



AUTORES AUTHORS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS		AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY Marco Antonio Raupp Diretor Geral
	AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR Walter Gill Walter Gill	DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION ☐ INTERNA / INTERNAL ☒ EXTERNA / EXTERNAL ☐ RESTRITA / RESTRICTED	REVISADA POR/REVIEWED BY Wilson F. N. dos Santos

CDU/UDC 536.7	DATA / DATE Dez. 1. 1986
------------------	-----------------------------

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICAÇÃO NO INPE-4077-RPE/529	ORIGEM ORIGIN DEN
	PROGRAMA DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS.	PROJETO PROJECT SOLAR
AUTORES/AUTHORSHIP	WALTER GILL FERNANDO FACHINI FILHO RONALDO RIBEIRO DE OLIVEIRA	Nº DE PAG. NO OF PAGES 23
		ULTIMA PAG. LAST PAGE A. 6
		VERSÃO VERSION
		Nº DE MAPAS NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Este trabalho visa reproduzir dados tabelados das propriedades termodinâmicas de uma substância pura através de um programa utilizando dados de referência, equação de estado de Beattie-Bridgeman na forma virial, equação da pressão de saturação, equação de calor específico à pressão constante ou a volume constante e equação do volume específico ou densidade do líquido comprimido. Estes mesmos dados poderão ser obtidos para as regiões de líquido saturado, vapor saturado e vapor superaquecido.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Este trabalho foi apresentado no Seminário da Associação dos Docentes da Universidade Estadual Paulista (ADUNESP).

ABSTRACT

This work deals with the determination of the thermodynamic properties through the basic equations as: state equation (Beattie - Bridgeman Form), saturation pressure equation, specific heat constant pressure or constant volume equation, and specific volume or density of liquid equation.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE SÍMBOLOS	v
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	1
3 - CONCLUSÃO	6
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9
APÊNDICE A - FLUXOGRAMA	

LISTA DE SÍMBOLOS

a	- Constante da equação de estado de Beattie-Bridgeman	
A_0	- Constante da equação de estado de Beattie-Bridgeman	
b	- Constante da equação de estado de Beattie-Bridgeman	
B_0	- Constante da equação de estado de Beattie-Bridgeman	
c	- Constante da equação de estado de Beattie-Bridgeman	
C_p	- Calor específico a pressão constante	
C_v	- Calor específico a volume constante	
d	- Densidade específica, m^3/kg ou pe^3/lbm	
D_1, D_2, D_3, D_4	- Constante de ajuste da equação da pressão de saturação	
h	- Entalpia, joule/kg ou BTU/lbm	
L_0, L_1, L_2, L_3, L_4	- Constante de ajuste da equação do volume ou densidade específica	
M_w	- Peso molecular, kg-mol ou lbm-mol	
P	- Pressão, N/m^2 ou lbf/pol ²	
R	- Constante universal dos gases, 8314 J/ ⁰ K . kg-mol	
$\bar{R}$	- Constante específica do gás, R/M_w	
S	- Entropia, joule/ ⁰ K . kg ou BTU/ ⁰ R . lbm	
t	- Temperatura, ⁰ F	
T	- Temperatura, ⁰ R ou ⁰ K	
u	- Energia interna, joule/kg ou BTU/lbm	
v	- Volume específico, m^3/kg ou pe^3/lbm	
β	- Constante de ajuste da equação de estado de Beattie-Bridgeman, definida em (15)	de
γ	- Constante de ajuste da equação de estado de Beattie-Bridgeman, definida em (16)	de
δ	- Constante de ajuste da equação de estado de Beattie-Bridgeman, definida em (17)	de

Símbolos Inferiores

- S - Estado de saturação
- v - Processo a volume constante

1 - INTRODUÇÃO

Para conhecer as propriedades termodinâmicas de um determinado estado, dispõe-se de "tabelas" nas quais, na maioria dos casos, é preciso realizar interpolações para determinar os valores intermediários aos tabelados, atribuindo erros a eles. Outro método é o "analítico", o qual será usado no desenvolvimento deste trabalho.

Primeiro toma-se um ponto de referência, onde se conhece ou se adota valores para as propriedades. Depois, fazendo uso das equações básicas de variação das propriedades (Van Wylen, 1976), obtêm-se as propriedades para o ponto desejado.

