

APÊNDICE

SUMÁRIO

A1 - FATORES DE CONVERSÃO DE UNIDADES.....	2
A2 - FATOR DE CORREÇÃO DA MLDT - F_T	3
A3 - PROPRIEDADES FÍSICAS - EQUAÇÕES.....	4
Condutividade térmica de líquidos.....	6
Condutividade térmica de vapores (em baixa pressão, correção para alta pressão no A5)....	7
Massa específica de líquidos.....	8
Massa específica de vapores.....	9
Calor específico de líquidos.....	10
Calor específico de vapores (em baixa pressão, correção para alta pressão no A5).....	11
Viscosidade de líquidos.....	12
Viscosidade de vapores (em baixa pressão, correção para alta pressão no A5).....	13
Calor latente de vaporização.....	14
Tensão superficial.....	15
Pressão de vapor.....	16
A4 - PROPRIEDADES FÍSICAS DE FRAÇÕES DO PETRÓLEO (HIDROCARBONETOS)	17
A5 – CORREÇÃO DEVIDO À PRESSÃO PARA PROPRIEDADES FÍSICAS DE GASES E VAPORES.....	22
A6 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA DO MAR.....	24
A7 – NÚMERO DE TUBOS NO ESPELHO.....	26
A8 – TUBOS PARA TROCADORES DE CALOR.....	30
A9 – DIMENSÕES DOS TUBOS DE AÇO (IPS).....	31
REFERÊNCIAS:.....	32

A1 - FATORES DE CONVERSÃO DE UNIDADES

	Para converter de	em	multiplique por
C_p	$BTU/lb.^{\circ}F$	$kJ/kg.^{\circ}C$	4,1858
k	$BTU/h.ft^2.^{\circ}F$	$W/m.^{\circ}C$	1,73
ρ	lb/ft^3	kg/m^3	16,02
μ	Cp	$lb/h.ft$	2,42
μ	$lb/h.ft$	$kg/m.s$	$4,13 \times 10^{-4}$
h, U	$BTU/h.ft^2.^{\circ}F$	$W/m^2.^{\circ}C$	5,68
Rd	$h.ft^2.^{\circ}F/BTU$	$m^2.^{\circ}C/W$	0,18

A2 - FATOR DE CORREÇÃO DA MLDT - F_T

Fator de correção da MLDT (F_T) para trocadores de calor com casco tipo E, e 2, 4, 6, ..., 2n passagens nos tubos por casco. O método analítico apresenta incerteza de $\pm 2\%$.

$$F_T = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \ln \left[\frac{1 - P}{1 - R \cdot P} \right]}{(R - 1) \ln \left[\frac{2 - P(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \right]}$$

onde o fator de capacidade, R , é definido como:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

A efetividade P é calculada pela equação:

$$P = \frac{1 - X^{1/N_{casco}}}{R - X^{1/N_{casco}}}$$

desde que $R \neq 1$. Onde:

$$P_o = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

e

$$X = \frac{P_o \cdot R - 1}{P_o - 1}$$

No caso em que $R=1$, a efetividade é calculada por:

$$P = \frac{P_o}{N_{casco} - P_o \cdot (N_{casco} - 1)}$$

sendo o fator de correção da MLDT (F_T) dado por

$$F_T = \frac{2P}{\sqrt{2}(1 - P) \ln \left[\frac{2 - P(2 - \sqrt{2})}{2 - P(2 + \sqrt{2})} \right]}$$

A3 - PROPRIEDADES FÍSICAS - EQUAÇÕES

As propriedades físicas dos fluidos podem ser calculadas com auxílio das equações e constantes apresentadas nas tabelas A3.1 a A3.12, respeitando os limites de aplicação (Tabela A3.1).

Tabela A3.1 – Faixa de temperatura de aplicação das equações.

Fluido	T mín (°F)	T máx (°F)
Acetato de etila	170	482
Acetileno	-113	95
Acetona	60	440
Ácido acético	244	610
Água	35	719
Amônia	-28	260
Anilina	363	798
Ar	0	1500
Benzeno	68	392
Butanol	243	546
Decanol	-24	650
Etano	-183	86
Etanol	172	463
Etileno Glycol	10	639
Freon 11	80	360
Freon 113	35	430
Freon 114	-58	211
Freon 12	-21	197
Freon 21	80	320
Freon 22	-23	179
Glicerina	70	257
i-butano	-3	158
i-Propanol	60	470
Isobutanol	211	229
Isopentano	0	113
Metano	0	1500
Metanol	148	461
n-butano	-75	140
n-Heptano	60	530
n-Hexano	32	320
n-Octano	-3	320
n-Pentano	60	420
Octanol	24	650
Propano	-147	176
Propanol	260	322
Propileno Glycol	66	85
Propileno	-111	176
Tolueno	32	392

Tabela A3.2 – Propriedades críticas e massa molecular

Fluido	Temperatura crítica (R)	Pressão crítica (psia)	Massa molecular
Acetato de etila	941,8	555,9	88,1
Acetileno	555,7	905,3	26,04
Acetona	916,4	690	58,08
Ácido acético	1070,6	840	60,05
Água	1165,2	3208,2	18,02
Amônia	730	1637,9	17,03
Anilina	1258,2	769,1	93,06
Ar	238,3	546,8	28,96
Benzeno	1012	714	78,11
Butanol	1010,1	719,6	74,12
Decanol	1248	367,4	158,28
Etano	550,1	709,8	30,07
Etanol	929,3	927,1	46,1
Etileno Glycol	1170	1120	62,07
Freon 11	848,2	635	137,4
Freon 113	877,2	495	187,39
Freon 114	753,7	458,6	170,92
Freon 12	692,6	599,5	120,92
Freon 21	812,3	751,2	102,92
Freon 22	664,7	723,4	86,48
Glicerina	1305	965	92,09
i-butano	735	529	58,12
i-Propanol	914,8	690	60,09
Isobutanol	990	623	74,12
Isopentano	828,4	490,1	72,15
Metano	344,2	673,1	16,04
Metanol	923,7	1153,4	32
n-butano	765,6	550,7	58,12
n-Heptano	972,3	396,8	100,2
n-Hexano	914,1	440	86,17
n-Octano	1024	362	114,2
n-Pentano	845,2	489,5	72,15
Octanol	1184,7	424,7	130,23
Propano	666,2	617,4	44,09
Propanol	965,9	749	60,09
Propileno Glycol	1123,2	884	76,1
Propileno	657,4	667	42,08
Tolueno	1069	610	92,13

Condutividade térmica de líquidos

$$k_l = A + B(1 - T_r)^{2/3} + CT \quad (\text{A3.1})$$

onde:

 $k_l = \text{condutividade térmica em } BTU/h.ft.^{\circ}F$
 $T = \text{temperatura em } R.$
 $T_r = \text{temperatura reduzida. } T/T_c$

Tabela A3.3 – Constantes para a equação A3.1

Fluido	A	B	C
Acetato de etila	2,882000E-02	8,890000E-02	0,0
Acetileno	1,959000E-02	2,222000E-02	0,0
Acetona	1,511200E-01	2,968000E-02	-1,404200E-04
Ácido acético	4,949000E-02	7,987000E-02	0,0
Água	-1,422740E+00	1,620400E+00	1,325010E-03
Amônia	1,050900E-01	4,399200E-01	0,0
Anilina	4,865000E-02	8,481100E-01	0,0
Ar			
Benzeno	1,690000E-02	1,126700E-01	0,0
Butanol	3,491000E-02	8,664000E-02	0,0
Decanol	4,155000E-02	7,141000E-02	0,0
Etano	1,820000E-02	1,213300E-01	0,0
Etanol	5,356000E-02	8,338000E-02	0,0
Etileno Glycol	-6,510000E-03	1,265700E-01	1,321400E-04
Freon 11	3,285000E-02	4,861000E-02	0,0
Freon 113	9,400000E-02	6,266700E-01	0,0
Freon 114	2,863000E-02	4,273000E-02	0,0
Freon 12	9,140000E-03	8,663000E-02	0,0
Freon 21	2,621000E-02	7,417000E-02	0,0
Freon 22	1,376000E-02	1,069700E-01	0,0
Glicerina	2,333000E-01	-1,019000E-01	0,0
i-butano	1,440000E-02	9,600000E-02	0,0
i-Propanol	4,437000E-02	7,848000E-02	-1,626000E-05
Isobutanol	5,583000E-02	5,909000E-02	0,0
Isopentano	1,022000E-02	1,027000E-01	0,0
Metano	2,912000E-02	1,403000E-01	0,0
Metanol	7,814000E-02	6,347000E-02	0,0
n-butano	1,670000E-02	1,113300E-01	0,0
n-Heptano	1,470000E-02	9,800000E-02	0,0
n-Hexano	1,436000E-02	9,573000E-02	0,0
n-Octano	1,461000E-02	9,740000E-02	0,0
n-Pentano	1,540000E-02	1,026700E-01	0,0
Octanol	1,107700E-01	-4,369000E-05	0,0
Propano	1,740000E-02	1,160000E-01	0,0
Propanol	5,577000E-02	5,646000E-02	0,0
Propileno Glycol	2,026000E-02	1,576000E-01	0,0
Propylene	1,900000E-02	1,266700E-01	0,0
Tolueno	1,505000E-02	1,003300E-01	0,0

