

Propriedades da água são usadas em muitas aplicações da engenharia e, geralmente, o que difere de uma para outra aplicação são requisitos de precisão e tempo de computação. A diferença se acentua entre aplicações científicas e industriais, onde a maior demanda é do setor de energia que busca mais informações sobre propriedades termodinâmicas e químicas da água em amplas faixas que incluem condições supercríticas e meta-estáveis. No setor científico a precisão geralmente supera requisitos de tempo de computação.

Aspectos econômicos impõem requisitos de qualidade cada vez mais restritivos e isso implica em maior precisão e confiabilidade, o obriga as empresas a investirem tanto em calibrações quanto na obtenção de padrões mais precisos. No setor científico o desenvolvimento de programas de computador cada vez mais complexos que dependem massivamente de cálculos de propriedades da água tem demandado aumento na velocidade de computação, ou seja, há necessidade de melhorias em todos os aspectos e em todos os setores.

Essas demandas exigem o contínuo aprimoramento das formulações para cálculo das propriedades da água e vapor, atividades essas desenvolvidas por uma organização internacional conhecida como "*the International Association for the Properties of Water and Steam*", a IAPWS, que é uma associação internacional sem fins lucrativos voltada exclusivamente para essa missão (www.iapws.org). Os objetivos da IAPWS são: a) prover formulações com aceitação internacional para as propriedades da água e vapor leve, água pesada e soluções aquosas selecionadas; b) estabelecer as necessidades de pesquisa e

promover e coordenar pesquisas em vapor, água e sistemas aquosos importantes em ciclos térmicos; c) coleccionar e avaliar os dados resultantes dessas pesquisas, comunicando e promulgando as descobertas; e, d) promover um foro internacional para troca de experiências, idéias e resultados da pesquisa em meios aquosos a alta temperatura.

Os atuais membros da IAPWS, organizados em comitês nacionais ou binacionais são: Argentina e Brasil; Inglaterra e Irlanda; Canadá; República Tcheca; Dinamarca; França; Alemanha; Grécia; Itália; Japão; Rússia; e Estados Unidos da América.

Este trabalho divulga algumas das atividades do Comitê Binacional Argentino-Brasileiro na IAPWS; apresenta informações abordando a formulação científica, IAPWS95; a formulação industrial, IAPWS-IF97; o lançamento de boletim suplementar das equações inversas para volume específico como função da pressão e temperatura para a Região 3 da IF97; referencia algumas rotinas em FORTRAN, bibliotecas de vínculos dinâmicos e suplementos para Excel que utilizam as formulações da IAPWS; e divulga o lançamento próximo de uma edição de uma Tabela de Propriedades nos idiomas espanhol e português.

2. Comitê Binacional Argentino-Brasileiro da IAPWS

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, o Instituto de Estudos Avançados, IEAv, do Centro Técnico Aeroespacial, CTA, o Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear da CNEN, CDTN, e muitas outras Instituições utilizam e desenvolvem programas que dependem do cálculo de propriedades da água. Uma necessidade específica sobre essas propriedades manifestada pelo CDTN originou a troca de comunicações que convergiu na reunião desses Institutos com o Delegado Nacional da Argentina na IAPWS, Dr. Horacio Corti, da Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA. Nessa reunião surgiu a proposta de se constituir um Comitê Binacional Argentina-Brasil, tornando o Brasil um dos membros plenos da IAWPS e consolidando a participação latino-americana na IAPWS. Após essa reunião o Brasil recebeu um convite para participar do encontro de 2001 da IAPWS, ocorrido entre os dias 9 e 14 de Setembro de 2001, em Gaithersburg, Washington DC. Nessa oportunidade o representante do Brasil, Dr. Benedito Dias Baptista Filho, enviado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico (Processo CNPq Número: 452208/01-7) ficou designado como coordenador do subcomitê brasileiro e o Brasil passou a ser um membro pleno em composição com a Argentina.