2 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Trabalha-se com variações das propriedades termodinâmicas. Logo, o ponto de referência pode ser adotado como zero ou, caso se tenha o valor da propriedade, retirado de uma certa tabela para este ponto. Obtêm-se, então, valores tabelados para as propriedades desejadas.

Neste trabalho, toma-se o ponto de referência (ponto 1 - ver Figura 1) sobre a linha de líquido saturado à mesma pressão na qual se conhece a equação, ou valor de calor específico a pressão constante (C_p).

O mesmo ponto é adotado quando se trabalha com calor específico a volume constante.

A variação das propriedades ENTALPIA e ENERGIA INTERNA entre os pontos 1 e 2 (ver Figura) é obtida com o uso da Equação de Clapeyron dada por:

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{h_{12}}{T (v_2 - v_1)} \quad (1)$$

E a energia interna $\tilde{e}$:

$$u_{12} = h_{12} - P_1 (v_2 - v_1) \quad (5)$$

Para determinar a variação das propriedades na região de vapor superaquecido utilizam-se dois processos: PRESSÃO ou VOLUME e TEMPERATURA CONSTANTES.

À pressão constante tem-se

$$h_{23'} = \int_2^{3'} C_p dT, \quad (6)$$

onde:

$$C_p = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4, \quad (7)$$

$$S_{23'} = \int_2^{3'} \frac{C_p}{T} dT, \quad (8)$$

$$u_{23'} = h_{23'} - P_1 (v_{3'} - v_2), \quad (9)$$

A volume constante tem-se:

$$u_{23} = \int_2^3 C_v dT, \quad (10)$$

onde:

$$C_v = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4, \quad (11)$$

$$S_{23} = \int_2^3 \frac{C_v}{T} dT \quad (12)$$

e, naturalmente

$$h_{23} = u_{23} + P_1(v_3 - v_2) . \quad (13)$$

E para o processo à temperatura constante tem-se, devido à forma da equação de estado de Beattie -Bridgeman na forma virial dada por:

$$P = \frac{RT}{v} + \frac{\beta}{v^2} + \frac{\gamma}{v^3} + \frac{\delta}{v^4} , \quad (14)$$

onde:

$$\beta = B_0 RT - A_0 - \frac{cR}{T^2} , \quad (15)$$

$$\gamma = B_0 bRT + A_0 a - B_0 \frac{cR}{T^2} , \quad (16)$$

$$\delta = B_0 bc \frac{R}{T^2} , \quad (17)$$

que a integração torna-se analítica quando se tomam $u = u(T, v)$ e $S = S(T, v)$.

Têm-se então:

$$u_{34} = \int_3^4 \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv \quad (18)$$

$$S_{34} = \int_3^4 \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv \quad (19)$$

e:

$$h_{34} = u_{34} + P_4 v_4 - P_3 v_3 . \quad (20)$$

O ponto 3 ou 3' deve se situar na região de vapor superaquecido, cujo limite é sobre a linha de vapor saturado. Tem-se, então, para as propriedades em 4:

$$h_4 = h_1 + h_{12} + h_{23} + h_{34} \quad (21)$$

$$S_4 = S_1 + S_{12} + S_{23} + S_{34}, \quad (22)$$

$$u_4 = u_1 + u_{12} + u_{23} + u_{34} . \quad (23)$$

Quando o ponto do qual se deseja o estado termodinâmico for líquido saturado (ponto 5, p. ex.), usa-se novamente a equação de Clapeyron para fazer o salto de um lado para o outro da curva de saturação.

Quando o ponto desejado se encontrar na região de saturação, é necessário saber o seu título para determinar as suas propriedades.

Para a região de líquido comprimido, é bastante satisfatória a aproximação das propriedades para as de líquido saturado.

Exemplo de aplicação: este programa está sendo usado para o cálculo do rendimento de ciclos motores, onde o fluido de trabalho é o FREON 11. Para tal substância têm-se (em unidades inglesas):

1) pressão de vapor:

$$\log_{10} P = 39,0481 - \frac{4147,11}{T} - 11,7406 \log_{10} T + 0.0035694T ;$$

2) equação de estado (Beattie-Bridgeman):

$$P = (0,1488 - 0,0001746T) d^3 + (0,005211T - 6,586) d^2 + 0,7812Td$$

onde: d = densidade = $1/v$;

3) densidade do líquido:

$$d_l = 98,266 - 0,07631t - 0,0000443t^2 \quad ; \quad -20^{\circ}\text{F} < t < 140^{\circ}\text{F},$$

$$d_l = 96,696 - 0,05423t - 0,0001237t^2 \quad ; \quad 140^{\circ}\text{F} < t < 260^{\circ}\text{F};$$

4) calor específico à pressão constante:

$$C_p = 0,1267 + 0,000097t \quad (\text{a } 1 \text{ atm})$$

para:

$$1000^{\circ}\text{F} < t < 275^{\circ}\text{F}$$

Ver Benning , 1938.