Condutividade térmica de vapores (em baixa pressão, correção para alta pressão no A5)

$$k_v = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (\text{A3.2})$$

onde:

 $k_v = \text{condutividade térmica em } \frac{\text{BTU}}{\text{h.ft.}^\circ \text{F}}$
 $T = \text{temperatura em } R.$

Tabela A3.4 – Constantes para a equação A3.2

Fluido	A	B	C	D
Acetato de etila	-2,193020E-01	9,466370E-04	-1,326450E-06	6,341510E-10
Acetileno	-5,363340E-02	4,182890E-04	-1,025440E-06	9,182029E-10
Acetona	-9,180000E-04	3,530000E-06	1,930000E-08	0,0
Ácido acético	-5,093200E-01	2,006760E-03	-2,589000E-06	1,124440E-09
Água	1,190000E-03	1,200000E-05	1,080000E-08	0,0
Amônia	-3,435480E-01	2,037880E-03	-3,932340E-06	2,573960E-09
Anilina	-6,141160E-01	1,876810E-03	-1,877110E-06	6,339910E-10
Ar	3,752700E-04	3,013600E-05	-5,110300E-09	0,0
Benzeno	-1,418600E-03	5,289000E-06	1,971000E-08	0,0
Butanol	-5,647200E+00	2,018950E-02	-2,385280E-05	9,343820E-09
Decanol	8,100200E-03	-4,212000E-05	8,408000E-08	-3,056000E-11
Etano	-7,356600E-03	3,622100E-05	8,901800E-10	0,0
Etanol	-1,235300E-01	5,764930E-04	-8,479470E-07	4,348380E-10
Etileno Glycol	2,224100E-04	4,352700E-06	1,445310E-08	0,0
Freon 11	-2,075000E-02	9,878000E-05	-1,264000E-07	6,423000E-11
Freon 113	-8,229700E-03	4,371900E-05	-5,629060E-08	3,442000E-11
Freon 114	-1,784000E-02	1,057000E-04	-1,767000E-07	1,190000E-10
Freon 12	8,695620E-03	-4,579540E-05	1,057760E-07	-5,847630E-11
Freon 21	2,216000E-02	-1,029000E-04	1,800000E-07	-8,583000E-11
Freon 22	-5,178150E-02	3,192990E-04	-6,323580E-07	4,473630E-10
Glicerina	-6,169000E-03	2,820000E-05	-1,278000E-08	8,970000E-12
i-butano	-1,570100E-03	8,579000E-06	2,308700E-08	0,0
i-Propanol	-1,180670E-02	5,463700E-05	-4,564890E-08	2,761300E-11
Isobutanol	3,183000E-03	-6,316000E-06	3,540000E-08	-6,988000E-12
Isopentano	-2,001000E-03	1,700000E-05	2,575000E-09	1,096000E-11
Metano	3,480000E-03	1,123000E-05	4,078000E-08	-1,094000E-11
Metanol	-1,909590E+00	7,966520E-03	-1,098570E-05	5,051040E-09
n-butano	-6,838000E-03	2,039500E-05	1,868490E-08	-3,871200E-12
n-Heptano	-2,100000E-03	7,100000E-06	1,810000E-08	0,0
n-Hexano	-2,592100E-03	9,543200E-06	1,667700E-08	0,0
n-Octano	4,400000E-06	4,683400E-06	1,522800E-08	0,0
n-Pentano	-3,511520E-02	1,662660E-04	-2,204090E-07	1,200690E-10
Octanol	-3,244170E-03	8,667900E-06	1,572950E-08	0,0
Propano	-2,746400E-03	1,210400E-05	2,158430E-08	0,0
Propanol	-6,912000E-03	1,420000E-05	2,188000E-08	-5,376000E-12
Propileno Glycol	-3,064000E-02	1,231000E-04	-1,266000E-07	5,611000E-11
Propylene	-1,299550E-02	4,142100E-05	1,186000E-09	0,0
Tolueno	6,249000E-04	4,640000E-07	1,923000E-08	0,0

Massa específica de líquidos

$$\rho_l = A + BT + CT^2 + \frac{D}{(T_c + 62 - T)} \quad (A3.3)$$

onde: ρ_l = massa específica em lb/ft^3

T = temperatura em R .

T_c = temperatura crítica em R .

Tabela A3.5 – Constantes para a equação A3.3

Fluido	A	B	C	D
Acetato de etila	1,394380E+02	-2,102680E-01	1,285480E-04	-2,225100E+03
Acetileno	9,489880E+01	-2,369330E-01	2,860910E-04	-2,297540E+03
Acetona	7,027000E+01	-3,541000E-02	0,0	-1,025500E+03
Ácido acético	1,196430E+02	-1,191360E-01	5,656900E-05	-2,169130E+03
Água	5,700000E+01	3,337000E-02	-4,000000E-05	-8,381000E+02
Amônia	6,266420E+01	-4,272770E-02	5,456000E-06	-9,485300E+02
Anilina	1,142570E+02	-9,797200E-02	3,634000E-05	-1,679520E+03
Ar				
Benzeno	4,385000E+01	6,106000E-02	-7,670000E-05	0,0
Butanol	7,839630E+01	-5,180920E-02	1,008600E-05	-9,027800E+02
Decanol	7,910000E+01	-6,800000E-02	3,087600E-05	1,686000E+02
Etano	1,898000E+01	1,200000E-01	-2,185000E-04	0,0
Etanol	4,040900E+01	5,530600E-02	-6,622400E-05	-5,992100E+02
Etileno Glycol	8,359000E+01	-2,434000E-02	0,0	-8,323000E+02
Freon 11	1,260700E+02	-3,801370E-02	-3,411900E-05	-1,350370E+03
Freon 113	1,396000E+02	-6,910000E-02	0,0	-2,069400E+03
Freon 114	1,228000E+02	-6,674000E-03	-7,358000E-05	-2,888000E+03
Freon 12	1,331880E+02	-7,415550E-02	-9,819000E-06	-1,923550E+03
Freon 21	1,222000E+02	-4,960000E-02	-2,001000E-05	-1,570000E+03
Freon 22	1,870830E+02	-3,072830E-01	2,274380E-04	-2,539320E+03
Glicerina	8,921700E+01	-1,454000E-02	-4,607000E-06	-1,421000E+03
i-butano	1,796000E+01	1,098000E-01	-1,460000E-04	0,0
i-Propanol	6,662000E+01	-2,851000E-02	0,0	-1,150800E+03
Isobutanol	7,482000E+01	-5,413000E-02	3,155000E-05	-3,021000E+03
Isopentano	5,951000E+01	-4,051000E-02	9,445000E-06	-8,117000E+02
Metano	5,009800E+01	-1,381000E-01	2,940000E-04	-1,574000E+03
Metanol	7,517700E+01	-5,222600E-02	1,906600E-05	-1,323090E+03
n-butano	2,884000E+01	7,033000E-02	-1,050000E-04	0,0
n-Heptano	5,824000E+01	-2,580000E-02	0,0	-1,002700E+03
n-Hexano	3,714000E+01	3,995000E-02	-6,130000E-05	0,0
n-Octano	4,116000E+01	3,308000E-02	-5,090000E-05	0,0
n-Pentano	5,841000E+01	-3,366000E-02	0,0	-5,686000E+02
Octanol	6,186700E+01	-1,255100E-02	-8,051000E-06	-8,778200E+02
Propano	3,933000E+01	2,900000E-02	-8,480000E-05	0,0
Propanol	6,123380E+01	-4,003400E-03	-2,098400E-05	-1,009600E+03
Propileno Glycol	7,621000E+01	-1,716000E-02	-9,618000E-06	2,351000E+02
Propylene	6,006150E+01	-5,988550E-02	4,526000E-05	-1,597600E+03
Tolueno	3,220000E+01	8,892000E-02	-9,150000E-05	0,0

Massa específica de vapores

$$\rho_v = \frac{MP}{ZRT} \quad (\text{A3.4})$$

onde: ρ_v = massa específica em lb/ft^3

M = massa molecular

P = pressão em *psia*

R = constante universal dos gases = $10,73 \frac{psi.ft^3}{lbmol.R}$

T = temperatura em R .

Z = fator de compressibilidade

Para vapor superaquecido:

$$Z = 1 - \left[\frac{0,41.P_r}{T_r^{4,04}} + (0,29)^a . P_r^8 \right] \quad (\text{A3.5})$$

onde: $a = (T_r)^{16}$

A equação acima apresenta a seguinte incerteza:

$P_r < 0,8$ e $T_r > 1,0$, erro menor que $\pm 2\%$

$P_r < 0,8$ e $T_r < 1,0$, erro maior que $\pm 10\%$

$P_r > 0,8$ e $T_r > 1,1$, erro menor que $\pm 10\%$

$P_r > 0,8$ e $T_r < 1,1$, erro pode ser muito grande, verificar

Para vapor saturado:

$$Z = 0,9815 - 1,0641P_r + 1,4688P_r^2 - 1,0828P_r^3 \quad (\text{A3.6})$$

Calor específico de líquidos

$$C_{p_l} = A + BT + CT^2 + \frac{D}{(1 - T_r)} \quad (\text{A3.7})$$

onde: C_{p_l} = calor específico em $\frac{BTU}{lb.^{\circ}F}$

T = temperatura em R .