A partir desse evento o Brasil incrementou gradualmente sua participação junto com a Argentina e colaborou na organização do encontro de 2002, o “*IAPWS Annual Meeting and Symposium*” realizado em Buenos Aires, de 22 a 26 de Julho, no Centro Atômico Constituyentes da CNEA. Nesse encontro a participação do Brasil foi significativa, contando com a presença de quatro pesquisadores. Nesse encontro iniciaram duas atividades, a edição de uma Tabela de Propriedades da Água para uso Industrial nos idiomas espanhol e português e uma pesquisa sobre o uso de redes neurais artificiais para a aproximação de propriedades da água em regiões com muitas descontinuidades.

Um grupo de trabalho constituído por dois membros do Brasil e três da Argentina desenvolveu os programas para a geração das tabelas baseadas nas formulações da IF97 e a Tabela bilíngüe, com tabelas e gráficos das propriedades mais utilizadas na Indústria. Essa Tabela está na fase final de edição para impressão e espera-se que seja possível sua

divulgação a partir do encontro 2005 da IAPWS. Além de oferecer a descrição das propriedades e da formulação, a Tabela inclui todas as propriedades da IAPWS-IF97, em toda sua validade, contendo algumas propriedades adicionais como constante dielétrica, produto iônico, e outras, conforme detalha a Tabela 1. Para a edição foram desenvolvidos programas próprios uma vez que os programas disponíveis têm direitos reservados de uso.

A equipe que elaborou as tabelas foi constituída por dois pesquisadores da Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina, dois do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo, Brasil, um engenheiro da Central Puerto, Buenos Aires, Argentina e um pesquisador do Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina.

Tabela 1. Conteúdo da Edição Bilíngüe das Tabelas

Tabela	Conteúdo
Tabela 1	Propriedades de saturação (T)
Tabela 2	Propriedades de saturação (p)
Tabela 3	Propriedades do vapor superaquecido e líquido comprimido
Tabela 4	Propriedades do vapor a altas temperaturas
Tabela 5	Propriedades do vapor subresfriado metaestável
Tabela 6	Propriedades na região crítica
Tabela 7	Calor específico a pressão constante
Tabela 8	Calor específico a volume constante
Tabela 9	Velocidade do som
Tabela 10	Expoente isoentrópico
Tabela 11	Viscosidade
Tabela 12	Condutividade térmica
Tabela 13	Número de Prandtl
Tabela 14	Constante dielétrica estática
Tabela 15	Produto iônico

3. Formulação Científica – IAPWS95

A IAPWS oferece documentos livres na forma de “*Releases*”. A formulação do “Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use” é a mais precisa para os cálculos das propriedades da água para uso científico e geral. Detalhes sobre a formulação são dados nas referências [1] e [2]. A IAPWS95 foi desenvolvida para a mais ampla faixa de condições disponíveis quando o documento foi produzido, com as propriedades termodinâmicas válidas nas faixas: $T_F \leq T \leq 1273.15 \text{ K}$ e $p \leq 1000 \text{ MPa}$, onde T_F é a menor temperatura de fusão do gelo (na pressão de 209,9 MPa). Na região de fluido estável as propriedades podem ser extrapoladas para condições de pressão de até 100 GPa e temperaturas de até 5000 K. As propriedades de transporte [3] e [4] possuem outras faixas de validade definidas no release. Tabela 2 detalha as propriedades cobertas pelo release.

Na IAPWS95 a formulação é baseada numa equação fundamental para a energia livre específica de Helmholtz. Essa equação é expressa na forma adimensional: $\phi = f / (RT)$ e é separada em duas partes, uma para gás-ideal (ϕ^0) e outra parte residual (ϕ^r):

$$\frac{f(\rho, T)}{RT} = \phi(\delta, \tau) = \phi^0(\delta, \tau) + \phi^r(\delta, \tau), \quad (1)$$

onde $\delta = \rho/\rho_c$ e $\tau = T_c/T$ com: $T_c = 647,096$ K, $\rho_c = 322$ kg m⁻³ e $R = 0,461\ 518\ 05$ kJ kg⁻¹ K⁻¹

A parte *gás-ideal* (ϕ^0) da equação adimensional da energia livre de Helmholtz é obtida de uma equação para o calor específico isobárico no estado gás-ideal desenvolvida por J.R. Cooper [5]:

$$\phi^0 = \ln \delta + n_1^0 + n_2^0 \tau + n_3^0 \ln \tau + \sum_{i=4}^8 n_i^0 \ln \left[1 - e^{-\gamma_i^0 \tau} \right], \quad (2)$$

onde $\delta = \rho/\rho_c$ e $\tau = T_c/T$ com: $T_c = 647,096$ K e $\rho_c = 322$ kg m⁻³

Tabela 2. Propriedades e Unidades

Propriedade	Símbolo	Unidade
Propriedades Termodinâmicas		
Pressão	p	MPa
Temperatura	T	K
Densidade	ρ	kg m ⁻³
Volume específico	$v = 1/\rho$	m ³ kg ⁻¹
Entalpia específica	h	kJ kg ⁻¹
Entropia específica	s	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Calor Específico isobárico	cp	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Calor Específico isocórico	cv	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Velocidade do som	w	m s ⁻¹
Energia interna específica	u	kJ kg ⁻¹
Energia livre específica	$f = u - Ts$	kJ kg ⁻¹
Entalpia específica livre	$g = h - Ts$	kJ kg ⁻¹
Expoente isoentrópico	$\kappa = - (v/p)(\partial p/\partial v)_s$	
Fugacidade	f *	MPa
Coefficiente de contração isotérmica	$\delta T = (\partial h/\partial p)_T$	kJ kg ⁻¹ MPa ⁻¹
Segundo coeficiente virial	B	m ³ kg ⁻¹
Terceiro coeficiente virial	C	m ⁶ kg ⁻²
Coefficiente Joule-Thomson	$\mu = (\partial T/\partial p)_h$	K MPa ⁻¹
Propriedades de Transporte		
Viscosidade dinâmica	μ	N s m ⁻²
Viscosidade cinemática	ν	m ² s ⁻¹
Condutividade térmica	κ	W m ⁻¹ K ⁻¹

A parte residual (ϕ^r) da equação adimensional de Helmholtz é:

$$\phi^r = \sum_{i=1}^7 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{51} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{\epsilon_i}} + \sum_{i=52}^{54} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\alpha_i (\delta - \epsilon_i)^2 - \beta_i (\tau - \gamma_i)^2} + \sum_{i=55}^{56} n_i \Delta^{b_i} \delta \psi \quad (3)$$

com:

$$\Delta = \theta^2 + B_i [(\delta - 1)^2]^{a_i}$$

$$\theta = (1 - \tau) + A_i [(\delta - 1)^2]^{1/2\beta_i}$$

$$\psi = e^{-C_i(\delta-1)^2 - D_i(\tau-1)^2}$$

onde $\delta = \rho/\rho_c$ e $\tau = T/T_c$.

Todas as constantes da formulação são dadas no “release” da IAPWS. A formulação é precisa, porém a solução das equações é muito demandante, pois a equação de energia livre específica de Helmholtz é baseada na densidade e na temperatura, o que significa ser necessária uma solução iterativa.

4. Formulação Industrial – IAPWS IF97

A formulação das propriedades da água pela IAPWS-IF97, desenvolvida para uso geral e industrial é menos precisa e considera faixas de pressão e temperatura definidas nas 5 regiões da Fig. 1. Essa formulação desenvolvida por Cooper et al [6] pode ser obtida no site da IAPWS. As propriedades em cada uma dessas regiões são obtidas pela combinação de derivadas das equações de energia livre de Gibbs e de Helmholtz, equacionadas na forma de polinômios de ordens elevadas. Nas regiões onde se usa a equação de Gibbs a solução é rápida e direta, no entanto não pode ser utilizada na região 3, onde é necessária a utilização da equação de Helmholtz, como função da temperatura e densidade.