3 - CONCLUSÃO

Para o exemplo de utilização, têm-se os seguintes dados comparativos:

Para:

$$T = 609,60\text{R}$$

e

$$P = 52,85 \text{ lbf/pol}^2$$

o programa informa:

REGIÃO SATURADA

VAPOR SATURADO

$$h = 109,9825 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}}$$

$$S = 0,192698 \frac{\text{BTU}}{^{\circ}\text{R lbm}}$$

$$u = 101,9249 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}}$$

$$v = 0,823710 \frac{\text{pē}^3}{\text{lbm}}$$

LÍQUIDO SATURADO

$$h = 39,0509 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}}$$

$$S = 0,076341 \frac{\text{BTU}}{^{\circ}\text{R lbm}}$$

$$u = - 3,8659 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}}$$

$$v = 0,011657 \frac{\text{pē}^3}{\text{lbm}}$$

E de acordo com a tabela fornecida por
(1938), têm-se:

Benning

REGIÃO SATURADA

VAPOR SATURADO

$$v = 0,8240 \text{ pēs}^3/\text{lbm}$$

$$h = 110,02 \text{ BTU/lbm}$$

$$S = 0,1927 \text{ BTU}/^{\circ}\text{R lbm}$$

LÍQUIDO SATURADO

$$v = 0,01166 \text{ pē}^3/\text{lbm}$$

$$h = 39,02 \text{ BTU/lbm}$$

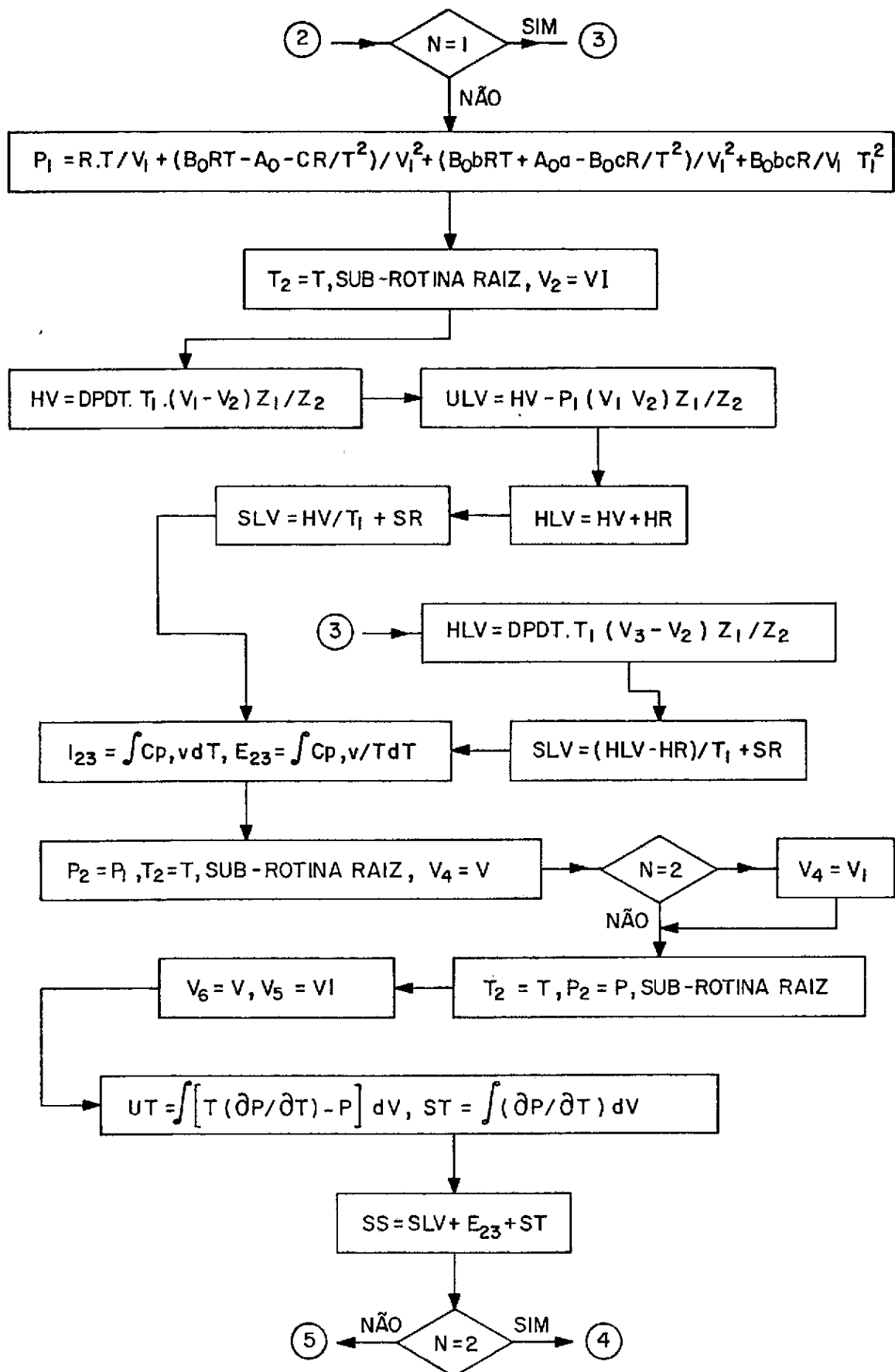
$$S = 0,0763 \text{ BTU}/^{\circ}\text{R lbm}$$