T_r = temperatura reduzida, $\frac{T}{T_c}$

Tabela A3.6 – Constantes para a equação A3.7

Fluido	A	B	C	D
Acetato de etila	8,631800E-01	-1,518600E-03	1,464510E-06	4,736440E-03
Acetileno	5,761300E-01	3,714000E-04	-5,152700E-07	3,567240E-02
Acetona	-7,550000E-01	3,880000E-03	-4,169000E-06	1,645000E-01
Ácido acético	3,029800E-01	1,655000E-04	2,544700E-07	1,075400E-02
Água	1,207000E+00	-8,700000E-04	5,650000E-07	5,280000E-02
Amônia	-3,374640E+00	1,635580E-01	-1,486680E-05	4,094130E-02
Anilina	4,592800E-01	-1,588000E-04	3,259900E-07	5,818160E-03
Ar				
Benzeno	6,385900E-01	-1,008400E-03	1,120000E-06	0,0
Butanol	4,073510E+00	-1,135100E-03	9,450920E-06	7,936000E-05
Decanol	2,640000E-01	3,596000E-04	2,832000E-07	-9,723000E-03
Etano	1,266650E+00	-4,551000E-03	7,301260E-06	3,135290E-03
Etanol	6,001480E+00	-1,734960E-02	1,432890E-05	-1,108570E-02
Etileno Glycol	2,939000E-01	4,600000E-04	1,251000E-07	-3,580000E-03
Freon 11	1,770000E-02	6,135000E-04	-6,330000E-07	1,755000E-02
Freon 113	2,320000E-01	-2,900000E-04	4,770000E-07	3,000000E-04
Freon 114	1,414000E-01	2,323000E-04	-2,336000E-07	1,769000E-02
Freon 12	3,348800E-01	-6,560000E-04	8,539200E-07	9,434000E-04
Freon 21	6,733000E-01	-1,655000E-03	1,589000E-06	2,271000E-03
Freon 22	-3,823000E-02	1,075000E-03	-1,100580E-06	1,477630E-02
Glicerina	-3,571600E+00	7,367000E-03	-9,463000E-06	1,751000E+00
i-butano	8,215900E-01	-1,648000E-03	2,233000E-06	0,0
i-Propanol	-1,164000E+00	4,590000E-03	-2,417000E-06	4,800000E-03
Isobutanol	3,385000E-01	-4,102000E-04	8,058000E-07	9,420000E-02
Isopentano	9,380000E-01	-1,959000E-03	3,068000E-06	-7,918000E-02
Metano	3,160000E-01	3,440000E-03	-8,776000E-06	7,080000E-02
Metanol	7,753800E-01	-1,587200E-03	2,364740E-06	8,118200E-04
n-butano	6,863100E-01	-1,146000E-03	1,847200E-06	0,0
n-Heptano	4,350000E-01	-1,500000E-04	5,870000E-07	2,400000E-03
n-Hexano	5,835300E-01	-6,912000E-04	1,139900E-06	0,0
n-Octano	4,453600E-01	-1,361000E-04	5,319400E-07	0,0
n-Pentano	7,040000E-01	-1,130000E-03	1,568000E-06	1,500000E-03
Octanol	2,505700E-01	3,372000E-04	4,734000E-08	7,850110E-02
Propano	1,029100E+00	-2,689000E-03	3,899000E-06	2,334900E-03
Propanol	4,003900E-01	-7,291000E-04	1,143000E-06	1,027000E-01
Propileno Glycol	-6,568000E-01	2,874000E-03	-2,659000E-06	2,500000E-01
Propylene	8,175500E-01	-1,811200E-03	2,857300E-06	5,090000E-03
Tolueno	3,635200E-01	-8,270000E-05	3,390400E-07	0,0

Calor específico de vapores (em baixa pressão, correção para alta pressão no A5)

$$C_{p_v} = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (\text{A3.8})$$

onde: C_{p_v} = calor específico em $\frac{BTU}{lb.^{\circ}F}$

T = temperatura em R .

Tabela A3.7 – Constantes para a equação A3.8

Fluido	A	B	C	D
Acetato de etila	-2,804140E+01	1,191160E-01	-1,662730E-04	7,733850E-08
Acetileno	-2,816720E+00	2,457670E-01	-6,587289E-05	6,147669E-08
Acetona	2,800000E-02	6,370000E-04	-1,986000E-07	2,450000E-11
Ácido acético	-4,822660E+00	2,230260E-02	-3,206000E-05	1,536400E-08
Água	-3,278000E+00	1,708000E-02	-2,623000E-05	1,363000E-08
Amônia	-2,207590E+01	1,279460E-01	-2,422160E-04	1,548620E-07
Anilina	-1,439640E+01	4,705450E-02	-4,987810E-05	1,770870E-08
Ar	2,246000E-01	2,810000E-05	-2,272000E-09	0,0
Benzeno	-3,294150E-02	6,120570E-04	-1,293020E-07	0,0
Butanol	1,439540E+01	-4,591410E-02	4,835240E-05	-1,590190E-08
Decanol	3,094400E-02	7,526800E-04	-2,933700E-07	1,393000E-10
Etano	1,382810E-01	6,393770E-04	-9,681500E-08	0,0
Etanol	-1,049810E+01	5,744390E-02	-9,674620E-05	5,282800E-08
Etileno Glycol	2,406200E-01	2,934000E-04	-2,111000E-08	0,0
Freon 11	-3,649000E-02	5,527000E-04	-5,150000E-07	1,638000E-10
Freon 113	3,755000E-02	2,660000E-04	-1,045000E-07	0,0
Freon 114	6,643000E-02	1,711000E-04	3,589000E-09	-9,495000E-12
Freon 12	1,578300E+01	-8,458300E-02	1,494760E-04	-8,599010E-08
Freon 21	3,881000E-02	2,201000E-04	-3,545000E-08	-3,949000E-11
Freon 22	-8,425810E+00	5,379080E-02	-1,125840E-04	7,873790E-08
Glicerina	1,379000E-01	6,101000E-04	-3,125000E-07	7,208000E-11
i-butano	8,538000E-03	8,137910E-04	-1,671810E-07	0,0
i-Propanol	1,320000E-02	7,860000E-04	-2,576000E-07	3,299000E-11
Isobutanol	-1,148000E-01	9,686000E-04	-3,581000E-07	5,263000E-11
Isopentano	2,177000E-02	7,818000E-04	-1,465000E-07	-2,590000E-12
Metano	2,969000E-01	4,160000E-04	5,790000E-08	-2,818000E-11
Metanol	-3,751910E+01	1,640300E-01	-2,364260E-04	1,136320E-07
n-butano	4,137030E-02	7,198950E-04	-1,236490E-07	0,0
n-Heptano	5,100000E-03	8,327000E-04	-1,929000E-07	0,0
n-Hexano	3,731480E-02	7,666750E-04	-1,522170E-07	0,0
n-Octano	5,616600E-02	7,045500E-04	-1,270800E-07	0,0
n-Pentano	7,770000E-03	8,323000E-04	-1,901000E-07	0,0
Octanol	8,297390E-02	4,577100E-04	2,302570E-07	-1,733810E-10
Propano	7,908570E-02	6,803860E-04	-1,095290E-07	0,0
Propanol	9,254000E-02	5,571000E-04	-9,997000E-08	3,030000E-13
Propileno Glycol	1,310000E-01	6,164000E-04	-2,729000E-07	6,297000E-11
Propylene	3,906180E-02	6,561540E-04	-1,221710E-07	0,0
Tolueno	-4,078050E-02	6,564550E-04	-1,422790E-07	0,0

Viscosidade de líquidos

$$\mu_l = 2,42.e^{\left(\frac{A+B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3}\right)} \quad (\text{A3.9})$$

onde: μ_l = viscosidade em $lb/h.ft$

T = temperatura em R .