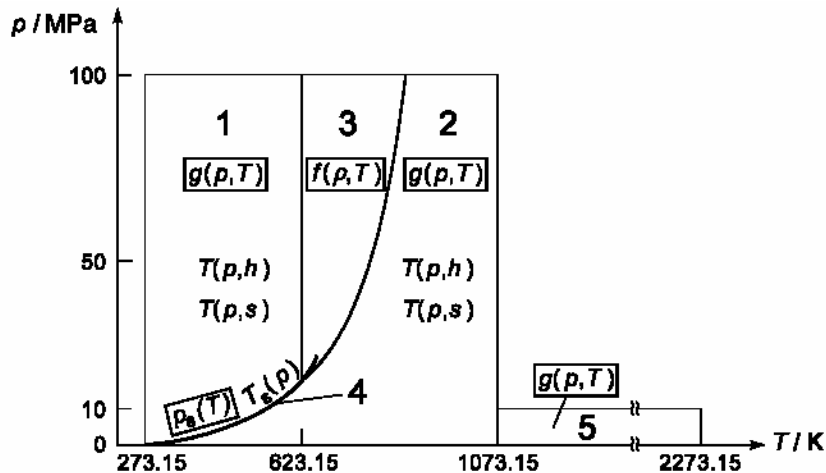


Figura 1. Divisão em 5 Regiões: IAPWS-IF97.

A **Região 1** corresponde à condição de *líquido sub-resfriado* até a temperatura de 623,15 K (350 °C). A **Região 2** corresponde à região de *vapor superaquecido* até a temperatura de 1073,15 K (800 °C), sendo separada da região 1 pela *linha de saturação*, e da Região 3 por uma fronteira definida por uma função do segundo grau, conhecida como **Equação-B23**.

A equação que descreve a linha de saturação é uma *equação quadrática implícita* que pode ser resolvida diretamente, tanto em relação à pressão de saturação p_s , quanto em relação à temperatura de saturação T_s :

$$\beta^2 \vartheta^2 + n_1 \beta^2 \vartheta + n_2 \beta^2 + n_3 \beta \vartheta^2 + n_4 \beta \vartheta + n_5 \beta + n_6 \vartheta^2 + n_7 \vartheta + n_8 = 0 \quad (4)$$

onde:

$$\beta = (p_s / p^*)^{1/4} \quad \text{e} \quad \vartheta = \frac{T_s}{T^*} + \frac{n_9}{(T_s / T^*) - n_{10}} ;$$

com $p^* = 1 \text{ MPa}$ e $T^* = 1 \text{ K}$; os coeficientes n_i são dados na Tabela A.1 do release.

A **Região 3** se inicia na temperatura de 623,15 K, (350 °C), engloba parte da linha de saturação e a região crítica. A **Região 4** é definida pela curva de coexistência líquido-vapor, a *linha de saturação*, que se estende até a temperatura crítica de 373,946 °C. A **Região 5** é definida como a região de vapor a alta temperatura, ou seja, de 1073,15 K (800°C) a 2273,15 K (2000°C). Essa região é limitada à pressão de 10 MPa. As caixas da Fig. 1 representam qual equação básica é utilizada em cada região:

- Equação Fundamental da Energia Livre Específica de Gibbs: $g(p, T)$;
- Equação Fundamental da Energia Livre Específica de Helmholtz: $f(\rho, T)$;
- Equação da Pressão de Saturação: $p_s(T)$; ou,
- Equação da Temperatura de Saturação: $T_s(p)$;

Em todas as regiões, as propriedades termodinâmicas: volume específico v , entalpia h , entropia s , etc.; são obtidas pela adequada manipulação e diferenciação das equações básicas de energia livre específica, como será detalhado adiante. Para propriedades com dimensões de energia como a entalpia e a entropia, apenas variações são importantes, por isso a escolha do *zero* é arbitrária. A formulação empregada utiliza a convenção de que ambas, a energia interna u (relacionada à entalpia por $h = u + p v$) e a entropia s têm o *zero* definido para o líquido saturado no ponto-tríplo de temperatura, ou seja, a 0,01 °C. Detalhes da formulação se encontram dados no release.

5. Boletim Suplementar em Equações Inversas para o Volume Específico

O “Supplementary Release on Backward Equations for Specific Volume as a Function of Pressure and Temperature $v(p, T)$ for Region 3 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam” será autorizado na reunião da IAPWS de 2005, na Grécia (não realizada no tempo da edição deste artigo). Nesse “release” as equações inversas de v como função de p e T para a região 3 são recomendadas como um suplemento

da IAPWS IF97 e ainda dos “releases” “Backward Equations for Pressure as a Function of Enthalpy and Entropy $p(h,s)$ for Regions 1 and 2” (IAPWS-IF97-S01) [3, 4], “Backward Equations for the Functions $T(p,h)$, $v(p,h)$, $T(p,s)$ e $v(p,s)$ for Region 3” (IAPWS-IF97-S03rev) [5, 6], e “Backward Equations $p(h,s)$ for Region 3, Equations as a Function of h and s for the Region Boundaries, and an Equation $T_{sat}(h,s)$ for Region 4” (IAPWS-IF97-S04) [7, 8]. Detalhes adicionais sobre as equações apresentadas nesse “release” são dados no artigo de H.-J. Kretzschmar et al. [9].

A equação que modela a região 3 da IAPWS-IF97 é equação de energia livre de Helmholtz $f(v, T)$. As propriedades são derivadas da equação básica como uma função do volume v e temperatura T . Contudo na maioria das aplicações a demanda é por propriedades como função de p e T . Desse modo é necessária solução iterativa de v a partir de p e T usando a função $p(v,T)$ derivada da equação básica da IF97, a equação de energia $f(v,T)$.

A solução apresentada no novo release dispensa o processo iterativo apresentando maior desempenho computacional, mesmo com o detrimento da complexidade pelo maior número de sub-regiões e constantes. O release mostra a introdução de 20 sub-regiões na região 3 para possibilitar a manutenção das especificações de precisão. Esse aumento no número de subdivisões significa mais constantes e operações de teste, no entanto o desempenho computacional aumentou substancialmente como comprovado nos testes de desempenho publicados no *Test Report of the Proposal of “Supplementary Release on Backward Equations for Specific Volume as a Function of Pressure and Temperature $v(p,T)$ for Region 3 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam” publicado em dezembro de 2004*. A Figura 2 mostra como passam a se combinar as equações da IF97 e todos os suplementos.

6. Softwares

Existem diversos softwares baseados nas formulações da IAPWS. A referência mais importante é da Faculdade de Mecânica da Universidade de Ruhr na Alemanha, desenvolvida pelo Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wagner [10], há mais de 25 anos na Cátedra de Termodinâmica na Ruhr-Universität Bochum. O Prof. Wagner e sua equipe desenvolveram muitos pacotes de softwares para cálculos de propriedades termodinâmicas para usuários da Indústria e da Pesquisa. Esses pacotes são customizados para cada campo individual de aplicação, tendo programas preparados tanto com a formulação científica IAPWS-95, quanto com a formulação Industrial IAPWS-IF97. O FLUIDCAL é um desses pacotes preparado para o cálculo das propriedades de um grande número de substâncias, na verdade mais de 60 substâncias. Uma das “personalizações” é o “pacote básico”, que integra as equações fundamentais em programas na base Windows. Esse pacote contém uma biblioteca de vínculos dinâmicos (DLL) com mais de 60 funções que permitem o cálculo das propriedades da água em todas as condições cobertas pela formulação, inclusive com suas derivadas. Esse pacote ainda contém um suplemento que integra a DLL ao Microsoft Excel e ao Visual Basic. Os softwares oferecidos pela Universidade de Ruhr estão especificados e podem ser obtidos do site: <http://www.ruhr-uni-bochum.de/thermo/>.

Software equivalente com interface modernizada e amigável pode ser adquirido também a partir do site do National Institute of Standards and Technology, NIST, do Departamento de Comércio dos Estados Unidos: <http://www.nist.gov/srd/nist10.htm>.

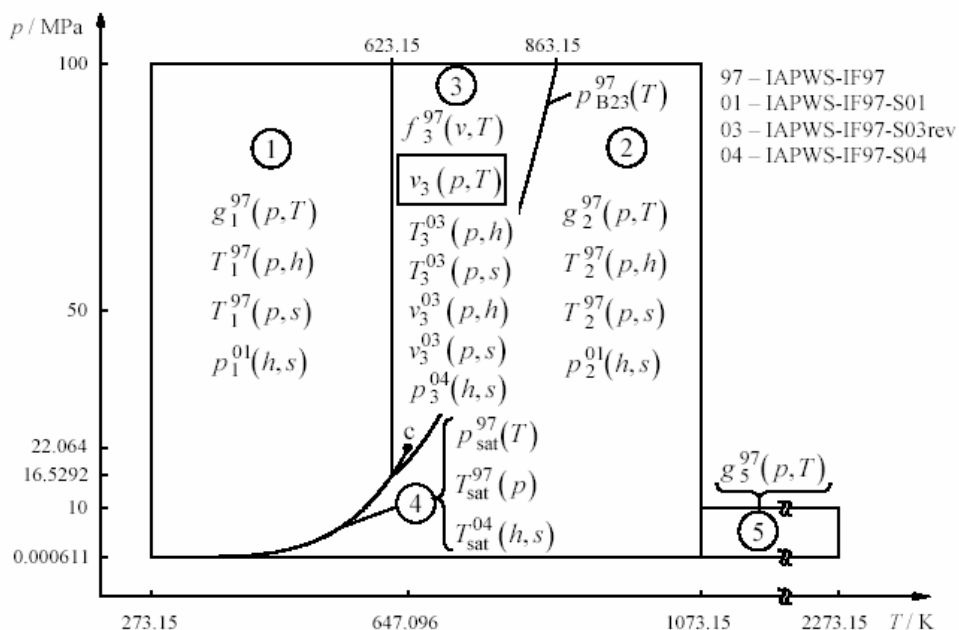


Figura 2. Regiões da IAPWS-IF97, IAPWS-IF97-S01, IAPWS-IF97-S03rev, IAPWS-IF97-S04, e as equações $v(p,T)$ do novo release.

Muitos programas como o EES, Engineering Equation Solver, da F-Chart Software (<http://fchart.com>), o RELAP5, e outros, possuem rotinas baseadas na IAPWS-95. Programas livres também são disponíveis. Um exemplo desses são os programas divulgados pela Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Divulgado pelo Prof. Dr. P.S. Schneider [11], esse pacote pode ser descarregado a partir do site da UFRGS: <http://www.geste.mecanica.ufrgs.br/eng03025/index.htm>.

7. Redes Neurais Artificiais para Aproximação das Propriedades na Região 3

Resultados iniciais de uma pesquisa [12] mostraram que pequenas redes neurais artificiais (RNA) alimentadas adiante e treinadas pelo algoritmo de retro-propagação podem representar, com precisão reduzida, 3 propriedades termodinâmicas da água (v , h e s) na faixa de pressão de 4MPa a 16MPa, e na faixa de temperatura de 150°C a 350°C. Mesmo nessas condições, apesar de expressivo desempenho computacional (não se considerando o esforço para o treinamento), a precisão ficou prejudicada, com apenas 83% dos pontos dentro de uma faixa de $\pm 0,5\%$, tendo pontos com incerteza superior a 4% (Fig. 3). Depois desses resultados novos testes, ampliando as faixas de pressão e temperatura, foram realizados na tentativa de englobar completamente a região 3. Os resultados completos dessa pesquisa ainda não estão disponíveis, porém as conclusões parciais mostram que o esforço computacional necessário no treinamento quase inviabiliza a utilização de RNA com retro-propagação. Mesmo após 50 milhões de épocas de treinamento redes de até quatro camadas não atingem os requisitos de precisão necessários, principalmente pelo grande número de descontinuidades próximas ao ponto crítico da água. Nesses casos, conforme evolui o treinamento, é necessário reduzir cada

vez mais a taxa de aprendizado, atingindo valores da ordem de 10^{-9} , o que dificulta atingir a tolerância para todos os dados do universo de treinamento. Fig. 4 mostra as incertezas para o volume específico após 40 milhões de épocas de treinamento.

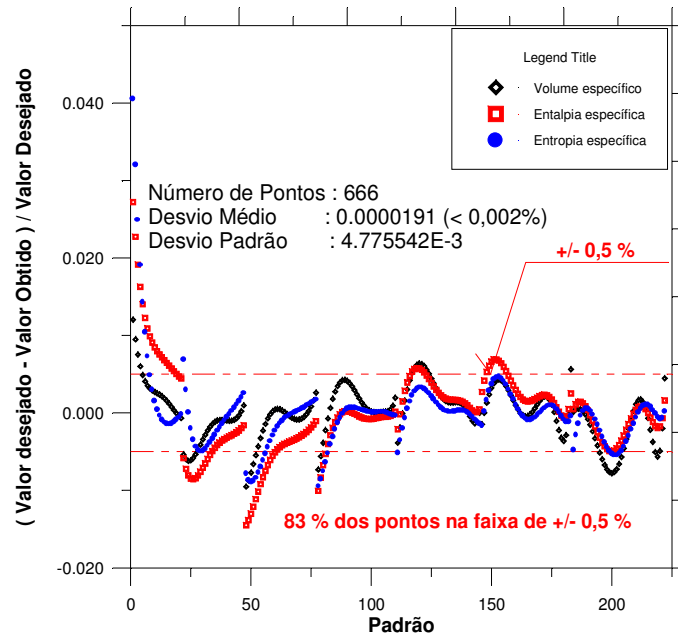


Figura 3. Incertezas para uma rede com 3 camadas e 53 unidades.

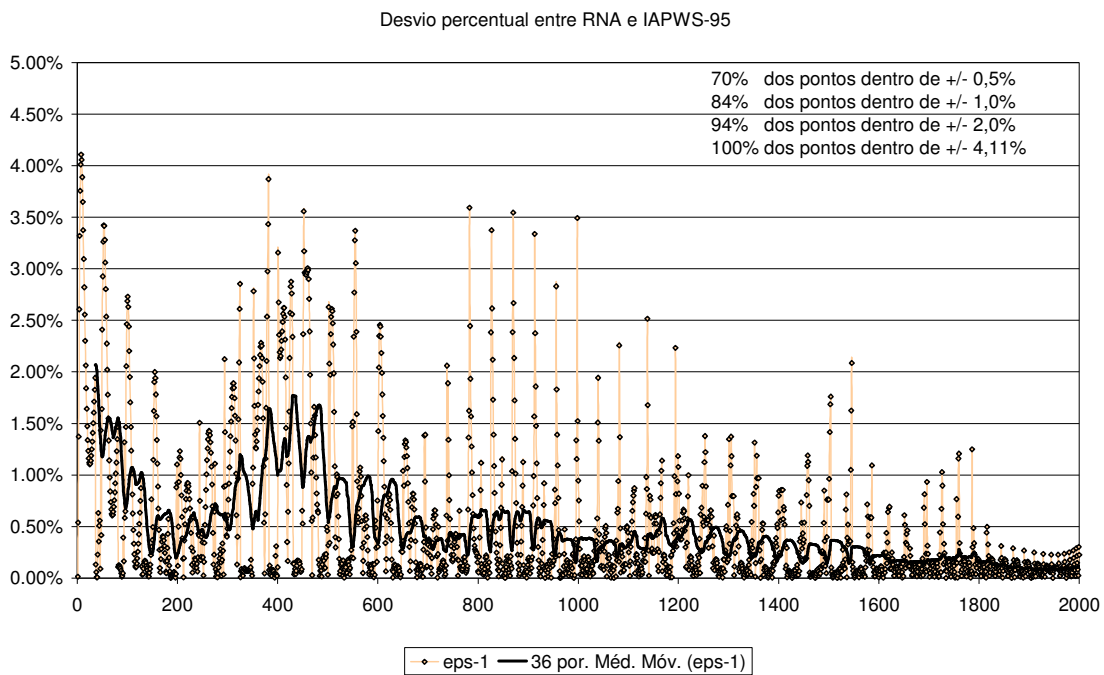


Figura 4. Incertezas para 2000 pontos do volume específico para uma rede com 4 camadas: 8-8-8-1.

A pesquisa realizada com as redes neurais artificiais está em progresso, mas até o momento tem mostrado que o uso de redes alimentadas adiante treinadas com o algoritmo de retro-propagação não apresenta vantagens quanto a simplificação em termos de constantes armazenadas, demandando excessivo tempo de treinamento e não atingindo a precisão necessária em faixas muito amplas de pressão e temperatura.

8. CONCLUSÕES

Apesar do significativo histórico na pesquisa de propriedades da água e da extensa bibliografia sobre o assunto, sempre surgem novas necessidades que mantêm indústrias e instituições de pesquisa nessa atividade. As novas necessidades têm aproximado, cada vez mais, os requisitos da indústria aos requisitos das aplicações científicas. Requisitos de precisão e tempo de computação têm motivado modificações em programas e métodos, enquanto requisitos decorrentes de novas aplicações como as de sistemas supercríticos ou de estudo de componentes trabalhando com vapor meta-estável têm demandado pesquisa. Novas condições como as envolvidas em processos como os da fusão nuclear poderão exigir mais pesquisa ainda. Todas essas demandas têm mantido a atividade da “*the International Association for the Properties of Water and Steam*”, a IAPWS, uma associação internacional sem fins lucrativos voltada exclusivamente para essa missão.

Neste trabalho divulgamos algumas das atividades de um Comitê Binacional Argentino-Brasileiro que é membro da IAPWS. Anunciamos a edição de uma Tabela de Propriedades nos idiomas espanhol e português a ser publicada provavelmente antes do final de 2005. Apresentamos algumas informações sobre a formulação científica, IAPWS95, e a formulação industrial, IF97; sobre as equações inversas disponíveis; e, sobre o lançamento de um suplemento das equações inversas para volume específico como função da pressão e temperatura para a região 3 da IF97. Relatamos o estágio de pesquisas sobre o uso de redes neurais artificiais para aproximação de propriedades e, finalmente, listamos algumas referências sobre rotinas em FORTRAN, bibliotecas de vínculos dinâmicos e suplementos para Excel, úteis para todos que precisam de cálculos das propriedades da água.

ACKNOWLEDGMENTS

O autor agradece o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, e à Gerência do Centro de Engenharia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear pelo contínuo apoio financeiro e logístico para a viabilização do consórcio com a Comisión Nacional de Energía Atómica e a constituição do Comitê Binacional Argentino-Brasileiro.

REFERENCES

1. Wagner, W., Pruß, A., “The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **V. 31**, pp.387-535 (2002).
2. The International Association for the Properties of Water and Steam, “Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water

- Substance for General and Scientific Use”, Release Approved during the IAPWS Meeting at Fredericia, Denmark, September 1996.
3. Sengers, J.V., Kamgar-Parsi, B.: Representative equations for the viscosity of water substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 13 (1984), 185 – 205.
 4. Sengers, J.V., Watson, J.T.R., Basu, R.S., Kamgar-Parsi, B., Hendricks, R.C.: Representative equations for the thermal conductivity of water substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 13 (1984), 893 – 933.
 5. J. R. Cooper, *Int. J. Thermophys.* 3, 35 (1982).
 6. The International Association for the Properties of Water and Steam, “Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam,” Erlangen, Germany, September 1997.
 7. International Association for the Properties of Water and Steam, “Supplementary Release on Backward Equations for Pressure as a Function of Enthalpy and Entropy $p(h,s)$ to the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam,” IAPWS, Secretariat, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA , 2001.
 8. International Association for the Properties of Water and Steam, Supplementary Release on Backward Equations $p(h,s)$ for Region 3, Equations as a Function of h and s for the Region Boundaries, and an Equation $T_{sat}(h,s)$ for Region 4 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, IAPWS Secretariat, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA , 2004.
 9. Kretzschmar, H.-J., et al, “Supplementary Backward Equations for Pressure as a Function of Enthalpy and Entropy $p(h,s)$ to the Industrial Formulation IAPWS-IF97 for Water and Steam”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*.
 10. Wagner, W., “Description of the Source Code and Dynamic Link Library for the Calculation of Thermodynamic and Transport Properties of Water (IAPWS-95)”, at the site of the Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Thermodynamik, Fakultät für Maschinenbau, <http://www.ruhr-uni-bochum.de/thermo>, Nov. 2002.
 11. Fonseca Jr, J.G. e Schneider, P.S., 2004. Comparative Analsis of the IAPWS97 Formulation Performance for Thermodynamics Properties of Water on a Rankine Cycle, *Revista de Engenharia Térmica - RETERM*.
 12. Baptista F., B.D. “Correlação de Propriedades Termodinâmicas da Água Utilizando Redes Neurais Artificiais”. *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, Brasil, v. 4, n. 2, p. 291-296, 2002.