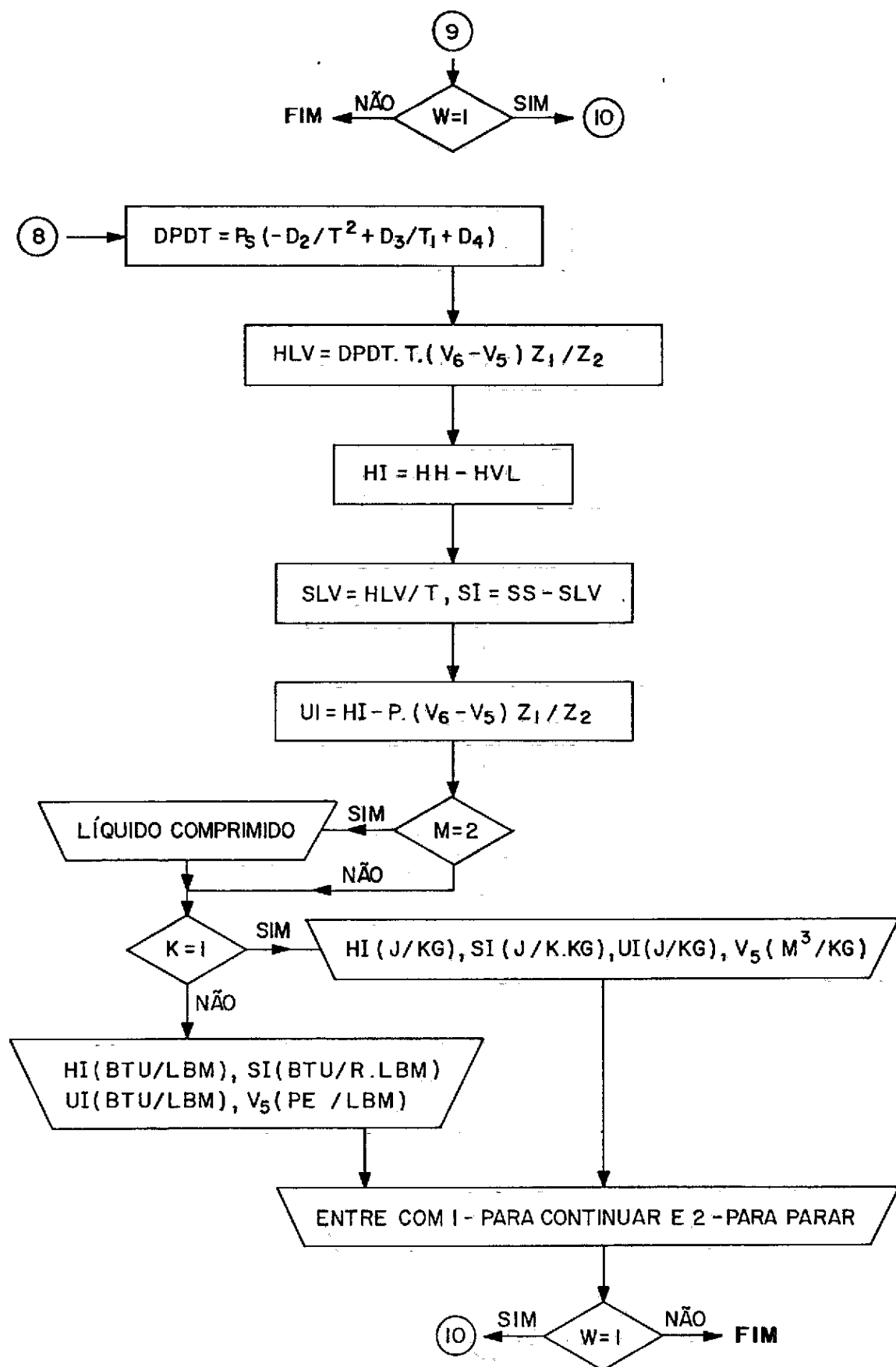
Vê-se então que o resultado obtido pelo programa é ótimo.