Uma equação adicional é usada para alguns fluidos. A equação A3.10 deve ser usada sempre que a constante D (Tabela A3.8) for igual a 1.

$$\mu_l = 2,42.A.T^B \quad (\text{A3.10})$$

Tabela A3.8 – Constantes para a equação A3.9

Fluido	A	B	C	D
Acetato de etila	-6,547670E+00	-1,365810E+02	5,779300E+06	-2,294100E+09
Acetileno	-3,888690E+01	4,220590E+04	-1,628610E+07	2,120300E+09
Acetona	-4,358100E+00	2,034000E+03	-1,797400E+05	0,0
Ácido acético	1,172350E+02	-3,110240E+05	2,655290E+08	-7,409110E+10
Água	-2,986800E+00	-3,887500E+02	1,037700E+06	0,0
Amônia	-2,799040E+01	3,715960E+04	-1,811550E+07	3,047500E+09
Anilina	-8,984000E+00	1,470860E+04	-1,136430E+07	3,732900E+09
Ar				
Benzeno	6,158490E+00	-1,851000E+04	1,303530E+07	-2,694000E+09
Butanol	-2,706180E+01	5,851381E+04	-4,698270E+07	1,322750E+10
Decanol	-6,328000E+00	3,381000E+03	6,557000E+05	3,450000E+07
Etano	6,219800E+05	-2,609400E+00	0,0	1,00
Etanol	-1,251910E+01	1,357520E+04	-5,152380E+06	7,802000E+08
Etileno Glycol	-1,492100E+00	-1,820000E+03	2,226020E+06	0,0
Freon 11	-4,029000E+00	2,205000E+03	-3,297000E+05	2,910000E+07
Freon 113	-4,174300E+00	1,831000E+03	1,092200E+05	0,0
Freon 114	-4,901000E+00	3,988000E+03	-1,627000E+06	3,337000E+08
Freon 12	-2,764340E+01	3,812560E+04	-1,892800E+07	3,217000E+09
Freon 21	-8,973000E+00	7,753000E+03	-1,867000E+06	-2,770000E+07
Freon 22	-1,506930E+01	1,780590E+04	-8,110050E+06	1,305100E+09
Glicerina	-1,636500E+00	-2,092000E+03	1,954000E+06	8,582000E+08
i-butano	-1,117250E+01	8,522000E+03	-2,148450E+06	1,401000E+08
i-Propanol	-2,622100E+00	-1,613000E+03	1,821510E+06	0,0
Isobutanol	-1,965800E+01	2,242000E+04	-8,737000E+06	1,457000E+09
Isopentano	-3,287000E+00	-4,065000E+02	1,125000E+06	-2,159000E+08
Metano	-1,631300E+01	8,578000E+03	-1,881000E+06	1,458000E+08
Metanol	-8,586700E+00	7,619050E+03	-2,472170E+06	3,714000E+08
n-butano	-3,060000E+00	1,702500E+02	3,685400E+05	-4,570000E+07
n-Heptano	-2,051600E+01	3,076560E+04	-1,695800E+07	3,263500E+09
n-Hexano	-1,102410E+01	1,312000E+04	-6,461020E+06	1,204600E+09
n-Octano	-4,374500E+00	2,065000E+03	-5,651000E+04	9,700000E+06
n-Pentano	-1,171460E+01	1,024000E+04	-2,556240E+06	0,0
Octanol	-6,740390E+00	4,232210E+03	2,576500E+05	0,0
Propano	9,438000E+06	-2,923000E+00	0,0	1,00
Propanol	-1,111000E+01	1,199000E+04	-4,611000E+06	8,454000E+08
Propileno Glycol	-2,263200E+01	5,802380E+03	8,471680E+06	-2,217300E+09
Propylene	-3,353000E+00	3,212000E+01	3,453800E+05	-4,810000E+07
Tolueno	-7,139370E+00	7,771680E+03	-3,791140E+06	8,077000E+08

Viscosidade de vapores (em baixa pressão, correção para alta pressão no A5)

$$\mu_v = 2,42 \left[A + BT + \frac{CT^{1,5}}{1 + DT} \right] \quad (\text{A3.11})$$

onde: μ_v = viscosidade em $lb/h.ft$

T = temperatura em R .

Tabela A3.9 – Constantes para a equação A3.11

Fluido	A	B	C	D
Acetato de etila	-5,032000E-02	8,430390E-05	0,0	0,0
Acetileno	-1,581190E-03	2,525740E-05	0,0	0,0
Acetona	6,370000E-04	1,340000E-05	0,0	0,0
Ácido acético	-3,185900E-03	1,902990E-05	0,0	0,0
Água	-3,056000E-03	2,260000E-05	0,0	0,0
Amônia	-5,089030E-03	3,145040E-05	0,0	0,0
Anilina	-6,204710E-02	7,918750E-05	0,0	0,0
Ar	0,0	0,0	5,465000E-06	5,028000E-03
Benzeno	3,307000E-04	1,375000E-05	0,0	0,0
Butanol	-2,268960E-02	4,283320E-05	0,0	0,0
Decanol	9,076400E-05	1,350000E-05	4,078000E-07	0,0
Etano	5,387000E-04	1,612000E-05	0,0	0,0
Etanol	-5,785770E-03	2,465530E-05	0,0	0,0
Etileno Glycol	3,600000E-05	1,460000E-05	0,0	0,0
Freon 11	4,429000E-03	1,652000E-06	4,469000E-07	0,0
Freon 113	-6,750000E-04	1,890000E-05	0,0	0,0
Freon 114	3,470000E-03	1,242000E-05	1,361000E-07	0,0
Freon 12	-5,285360E-03	3,450310E-05	0,0	0,0
Freon 21				
Freon 22	-7,127270E-03	3,911370E-05	0,0	0,0
Glicerina	-4,395000E-03	3,130000E-05	-4,134000E-07	0,0
i-butano	8,058000E-04	1,290000E-05	0,0	0,0
i-Propanol	-2,020000E-04	1,500000E-05	0,0	0,0
Isobutanol	7,275000E-03	-3,689000E-06	1,766000E-07	0,0
Isopentano	-1,973000E-03	2,087000E-05	-1,746000E-07	0,0
Metano	0,0	0,0	2,405000E-06	3,150000E-03
Metanol	-1,413499E-02	3,908340E-05	0,0	0,0
n-butano	-1,390000E-04	1,415000E-05	0,0	0,0
n-Heptano	-1,310000E-03	1,260000E-05	0,0	0,0
n-Hexano	9,013000E-04	1,112000E-05	0,0	0,0
n-Octano	2,536000E-04	1,047000E-05	0,0	0,0
n-Pentano	1,400000E-04	1,270000E-05	0,0	0,0
Octanol	-1,139640E-03	1,219000E-05	0,0	0,0
Propano	1,474000E-04	1,470000E-05	0,0	0,0
Propanol	-3,382000E-03	2,062000E-05	-7,425000E-08	0,0
Propileno Glycol	2,930000E-04	1,311000E-05	1,358000E-08	0,0
Propylene	-1,620000E-04	1,601000E-05	0,0	0,0
Tolueno	7,570000E-05	1,278000E-05	0,0	0,0

Calor latente de vaporização

$$h_{lv} = A(T_c - T)^B \quad (\text{A3.12})$$

onde: h_{lv} = calor latente em BTU/lb

T = temperatura em R .

T_c = temperatura crítica R .

Tabela A3.10 – Constantes para a equação A3.12

Fluido	A	B
Acetato de etila	1,358120E+01	4,323340E-01
Acetileno	3,742090E+01	3,584760E-01
Acetona	2,219450E+01	4,000000E-01
Ácido acético	1,198900E+01	4,575000E-01
Água	9,426120E+01	3,771000E-01
Amônia	5,029060E+01	4,366710E-01
Anilina	2,053330E+01	3,750370E-01
Ar		
Benzeno	1,687430E+01	3,905500E-01
Butanol	3,689840E+01	3,327890E-01
Decanol	4,552000E+00	5,940500E-01
Etano	3,008850E+01	3,627300E-01
Etanol	6,299720E+01	3,294040E-01
Etileno Glycol	3,414090E+01	4,100000E-01
Freon 11	1,957980E+01	2,362000E-01
Freon 113	7,462400E+00	3,734000E-01
Freon 114	8,153900E+00	3,576000E-01
Freon 12	7,827240E+00	4,050740E-01
Freon 21	1,116850E+01	3,865000E-01
Freon 22	1,120430E+01	4,014780E-01
Glicerina	2,190240E+01	4,639000E-01
i-butano	1,120790E+01	4,817700E-01
i-Propanol	3,407100E+01	3,800000E-01
Isobutanol	2,314310E+01	4,154000E-01
Isopentano	1,688280E+01	3,838000E-01
Metano	3,365290E+01	3,844000E-01
Metanol	5,467730E+01	3,780180E-01
n-butano	1,606050E+01	4,190800E-01
n-Heptano	1,497770E+01	3,857000E-01
n-Hexano	1,628630E+01	3,833700E-01
n-Octano	1,436820E+01	3,860400E-01
n-Pentano	1,673500E+01	3,933000E-01
Octanol	6,095920E+00	5,664670E-01
Propano	2,258160E+01	3,804700E-01
Propanol	3,344150E+01	3,839000E-01
Propileno Glycol	3,316510E+01	3,887000E-01
Propylene	2,014950E+01	4,085200E-01
Tolueno	9,349200E+00	4,775400E-01

Tensão superficial

$$\sigma = 6,852 \times 10^{-5} \left(A(1-T_r)^B + C(1-T_r)^2 + D(1-T_r)^3 \right) \quad (\text{A3.13})$$

onde: σ = tensão superficial lbf/ft

T_r = temperatura reduzida, T/T_c .

Tabela A3.11 – Constantes para a equação A3.13

Fluido	A	B	C	D
Acetato de etila	6,629870E+01	1,226790E+00	0,0	0,0
Acetileno	7,012290E+01	1,312450E+00	0,0	0,0
Acetona	6,770000E+01	1,220000E+00	0,0	0,0
Ácido acético	6,098300E+01	1,120660E+00	0,0	0,0
Água	1,297000E+02	1,020000E+00	8,050000E+01	-1,308000E+02
Amônia	9,497940E+01	1,151910E+00	0,0	0,0
Anilina	9,250110E+01	1,222450E+00	0,0	0,0
Ar				
Benzeno	7,122000E+01	1,228000E+00	0,0	0,0
Butanol	3,504660E+01	6,955100E-01	0,0	0,0
Decanol	5,332470E+01	1,114200E+00	0,0	0,0
Etano	4,254000E+01	1,109000E+00	0,0	0,0
Etanol	6,090040E+01	1,059750E+00	0,0	0,0
Etileno Glycol	6,600000E+01	5,500000E-01	0,0	0,0
Freon 11	4,718610E+01	7,826000E-01	0,0	0,0
Freon 113	5,260000E+01	1,170000E+00	0,0	0,0
Freon 114	5,567880E+01	9,200000E-01	0,0	0,0
Freon 12	5,499370E+01	1,254250E+00	0,0	0,0
Freon 21	6,661300E+01	1,220000E+00	0,0	0,0
Freon 22	6,910650E+01	1,308110E+00	0,0	0,0
Glicerina	8,698180E+01	6,026000E-01	0,0	0,0
i-butano	4,998000E+01	1,209000E+00	0,0	0,0
i-Propanol	4,100000E+01	7,400000E-01	0,0	0,0
Isobutanol	4,596100E+01	9,016000E-01	0,0	0,0
Isopentano	5,031980E+01	1,188000E+00	0,0	0,0
Metano	4,771280E+01	1,426700E+00	0,0	0,0
Metanol	6,996600E+01	1,115540E+00	0,0	0,0
n-butano	5,427000E+01	1,270000E+00	0,0	0,0
n-Heptano	5,260000E+01	1,210000E+00	0,0	0,0
n-Hexano	4,952000E+01	1,166000E+00	0,0	0,0
n-Octano	5,134000E+01	1,193000E+00	0,0	0,0
n-Pentano	5,900000E+01	1,220000E+00	-1,760000E+01	1,240000E+01
Octanol	5,510990E+01	1,135930E+00	0,0	0,0
Propano	4,584000E+01	1,141000E+00	0,0	0,0
Propanol	4,509170E+01	7,924200E-01	0,0	0,0
Propileno Glycol	7,786680E+01	1,167000E+00	0,0	0,0
Propylene	4,607000E+01	1,090000E+00	0,0	0,0
Tolueno	6,707000E+01	1,253000E+00	0,0	0,0

Pressão de vapor

$$p_v = e^{\left(\frac{A+B}{T+C}\right)} \quad (\text{A3.14})$$

onde: p_v = tensão superficial *psia*

T = temperatura, R .

Tabela A3.12 – Constantes para a equação A3.14

Fluido	A	B	C
Acetato de etila	1,385500E+01	-7,254870E+03	2,100000E+01
Acetileno	1,351120E+01	-3,832450E+03	1,600000E+01
Acetona	1,357830E+01	-6,142940E+03	-3,200000E+01
Ácido acético	1,522540E+01	-9,591380E+03	5,900000E+01
Água	1,433960E+01	-6,850570E+03	-8,300000E+01
Amônia	1,389430E+01	-4,618370E+03	-1,900000E+01
Anilina	1,380820E+01	-8,778770E+03	-3,300000E+01
Ar			
Benzeno	1,226440E+01	-5,331650E+03	-7,700000E+01
Butanol	1,361560E+01	-6,529450E+03	-1,060000E+02
Decanol	1,234650E+01	-6,612880E+03	-2,240000E+02
Etano	1,192140E+01	-2,813720E+03	-2,700000E+01
Etanol	1,409520E+01	-5,956420E+03	-1,100000E+02
Etileno Glycol	1,643890E+01	-1,097880E+04	-4,900000E+01
Freon 11	1,194490E+01	-4,347880E+03	-6,500000E+01
Freon 113	1,196980E+01	-4,627590E+03	-7,900000E+01
Freon 114	1,183250E+01	-3,918130E+03	-7,000000E+01
Freon 12	1,241100E+01	-4,056110E+03	-2,000000E+01
Freon 21	1,126530E+01	-3,443700E+03	-1,050000E+02
Freon 22	1,120590E+01	-2,418820E+03	-1,450000E+02
Glicerina	1,463130E+01	-1,045330E+04	-1,500000E+02
i-butano	1,193470E+01	-3,915000E+03	-4,700000E+01
i-Propanol	1,368990E+01	-5,588320E+03	-1,330000E+02
Isobutanol	1,338180E+01	-5,811250E+03	-1,430000E+02
Isopentano	1,334500E+01	-6,269820E+03	4,800000E+01
Metano	1,260990E+01	-2,265500E+03	2,800000E+01
Metanol	1,477700E+01	-6,759330E+03	-4,900000E+01
n-butano	1,142380E+01	-3,587810E+03	-7,800000E+01
n-Heptano	1,206560E+01	-5,385170E+03	-9,600000E+01
n-Hexano	1,209560E+01	-5,050200E+03	-7,900000E+01
n-Octano	1,188240E+01	-5,556050E+03	-1,140000E+02
n-Pentano	1,193240E+01	-4,420180E+03	-7,800000E+01
Octanol	1,246610E+01	-6,337930E+03	-2,000000E+02
Propano	1,259640E+01	-4,099570E+03	-2,000000E+00
Propanol	1,312170E+01	-5,245190E+03	-1,650000E+02
Propileno Glycol	1,594610E+01	-1,020340E+04	-6,000000E+01
Propylene	1,182260E+01	-3,300630E+03	-4,600000E+01
Tolueno	1,233450E+01	-5,722150E+03	-9,700000E+01

A4 - PROPRIEDADES FÍSICAS DE FRAÇÕES DO PETRÓLEO (HIDROCARBONETOS)

A refinação do petróleo é uma indústria muito relevante. Os produtos do petróleo constituem combustíveis importantes para o fornecimento de potência para a indústria, e os derivados de petróleo constituem o ponto de partida para muitas sínteses na indústria química.

O petróleo é uma mistura de um grande número de compostos químicos. Alguns podem ser isolados rapidamente, e os nomes dos hidrocarbonetos comuns presentes no petróleo são:

- Metano CH_4
- Etileno..... H_2CCH_2
- Etano CH_3CH_3
- Propileno..... CH_3CHCH_2
- Propano C_3H_8
- Isobutano $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_3$
- n-Butano $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$
- Isopentano..... $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_3$
- n-Pentano C_5H_{12}
- n-Hexano $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$
- n-Heptano $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$
- n-Octano C_8H_{18}
- Nonano..... C_9H_{20}
- Decano $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{CH}_3$
- Undecano $\text{C}_{11}\text{H}_{24}$
- Dodecano $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$
- Tridecano $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$
- Tetradecano $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$
- Docosano $\text{C}_{22}\text{H}_{46}$
- Tricosano $\text{C}_{23}\text{H}_{48}$
- Tetracosano..... $\text{C}_{24}\text{H}_{50}$

Entretanto, não existe nenhuma necessidade de se obter componentes puros, uma vez que o uso final de uma mistura de diversos componentes apresentará o mesmo resultado. Assim, o óleo lubrificante é uma mistura de diversos compostos com elevado peso molecular, cada um dos quais é um lubrificante conveniente. Analogamente, a gasolina que deverá ser queimada será composta por um certo número de combustíveis voláteis. Estes dois produtos comuns do petróleo estavam presentes no petróleo bruto retirado do solo ou se formaram através de uma reação subsequente e foram separados por destilação. Quando tratados num processo ou quando comercializados como misturas, estes produtos denominam-se *frações* ou *cortes*. Eles fornecem nomes comuns ou designam a operação de refinação pela qual eles foram produzidos, e suas densidades relativas são definidas em uma escala estabelecida pelo *American Petroleum Institute* e designadas ou pela sigla API ou por °API.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{densidade relativa a } 60^{\circ}\text{F}} - 131,5 \quad (\text{A4.1})$$

Sendo misturas de compostos de petróleo, as frações não sofrem ebulição isotérmica como no caso de líquidos puros, porém possuem intervalos de ebulição. Na pressão atmosférica, a temperatura mais baixa para a qual um líquido começa a entrar em ebulição é

identificada como o *ponto de ebulição inicial*, IBP, °F. Uma lista das frações mais comuns do petróleo obtidas do petróleo bruto é fornecida na Tabela A4.1

Tabela A4.1 – Frações do petróleo

Frações do óleo bruto	Aprox. °API	Aprox. IBP, °F
Finais leves e gases	114	
Gasolina	75	200
Nafta	60	300
Querosene	45	350
Óleo de absorção	40	450
Óleo absorvente (<i>straw oil</i>)	40	500
Destilado	35	550
Gasóleo	28	600
Óleo lubrificante	18 - 30	
Óleo cru reduzido		
Cera de parafina e gelatina de parafina		
Óleo combustível (resíduo)	25 35	500
Asfalto		

Um método para definir o caráter químico do petróleo e para correlacionar as propriedades das misturas foi introduzido por Watson, Nelson e Murphy¹. Eles observaram que, quando o petróleo bruto com destilação uniforme for destilado em frações estreitas, a razão entre a raiz cúbica dos pontos de ebulição médios absolutos e as densidades relativas das frações é uma constante, ou

$$K_w = \frac{\sqrt[3]{T_B}}{s} \quad (\text{A4.2})$$

onde: K = fator característico

T_B = ponto de ebulição médio, R

s = densidade relativa para $60^\circ F$

- **Densidade relativa a $60^\circ F$, s_{60}**

$$s_{60} = \frac{141,5}{131,5 + API} \quad (\text{A4.3})$$

- **Ponto de ebulição normal, T_B , R**

Para $API < 100$ e $M > 50$

$$T_B = e^{\left\{ \frac{\ln \left[\frac{M-50}{(3,235 \times 10^{-5})(API)^{1,564}} \right]}{(2,56)(API)^{-0,1366}} \right\}} + 460 \quad (\text{A4.4})$$

onde M é a massa molecular média

¹ Watson, K.M., Nelson, E.F. e Murphy, G.B., *Ind. Eng. Chem*, 25, 880 (1933), 27, 1460 (1935)

Para $API > 100$

$$T_B = 10.e^{\left\{ \frac{\ln \left[\frac{M-9}{0,0142} \right]}{2,093} \right\}} \quad (A4.5)$$

Se o fator de caracterização é conhecido

$$T_B = [K.s_{60}]^3 \quad (A4.6)$$

- **Fator de caracterização, K**

$$K_w = \frac{\sqrt[3]{T_B}}{s_{60}} \quad (A4.7)$$

- **Massa molecular média, M**

Para $T_B < 550 R$

$$M = 0,0142 \left(\frac{T_B}{10} \right)^{2,093} + 9,0 \quad (A4.8)$$

Para $550 \leq T_B < 1100 R$

$$M = 50 + (3,235 \times 10^{-5}) (API)^{1,5635} (T_B - 460)^N \quad (A4.9)$$

onde: $N = (2,56)(API)^{-0,1366}$

- **Temperatura crítica, T_c, R**

$$T_c = 19,078(s_{60})^{0,3} (T_B)^{0,622} \quad (A4.10)$$

- **Pressão crítica, $P_c, psia$**

Para $API < 50$

$$P_c = e^{[8,714 - 0,014 \cdot API - 0,00264 \cdot T_B]} \quad (A4.11)$$

Para $50 \leq API \leq 100$

$$P_c = e^{[8,791 - 0,009 \cdot API - 0,00322 \cdot T_B]} \quad (A4.12)$$

- **Massa específica do líquido, $\rho_l, lb/ft^3$**

$$\rho_l = 62,4 \left[(s_{60}) + X(T - 520) + Y(T - 520)^2 \right] \quad (A4.13)$$

onde: $X = 8 \times 10^{-4} (s_{60}) - 1,05 \times 10^{-3}$

$$Y = 6 \times 10^{-7} (s_{60}) - 4,9 \times 10^{-7}$$

$T =$ temperatura em R

- **Massa específica do vapor, $\rho_v, lb/ft^3$**

$$\rho_v = \frac{PM}{10,73 ZT} \quad (A4.14)$$

onde: $P =$ pressão do vapor em $psia$.

$T =$ temperatura em R

$$Z = 0,9815 - 1,064 P_r + 1,469 P_r^2 - 1,083 P_r^3$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

- **Viscosidade do líquido, μ_l , $lb/h.ft$**

$$\mu_l = 2,42.e^{\left[\frac{A+B}{T}\right]} \quad (A4.15)$$

onde: $A = -3,1724 - 1,12705 \times 10^{-2} M + 1,88971 \times 10^{-5} M^2 + 7,7302 \times 10^{-9} M^3$
 $B = 120,504 + 17,3459M - 0,0114652M^2 - 3,149126 \times 10^{-5} M^3$
 $T =$ temperatura em R

- **Viscosidade do vapor, μ_v , $lb/h.ft$**

$$\mu_v = 2,42 \left[B_v - \frac{(0,0013 - B_v)(T - 460)}{580} \right] \quad (A4.16)$$

onde: $B_v = \frac{6,9 - \ln(M)}{400}$
 $T =$ temperatura em R

- **Condutividade térmica do líquido, K_l , $BTU/h.ft.^{\circ}F$**

$$k_l = 0,0773 - (4,56 \times 10^{-5})(T - 460) \quad (A4.17)$$

onde: $T =$ temperatura em R

- **Condutividade térmica do vapor, K_v , $BTU/h.ft.^{\circ}F$**

$$k_v = F_k + \frac{(T - 460)(0,007 + F_k)}{440} \quad (A4.18)$$

onde: $F_k = 0,0047 + 0,226(M)^{-1,18}$

- **Calor específico do líquido, Cp_l , $BTU/lb.^{\circ}F$**

$$Cp_l = C_k \{ 0,681 - 0,308(s_{60}) + [0,000815 - 0,000306(s_{60})](T - 460) \} \quad (A4.19)$$

onde: $C_k = 0,055 K_w + 0,35$

- **Calor específico do vapor, Cp_v , $BTU/lb.^{\circ}F$**

$$Cp_v = (0,045K_w - 0,233) + (0,44 + 0,0177K_w)(10^{-3})(T - 460) - 1,53 \times 10^{-7}(T - 460)^2 \quad (A4.20)$$

- **Tensão superficial σ , lbf/ft**

$$\sigma = \frac{4,6594 \times 10^{-2}}{K_w} \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right)^{1,206} \quad (A4.21)$$

- **Calor latente de vaporização no ponto de ebulição normal, h_{lvB} , BTU/lb**

$$h_{lvB} = \frac{T_B}{M} \left(\frac{7,90T_{Br} - 7,82 - 7,11 \cdot \log P_{Ar}}{1,07 - T_{Br}} \right) \quad (A4.22)$$

onde: $T_{Br} = \frac{T_B}{T_c}$

$$P_{Ar} = \frac{14,7}{P_c}$$

- **Calor latente de vaporização na temperatura T , h_{lv} , BTU/lb**

$$h_{lv} = h_{lvB} \left(\frac{1 - T_r}{1 - T_{Br}} \right)^{0,38} \quad (A4.23)$$

onde: $T_{Br} = \frac{T_B}{T_c}$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

- **Pressão de vapor, p_v**

$$\log \left(\frac{P_c}{P_v} \right) = 0,118 \cdot B - 7 \log(T_r) + (\alpha_c - 7) [0,0364 \cdot B - \log(T_r)] \quad (A4.24)$$

onde: $T_r = \frac{T}{T_c}$ $T_{Br} = \frac{T_B}{T_c}$

$$B = \frac{36}{T_r} - 35 - (T_r)^6 + 42 \ln(T_r)$$

$$\alpha_c = 0,9076 \left(1 + \frac{T_{Br} \cdot \ln(P_c)}{1 - T_{Br}} \right) \quad (P_c \text{ em atm})$$

A5 – CORREÇÃO DEVIDO À PRESSÃO PARA PROPRIEDADES FÍSICAS DE GASES E VAPORES

- Correção de pressão para o calor específico de vapores (exceto vapor de água)

$$C_p - C_p^o = F_{TTc} \cdot e^{\left[-1,784 + 13,673 \left(\frac{P}{P_c} \right) - 20,078 \left(\frac{P}{P_c} \right)^2 + 13,084 \left(\frac{P}{P_c} \right)^3 \right]} \quad (\text{A5.1})$$

onde:

C_p^o = calor específico na pressão atmosférica (baixa pressão)

P = pressão do sistema, *psia* ($P \leq 0,95P_c$)

P_c = pressão crítica, *psia*

T = temperatura do sistema, *R* ($T \geq 0,95T_c$)

T_c = temperatura crítica, *R*

Para $\frac{T}{T_c} \leq 1,01$

$$F_{TTc} = 11,26 - 10,14 \left(\frac{T}{T_c} \right) \quad (\text{A5.2})$$

Para $\frac{T}{T_c} \leq 1,01$

$$F_{TTc} = e^{\left[-6,894 + \frac{6,718}{\left(\frac{T}{T_c} \right)} \right]} \quad (\text{A5.3})$$

A correção deve atender a seguinte restrição:

$$C_p - C_p^o \leq e^{\left[0,69466 + 3,9113 \left(\frac{P}{P_c} \right) - 2,19866 \left(\frac{P}{P_c} \right)^2 + 2,6387 \left(\frac{P}{P_c} \right)^3 \right]} \quad (\text{A5.4})$$

A equação A5.4 representa o limite de saturação para a fase vapor. Este limite não se aplica ao ar e ao metano.

- Correção de viscosidade ($0,1 < P_r < 3,0$)

$$\left[(\mu - \mu^o) \xi + 10^{-4} \right]^{0,25} = 0,1023 + 0,023364 \rho_r - 0,058533 \rho_r^2 - 0,040758 \rho_r^3 + 0,0093324 \rho_r^4 \quad (\text{A5.5})$$

onde:

$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_c}$ massa específica reduzida

μ = viscosidade na pressão e temperatura dadas, em cP (centipoise)

μ^o = viscosidade na mesma temperatura e pressão atmosférica, em cP (centipoise)

$$\xi = \frac{T_c^{1/6}}{M^{1/2} P_c^{2/3}}$$

T_c = temperatura crítica, *K*

M = massa molecular

P_c = pressão crítica, *atm*

- **Correção de condutividade térmica**

Para $\rho_r < 0,5$

$$(k - k^o) \gamma Z_c^5 = (241,9)(14,0)(10^{-8})(e^{0,535} \rho_r - 1) \quad (\text{A5.6})$$

Para $0,5 < \rho_r < 2,0$

$$(k - k^o) \gamma Z_c^5 = (241,9)(13,1)(10^{-8})(e^{0,67} \rho_r - 1,069) \quad (\text{A5.7})$$

Para $2,0 < \rho_r < 2,8$

$$(k - k^o) \gamma Z_c^5 = (241,9)(2,976)(10^{-8})(e^{1,155} \rho_r + 2,016) \quad (\text{A5.8})$$

onde:

k = viscosidade na pressão e temperatura dadas, em $BTU/h.ft.^{\circ}F$

k^o = viscosidade na mesma temperatura e pressão atmosférica, em $BTU/h.ft.^{\circ}F$

Z_c = compressibilidade crítica

$$\gamma = \frac{T_c^{1/6} M^{1/2}}{P_c^{2/3}}$$

T_c = temperatura crítica, K

M = massa molecular

P_c = pressão crítica, atm

$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_c}$ massa específica reduzida

A6 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA DO MAR

Tabela A6.1 – Propriedades termofísicas da água do mar - líquido saturado

Temperatura °C	Pressão bar	ρ (kg/m^3)	C_p ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	k ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
0	0,005993	999,8420	4,000	0,001884	0,560
1	0,006438	999,9010	4,000	0,001827	0,563
2	0,006916	999,9430	4,000	0,001772	0,565
3	0,007427	999,9670	4,000	0,001720	0,567
4	0,007970	999,9750	4,001	0,001669	0,569
5	0,008548	999,9670	4,001	0,001620	0,571
6	0,009163	999,9430	4,001	0,001574	0,574
7	0,009816	999,9040	4,002	0,001529	0,576
8	0,010511	999,8510	4,002	0,001486	0,578
9	0,011248	999,7391	4,002	0,001445	0,580
10	0,012030	999,7021	4,003	0,001405	0,582
11	0,012860	999,6082	4,003	0,001367	0,584
12	0,013740	999,5002	4,003	0,001330	0,586
13	0,014670	999,3804	4,004	0,001294	0,588
14	0,015660	999,2735	4,004	0,001259	0,590
15	0,016710	999,1018	4,005	0,001226	0,592
16	0,017810	998,9461	4,005	0,001195	0,594
17	0,018980	998,7775	4,006	0,001165	0,595
18	0,020220	998,5980	4,006	0,001136	0,597
19	0,021530	998,4075	4,007	0,001107	0,599
20	0,022910	998,2072	4,007	0,001080	0,600
21	0,024370	997,9950	4,007	0,001054	0,602
22	0,025910	997,7730	4,008	0,001029	0,604
23	0,027530	997,5411	4,008	0,001005	0,605
24	0,029240	997,2993	4,009	0,000981	0,607
25	0,031040	997,0477	4,009	0,000958	0,608
26	0,032940	996,7864	4,009	0,000936	0,609
27	0,034940	996,5162	4,010	0,000915	0,611
28	0,037050	996,2362	4,010	0,000895	0,612
29	0,039260	995,9475	4,011	0,000875	0,614
30	0,041590	995,6500	4,011	0,000855	0,615

Equações para as propriedades termofísicas da água do mar**Massa específica** $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$:

$$\rho = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 + E.T^4 \quad (A6.1)$$

Calor específico $\left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$:

$$Cp = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 + E.T^4 \quad (A6.2)$$

Viscosidade dinâmica $(Pa.s)$:

$$\mu = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 \quad (A6.3)$$

Condutividade térmica $\left(\frac{W}{m.K}\right)$:

$$k = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 \quad (A6.4)$$

Obs: Temperatura em °C

Tabela A6.2 – Constantes para as equações A6.1 a A6.4

	A	B	C	D	E
ρ	9,99847E+02	6,38487E-02	-8,46633E-03	6,49782E-05	-3,04574E-07
Cp	3,99990E+00	8,68780E-05	2,69621E-05	-8,86706E-07	1,01707E-08
μ	1,85817E-03	-5,04083E-05	6,47761E-07	-3,06878E-09	
k	5,60165E-01	2,36230E-03	-1,65339E-05	-4,74630E-08	

A7 – NÚMERO DE TUBOS NO ESPELHO

Tubos com diâmetro externo $\frac{3}{4}$ in em um arranjo triangular de $\frac{15}{16}$ in											
Diâmetro interno do casco, in	T.E.M.A. L ou M				T.E.M.A. P ou S				T.E.M.A. U		
	Número de passes				Número de passes				Número de passes		
	1	2	4	6	1	2	4	6	2	4	6
8	64	48	34	24	34	32	16	18	32	24	24
10	85	74	52	50	60	62	52	44	64	52	52
12	122	114	94	96	109	98	78	68	98	88	78
13.25	151	142	124	112	126	120	106	100	126	116	108
15.25	204	192	166	168	183	168	146	136	180	160	148
17.25	264	254	228	220	237	228	202	192	238	224	204
19.25	332	326	290	280	297	286	258	248	298	280	262
21.25	417	396	364	348	372	356	324	316	370	352	334
23.25	495	478	430	420	450	430	392	376	456	428	408
25	579	554	512	488	518	498	456	444	534	500	474
27	676	648	602	584	618	602	548	532	628	600	570
29	785	762	704	688	729	708	650	624	736	696	668
31	909	878	814	792	843	812	744	732	846	812	780
33	1035	1002	944	920	962	934	868	840	978	928	904
35	1164	1132	1062	1036	1090	1064	990	972	1100	1060	1008
37	1304	1270	1200	1168	1233	1196	1132	1100	1238	1200	1152
39	1460	1422	1338	1320	1365	1346	1266	1244	1390	1336	1290
42	1703	1664	1578	1552	1611	1580	1498	1464	1632	1568	1524
45	1960	1918	1830	1800	1875	1834	1736	1708	1882	1820	1770
48	2242	2196	2106	2060	2132	2100	1998	1964	2152	2092	2044
54	2861	2804	2682	2660	2730	2684	2574	2536	2748	2680	2628
60	3527	3476	3360	3300	3395	3346	3228	3196	3420	3340	3286

Tubos com diâmetro externo ¾ in em um arranjo quadrado de 1 in							
Diâmetro interno do casco, in	T.E.M.A. P ou S				T.E.M.A. U		
	Número de passes				Número de passes		
	1	2	4	6	2	4	6
8	28	26	16	12	28	24	12
10	52	48	44	24	52	44	32
12	80	76	66	56	78	72	70
13.25	104	90	70	80	96	92	90
15.25	136	128	128	114	136	132	120
17.25	181	174	154	160	176	176	160
19.25	222	220	204	198	224	224	224
21.25	289	272	262	260	284	280	274
23.25	345	332	310	308	348	336	328
25	398	386	366	344	408	392	378
27	477	456	432	424	480	468	460
29	554	532	510	496	562	548	530
31	637	624	588	576	648	636	620
33	730	712	682	668	748	728	718
35	828	812	780	760	848	820	816
37	937	918	882	872	952	932	918
39	1048	1028	996	972	1056	1044	1020
42	1224	1200	1170	1140	1244	1224	1212
45	1421	1394	1350	1336	1436	1408	1398
48	1628	1598	1548	1536	1640	1628	1602
54	2096	2048	2010	1992	2108	2084	2068
60	2585	2552	2512	2476	2614	2584	2558

Tubos com diâmetro externo ¾ in em um arranjo triangular de 1 in											
Diâmetro interno do casco, in	T.E.M.A. L ou M				T.E.M.A. P ou S				T.E.M.A. U		
	Número de passes				Número de passes				Número de passes		
	1	2	4	6	1	2	4	6	2	4	6
8	42	40	26	24	31	26	16	12	32	24	24
10	73	66	52	44	56	48	42	40	52	48	40
12	109	102	88	80	88	78	62	68	84	76	74
13.25	136	128	112	102	121	106	94	88	110	100	98
15.25	183	172	146	148	159	148	132	132	152	140	136
17.25	237	228	208	192	208	198	182	180	206	188	182
19.25	295	282	258	248	258	250	228	220	266	248	234
21.25	361	346	318	320	320	314	290	276	330	316	296
23.25	438	416	382	372	400	384	352	336	400	384	356
25	507	486	448	440	450	442	400	392	472	440	424
27	592	574	536	516	543	530	488	468	554	528	502
29	692	668	632	604	645	618	574	556	648	616	588
31	796	774	732	708	741	716	666	648	744	716	688
33	909	886	836	812	843	826	760	740	852	816	788
35	1023	1002	942	920	950	930	878	856	974	932	908
37	1155	1124	1058	1032	1070	1052	992	968	1092	1056	1008
39	1277	1254	1194	1164	1209	1184	1122	1096	1224	1180	1146
42	1503	1466	1404	1372	1409	1378	1314	1296	1434	1388	1350
45	1726	1690	1622	1588	1635	1608	1536	1504	1652	1604	1560
48	1964	1936	1870	1828	1887	1842	1768	1740	1894	1844	1794
54	2519	2466	2380	2352	2399	2366	2270	2244	2426	2368	2326
60	3095	3058	2954	2928	2981	2940	2832	2800	3006	2944	2884

Tubos com diâmetro externo 1 in em um arranjo quadrado de 1 ¼ in							
Diâmetro interno do casco, in	T.E.M.A. P ou S				T.E.M.A. U		
	Número de passes				Número de passes		
	1	2	4	6	2	4	6
8	17	12	8	12	14	8	6
10	30	30	16	18	30	24	12
12	52	48	42	24	44	40	32
13.25	61	56	52	50	60	48	44
15.25	85	78	62	64	80	72	74
17.25	108	108	104	96	104	100	100
19.25	144	136	130	114	132	132	120
21.25	173	166	154	156	172	168	148
23.25	217	208	194	192	212	204	198
25	252	240	230	212	244	240	230
27	296	280	270	260	290	284	274
29	345	336	310	314	340	336	328
31	402	390	366	368	400	384	372
33	461	452	432	420	456	444	440
35	520	514	494	484	518	504	502
37	588	572	562	548	584	576	566
39	661	640	624	620	664	644	640
42	776	756	738	724	764	748	750
45	900	882	862	844	902	880	862
48	1029	1016	984	972	1028	1008	1004
54	1310	1296	1268	1256	1320	1296	1284
60	1641	1624	1598	1576	1634	1616	1614

Tubos com diâmetro externo 1 in em um arranjo triangular de 1 ¼ in											
Diâmetro interno do casco, in	T.E.M.A. L ou M				T.E.M.A. P ou S				T.E.M.A. U		
	Número de passes				Número de passes				Número de passes		
	1	2	4	6	1	2	4	6	2	4	6
8	27	26	8	12	18	14	8	12	14	12	6
10	42	40	34	24	33	28	16	18	28	24	24
12	64	66	52	44	51	48	42	44	52	40	40
13.25	81	74	62	56	73	68	52	44	64	56	52
15.25	106	106	88	92	93	90	78	76	90	80	78
17.25	147	134	124	114	126	122	112	102	122	112	102
19.25	183	176	150	152	159	152	132	136	152	140	136
21.25	226	220	204	186	202	192	182	172	196	180	176
23.25	268	262	236	228	249	238	216	212	242	224	216
25	316	302	274	272	291	278	250	240	286	264	246
27	375	360	336	324	345	330	298	288	340	320	300
29	430	416	390	380	400	388	356	348	400	380	352
31	495	482	452	448	459	450	414	400	456	436	414
33	579	554	520	504	526	514	484	464	526	504	486
35	645	622	586	576	596	584	548	536	596	572	548
37	729	712	662	648	672	668	626	608	668	636	614
39	808	792	744	732	756	736	704	692	748	728	700
42	947	918	874	868	890	878	834	808	890	856	830
45	1095	1068	1022	1000	1035	1008	966	948	1028	992	972
48	1241	1220	1176	1148	1181	1162	1118	1092	1180	1136	1100
54	1577	1572	1510	1480	1520	1492	1436	1416	1508	1468	1442
60	1964	1940	1882	1832	1884	1858	1800	1764	1886	1840	1794

Tubos com diâmetro externo 1.1/4 in em um arranjo quadrado 1 1/16 in							
Diâmetro interno do casco, in	T.E.M.A. P ou S				T.E.M.A. U		
	Número de passes				Número de passes		
	1	2	4	6	2	4	6
8	12	12	4	0	4	4	6
10	21	12	8	12	12	8	12
12	29	28	16	18	26	20	12
13.25	38	34	34	24	36	28	15
15.25	52	48	44	48	44	44	32
17.25	70	66	56	50	60	60	56
19.25	85	84	70	80	82	76	79
21.25	108	108	100	96	100	100	100
23.25	136	128	128	114	128	120	120
25	154	154	142	136	154	148	130
27	184	180	158	172	176	172	160
29	217	212	204	198	212	204	198
31	252	248	234	236	242	240	234
33	289	276	270	264	280	280	274
35	329	316	310	304	324	312	308
37	372	368	354	340	358	352	350
39	420	402	402	392	408	400	392
42	485	476	468	464	480	476	464
45	565	554	546	544	558	548	550
48	653	636	628	620	644	628	632
54	837	820	812	804	824	808	808
60	1036	1028	1012	1008	1028	1016	1008

Tubos com diâmetro externo 1 1/4 in em um arranjo triangular de 1 1/16 in											
Diâmetro interno do casco, in	T.E.M.A. L ou M				T.E.M.A. P ou S				T.E.M.A. U		
	Número de passes				Número de passes				Número de passes		
	1	2	4	6	1	2	4	6	2	4	6
8	15	10	8	12	13	10	4	0	6	4	6
10	27	22	16	12	18	20	8	12	14	12	12
12	38	36	26	24	33	26	26	18	28	20	18
13.25	55	44	42	40	38	44	34	24	34	28	30
15.25	66	64	52	50	57	58	48	44	52	48	40
17.25	88	82	78	68	81	72	62	68	72	68	64
19.25	117	106	98	96	100	94	86	80	90	84	78
21.25	136	134	124	108	126	120	116	102	118	112	102
23.25	170	164	146	148	159	146	132	132	148	132	120
25	198	188	166	168	183	172	150	148	172	160	152
27	237	228	208	192	208	206	190	180	200	188	180
29	268	266	242	236	249	238	224	220	242	228	216
31	312	304	284	276	291	282	262	256	282	264	250
33	357	346	322	324	333	326	298	296	326	308	292
35	417	396	372	364	372	368	344	336	362	344	336
37	446	446	422	408	425	412	394	384	416	396	384
39	506	490	472	464	478	468	442	432	472	444	428
42	592	584	552	544	558	546	520	512	554	524	510
45	680	676	646	632	646	634	606	596	636	624	592
48	788	774	736	732	748	732	704	696	736	708	692
54	1003	980	952	928	962	952	912	892	946	916	890
60	1237	1228	1188	1152	1194	1182	1144	1116	1176	1148	1116

A8 – TUBOS PARA TROCADORES DE CALOR

Tubo DE, in	BWG	Espessura da parede, in	DI, in
$\frac{3}{4}$	10	0,134	0,482
	11	0,12	0,510
	12	0,109	0,532
	13	0,095	0,560
	14	0,083	0,584
	15	0,072	0,606
	16	0,065	0,620
	17	0,058	0,634
	18	0,049	0,652
1	8	0,165	0,670
	9	0,148	0,704
	10	0,134	0,732
	11	0,12	0,760
	12	0,109	0,782
	13	0,095	0,810
	14	0,083	0,834
	15	0,072	0,856
	16	0,065	0,870
1 $\frac{1}{4}$	8	0,165	0,920
	9	0,148	0,954
	10	0,134	0,982
	11	0,12	1,010
	12	0,109	1,032
	13	0,095	1,060
	14	0,083	1,084
	15	0,072	1,106
	16	0,065	1,120
1 $\frac{1}{2}$	8	0,165	1,170
	9	0,148	1,204
	10	0,134	1,232
	11	0,12	1,260
	12	0,109	1,282
	13	0,095	1,310
	14	0,083	1,334
	15	0,072	1,356
	16	0,065	1,370
17	0,058	1,384	
18	0,049	1,402	

A9 – DIMENSÕES DOS TUBOS DE AÇO (IPS)

Diâmetro nominal in	DE in	SCH	DI in
½	0,84	40	0,622
		80	0,546
¾	1,05	40	0,824
		80	0,742
1	1,32	40	1,049
		80	0,957
1 ¼	1,66	40	1,38
		80	1,278
1 ½	1,9	40	1,61
		80	1,5
2	2,38	40	2,067
		80	1,939
2 ½	2,88	40	2,469
		80	2,323
3	3,5	40	3,068
		80	2,9
4	4,5	40	4,026
		80	3,826
6	6,625	40	6,065
		80	5,761
8	8,625	40	7,981
		80	7,625
10	10,75	40	10,02
		60	9,75
12	12,75	30	12,09
14	14	30	13,25
16	16	30	15,25
18	18	20	17,25
20	20	20	19,25
22	22	20	21,25
24	24	20	23,25

REFERÊNCIAS:

Edmiste, W.C., *Specific Heat Ratio in Compression Calculations*, Pet. Engr., C-13 (Dec 1950)

Kern, D.Q., *Processos de Transmissão de Calor*, Ed. Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1980

Maxwell, J.B., *Data Book on Hydrocarbons*, Van Nostrand Co., 1962

Perry, R.H. and Chilton, C.H., *Manual de Engenharia Química*, 5ª edição. Ed. Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1980

Reid, R.C. and Sherwood, T.K., *Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, New York, 1966

Technical Data Book, Division of Refining, American Petroleum Institute, New York, 1966