Este programa está sendo melhorado com o acréscimo de um arquivo de dados, no qual ter-se-ão os dados e as referências necessárias para várias substâncias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENNING, A.F.; MCHARNESS, R.C. *Thermodynamic properties of "freon-11" trichloromonofluoromethane CCl₃F, with addition de other physical properties.* Wilmington, Du Pont, 1938.
- VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E. *Fundamentos da termodinâmica clássica.* 2 ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1976. Cap. 10.





PROPOSTA PARA PUBLICAÇÃO

DATA
28.10.86.

IDENTIFICAÇÃO	TÍTULO	
	PROGRAMA DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
	AUTORIA	PROJETO/PROGRAMA
	WALTER GILL FERNANDO FACHINI FILHO RONALDO RIBEIRO DE OLIVEIRA	SOLAR
		DIVISÃO
		-
		DEPARTAMENTO
		DEN
DIVULGAÇÃO ☒ EXTERNA ☐ INTERNA MEIO: COM LTRPEL. Relatores da Pesquisa Externa		

REVISÃO TÉCNICA	REVISOR TÉCNICO	APROVADO: ☐ SIM ☐ NÃO ☐ VER VERSO	APROVAÇÕES
	<i>Wilson Fernando N. das S. S. S.</i>	DATA CHEFE DIVISÃO	
	RECEBI EM: REVISADO EM:	APROVADO: ☒ SIM ☐ NÃO ☐ VER VERSO	
	OBSERVAÇÕES: ☒ NÃO HÁ ☐ VER VERSO	17/12/86 <i>João A. Carneiro</i>	
	DEVOLVI EM: ASSINATURA	DATA CHEFE DEPARTAMENTO	

REVISÃO DE LINGUAGEM	Nº: 420	PRIORIDADE: 1	DATILOGRAFIA
	DATA: 29.10.86	O(S) AUTOR(ES) DEVE(M) MENCIONAR NO VERSO, OU ANEXAR NORMAS E/OU INSTRUÇÕES ESPECIAIS	
	REVISADO ☐ COM ☐ SEM	RECEBIDO EM:	
	CORREÇÕES ☐ VER VERSO	CONCLUÍDO EM:	
	POR: <i>Mário do Carmo S. S. S.</i>	DATILÓGRAFA: <i>Vânia A. Azevedo</i>	
	4-11-86 DATA ASSINATURA	ASSINATURA	

PARECER		DATA	RESPONSÁVEL/PROGRAMA
FAVORÁVEL: ☐ SIM ☐ NÃO	☐ VER VERSO		

EM CONDIÇÕES DE PUBLICAÇÃO EM: 17/12/86	<i>Walter Gill</i>
	AUTOR RESPONSÁVEL

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO: ☐ SIM ☐ NÃO	
DIVULGAÇÃO ☐ INTERNA ☐ EXTERNA	MEIO:
OBSERVAÇÕES:	
DATA	DIRETOR

SEC	PUBLICAÇÃO: 9277KPB/524	PÁGINAS:	ÚLTIMA PÁGINA:
	CÓPIAS:	TIPO:	PREÇO: