



UNIVERSIDAD SIMON BOLIVAR  
DEPARTAMENTO DE TERMODINAMICA Y  
FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA

TF1221

**GUÍA PARA EL CURSO DE  
FENOMENOS DE TRANSPORTE I  
ESTIMACION DE PROPIEDADES DE  
TRANSPORTE: VISCOSIDADES**

**Realizado por:**

*Profs. María E. Aguilera, Dosinda González- Mendizabal  
Aura López de Ramos, Luis Matamoros y César Oronel*

Sartenejas, agosto de 2005 (última revisión)

## INDICE

	<b>Pág.</b>
1. Introducción	3
2. Objetivo	4
3. Unidades de viscosidad	5
4. Correlaciones para estimar viscosidades	6
4.1 Gases	6
4.2 Líquidos	7
5. Bibliografía	9

## **1. INTRODUCCIÓN**

El curso de Fenómenos de Transporte I (TF1221) está diseñado para formar en el área de Fluidos a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Química, Materiales y Producción.

Esta guía presenta el resultado de una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los diferentes métodos que están reportados en la literatura especializada para calcular el coeficiente de viscosidad dinámica o cinemática de un fluido.

En el curso de Fenómenos de Transporte I, el profesor de la materia dedicará la primera parte del curso en ilustrar cómo se utiliza en forma general esta guía; sin embargo, el estudiante deberá leerla con detenimiento para familiarizarse con las diferentes técnicas de cálculo: lectura de gráficas, nomogramas y tablas o uso de correlaciones. Al final de esta guía el estudiante encontrará algunos ejercicios propuestos que serán de mucha utilidad en el proceso de aprendizaje de este tema.

## **2. OBJETIVO**

Seleccionar el método adecuado para estimar la viscosidad dinámica y cinemática de ciertos fluidos. Una vez seleccionado el método, calcular la viscosidad y estimar el error cometido en el cálculo.

### 3. UNIDADES DE VISCOSIDAD

$$1 \text{ P} = 1 \text{ poise}$$

$$1 \text{ P} = 1 \text{ dyn.s/cm}^2$$

$$1 \text{ P} = 1 \text{ g/s.cm}$$

$$1 \text{ P} = 10^2 \text{ cP}$$

$$1 \text{ P} = 10^6 \text{ } \mu\text{P}$$

$$1 \text{ P} = 6,72 \cdot 10^{-2} \text{ lbm/ft.s}$$

$$1 \text{ P} = 2,09 \cdot 10^{-3} \text{ lbf.s/ft}^2$$

$$1 \text{ P} = 10^{-1} \text{ Pa.s}$$

## 4. CORRELACIONES PARA ESTIMAR VISCOSIDADES

### 4.1 Gases

- **Ecuación de Chapman-Enskog:** Válida para gases poco densos (bajas presiones):

$$\mu = 2,6693 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\sqrt{M \cdot T}}{\sigma^2 \cdot \Omega_\mu}$$

donde:

$\mu$  = viscosidad (P)

$M$  = peso molecular

$T$  = temperatura (K)

$\sigma$  = diámetro de colisión, característico de cada molécula en  $\text{Å}$  ( $10^{-8}$  cm)

$\Omega_\mu$  = función integral de colisión

$\sigma$  y  $\Omega_\mu$  se determinan de acuerdo al siguiente criterio:

- Gases polares: potencial de Stockmayer (Tablas 1 y 2)
- Gases no polares: potencial de Lennard-Jones (Tablas 3 y 4)

- **Mezclas de Gases:** Ecuación de Wilke (error  $\approx 2\%$ )

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot \mu_i}{\sum_{j=1}^n X_j \cdot \phi_{ij}}$$

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-1/2} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{1/4}\right]^2$$

$$\phi_{ji} = \frac{\mu_j}{\mu_i} \cdot \frac{M_i}{M_j} \cdot \phi_{ij}$$

donde:

$n$  = número de especies químicas existentes en la mezcla.

$X_i, X_j$  = fracciones molares de las especies  $i, j$ .

$\mu_i, \mu_j$  = viscosidades de  $i, j$  a la temperatura y presión del sistema.

$M_i, M_j$  = Pesos moleculares de  $i, j$ .

$\phi_{ij}$  = número adimensional.

Si  $i=j \Rightarrow \phi_{ij} = 1$

- **Variación de la viscosidad de los gases con la temperatura**

Por cinética de los gases: 
$$\frac{\mu}{\mu_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{0,5}$$

Ley de la Potencia: 
$$\frac{\mu}{\mu_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^n \quad n = \text{constante}$$

Para el aire: 
$$\frac{\mu}{\mu_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{0,76} \quad \text{intervalo de temperatura de 300 a 900 } ^\circ\text{R.}$$

Ley de Sutherland: 
$$\mu = \frac{\mu_o (T/T_o)^{3/2} (T_o + S)}{T + S} \quad S = \text{constante.}$$

- **Variación de la viscosidad de los gases con la presión**

La Ecuación de Chapman-Enskog es valida para él calculo de viscosidades a bajas presiones, por lo cual no es recomendable utilizarla a presiones elevadas. En este caso la viscosidad se obtendrá por las Figuras 1 y 2.

donde:  $P_c$  = Presión crítica  
 $T_c$  = Temperatura crítica  
 $P_r$  = Presión reducida  
 $T_r$  = Temperatura reducida  
 $\mu^o$  = Viscosidad a bajas presiones (puede ser un dato experimental o un valor calculado a partir de una ecuación de la teoría de los gases o nomogramas (Figura 1))  
 $\mu$  = Viscosidad a la presión y temperatura deseada  
 $\mu_c$  = Viscosidad crítica, la cual se obtendrá por las siguientes ecuaciones

$$\mu_c = 61,6 \cdot (M \cdot T_c)^{1/2} \cdot V_c^{-2/3}$$

$$\mu_c = 7,70 \cdot M^{1/2} \cdot P_c^{2/3} \cdot T_c^{-1/6}$$

donde:  $\mu_c$  en micropoises  
 $P_c$  en atmosfera  
 $T_c$  en K  
 $V_c$  en  $\text{cm}^3/\text{mol}$

**Determinación de viscosidades de una mezcla a altas presiones**

Para calcular la viscosidad de una mezcla de n componentes a altas presiones, se utilizaran las figuras 3 y 4. Las propiedades pseudocríticas de la mezcla son definidas empíricamente por las ecuaciones

$$P_{cm} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{ci}$$

$$T_{cm} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot T_{ci}$$

$$\mu_{cm} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu_{ci}$$

## 4.2 Líquidos

- **Ecuación de Eyring:** (Válida para líquidos no polares, error  $\approx 25\%$ )

$$\mu = \xi \cdot h \cdot \exp\left(3,8 \cdot \frac{T_b}{T}\right)$$

donde:  $\mu$  = viscosidad (P)

$h$  = constante de Planck =  $6,624 \cdot 10^{-27}$  erg.s

$T_b$  = temperatura normal de ebullición (K)

$T$  = temperatura (K)

$$\xi = \frac{N}{V} = N \cdot \rho$$

con  $N$  = N° de Avogadro =  $6,023 \cdot 10^{23}$  (gmol)<sup>-1</sup>

$V$  = volumen molar (cm<sup>3</sup>/gmol)

$\rho$  = densidad molar (gmol/cm<sup>3</sup>)

- **Ecuación de Gambill:** (Para líquidos puros, orgánicos e inorgánicos a  $T_b$ )

$$\mu_b = 0,324 \cdot \rho_b^{1/2}$$

donde el subíndice b indica a la temperatura normal de ebullición.

- **Ecuación de Czerny:**

$$\mu = 0,0172 \cdot \frac{M^{0,5} \cdot P_c^{0,87}}{T_c^{0,167} \cdot P_v^{0,238}}$$

donde:

$\mu$  = viscosidad del líquido (cP)

$M$  = peso molecular

$P_c$  = presión crítica (atm)

$T_c$  = temperatura crítica (K)

$P_v$  = presión de vapor a la temperatura del líquido (mmHg)

- **Variación de la viscosidad de los líquidos con la temperatura:**

$$\mu = A \cdot e^{-BT}$$

A y B son constantes que se encuentran al ajustar datos a una curva para un líquido particular.



**- Mezcla de Líquidos:**

$$\mu_m^{1/3} = x_1 \cdot \mu_1^{1/3} + x_2 \cdot \mu_2^{1/3}$$

$x$  = fracciones molares.

Para la determinación de la viscosidad de líquidos se presenta un nomograma aplicable a presiones cercanas a la atmosférica (figura 2), cuyas coordenadas se encuentran en la tabla 7.

## 5. ANEXOS

### RELACIONES DE PRESION, VOLUMEN Y TEMPERATURA

Tabla 1. Parámetros del Potencial de Stockmayer

	Momento Dipolar $\mu$ , debyes	$\sigma$ , A	$\epsilon_0/k$ , K	$b_0$ , cm <sup>3</sup> /gmol	$t^*$	$\delta_{\max}$
H <sub>2</sub> O	1,85	2,52	775	20,2	0,7	1,0
NH <sub>3</sub>	1,47	3,15	358	39,5	0,5	0,7
HCl	1,08	3,36	328	47,8	0,24	0,34
HBr	0,80	3,41	417	50,0	0,10	0,14
HI	0,42	4,13	313	88,9	0,20	0,029
SO <sub>2</sub>	1,63	4,04	347	83,2	0,30	0,42
H <sub>2</sub> S	0,92	3,49	343	53,6	0,15	0,21
NOCl	1,83	3,53	690	55,5	0,3	0,4
CHCl <sub>3</sub>	1,013	5,31	355	189	0,05	0,07
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	1,57	4,52	483	117	0,14	0,2
CH <sub>3</sub> Cl	1,87	3,94	414	77,2	0,35	0,5
CH <sub>3</sub> Br	1,80	4,25	382	96,9	0,3	0,4
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	2,03	4,45	423	111	0,3	0,4
CH <sub>3</sub> OH	1,70	3,69	417	63,4	0,35	0,5
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1,69	4,31	431	101	0,2	0,3
n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	1,69	4,71	495	132	0,14	0,2
i-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	1,69	4,64	518	126	0,14	0,2
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	1,30	4,21	432	94,2	0,13	0,19
(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	1,15	5,49	362	209	0,06	0,08
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	1,20	3,82	428	70,1	0,9	1,3
CH <sub>3</sub> COOCH <sub>3</sub>	1,72	5,04	418	162	0,14	0,2
CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	1,78	5,24	499	182	0,11	0,16
CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	2,15	4,16	290	90,8	1,6	2,3

Notas:

$$b_0 = 2\pi N_0 \sigma^3 / 3 = 1,2615 \sigma^3$$

$$t^* = \mu^3 / 2\sqrt{2} \epsilon_0 \sigma^3$$

$$\delta_{\max} = 2^{1/2} t^*$$

$$\delta = \delta_{\max} / \mu$$

Tabla 2. Integrales de Colisión  $\Omega_v$  para viscosidad como se calcularon con el empleo del potencial de Stockmayer.

$$\delta = (\text{Momento dipolar})^2 / 2\epsilon_0\sigma^3$$

$$T^* = kT/\epsilon_0$$

$\frac{\delta}{T^*}$	0	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5
0,1	4,1005	4,266	4,833	5,742	6,729	8,624	10,34	11,89
0,2	3,2626	3,305	3,516	3,914	4,433	5,570	6,637	7,618
0,3	2,8399	2,836	2,936	3,168	3,511	4,329	5,126	5,874
0,4	2,5310	2,522	2,586	2,749	3,004	3,640	4,282	4,895
0,5	2,2837	2,277	2,329	2,460	2,665	3,187	3,727	4,249
0,6	2,0838	2,081	2,130	2,243	2,417	2,862	3,329	3,786
0,7	1,9220	1,924	1,970	2,072	2,225	2,614	3,028	3,435
0,8	1,7902	1,795	1,840	1,934	2,070	2,417	2,788	3,156
0,9	1,6823	1,689	1,733	1,820	1,944	2,258	2,596	2,933
1,0	1,5929	1,601	1,644	1,725	1,838	2,124	2,435	2,746
1,2	1,4551	1,465	1,504	1,574	1,670	1,913	2,181	2,451
1,4	1,3551	1,365	1,400	1,461	1,544	1,754	1,989	2,228
1,6	1,2800	1,289	1,321	1,374	1,447	1,630	1,838	2,053
1,8	1,2219	1,231	1,259	1,306	1,370	1,532	1,718	1912
2,0	1,1757	1,184	1,209	1,251	1,307	1,451	1,618	1,795
2,5	1,0933	1,100	1,119	1,150	1,193	1,304	1,435	1,578
3,0	1,0388	1,044	1,059	1,083	1,117	1,204	1,310	1,428
3,5	0,99963	1,004	1,016	1,035	1,062	1,133	1,220	1,319
4,0	0,96988	0,9732	0,9830	0,9991	1,021	1,079	1,153	1,236
5,0	0,92676	0,9291	0,9369	0,9473	0,9628	1,005	1,058	1,121
6,0	0,89616	0,8979	0,9030	0,9114	0,9230	0,9545	0,9955	1,044
7,0	0,87272	0,8741	0,8780	0,8845	0,8935	0,9181	0,9505	0,9893
8,0	0,85379	0,8549	0,8580	0,8632	0,8703	0,8901	0,9164	0,9482
9,0	0,83795	0,8388	0,8414	0,8456	0,8515	0,8678	0,8895	0,9160
10,0	0,82435	0,8251	0,8273	0,8308	0,8356	0,8493	0,8676	0,8901
12,0	0,80184	0,8024	0,8039	0,8065	0,8101	0,8201	0,8337	0,8504
14,0	0,78363	0,7840	0,7852	0,7872	0,7899	0,7976	0,8081	0,8212
16,0	0,76834	0,7687	0,7696	0,7712	0,7733	0,7794	0,7878	0,7983
18,0	0,75518	0,7554	0,7562	0,7575	0,7592	0,7642	0,7711	0,7797
20,0	0,74364	0,7438	0,7445	0,7455	0,7470	0,7512	0,7569	0,7612
25,0	0,71982	0,7200	0,7204	0,7211	0,7221	0,7250	0,7289	0,7339
30,0	0,70097	0,7011	0,7014	0,7019	0,7026	0,7047	0,7076	0,7112
35,0	0,68545	0,6855	0,6858	0,6861	0,6867	0,6883	0,6905	0,6932
40,0	0,67232	0,6724	0,6726	0,6728	0,6733	0,6745	0,6762	0,6781
50,0	0,65099	0,6510	0,6512	0,6513	0,6516	0,6524	0,6534	0,6546
75,0	0,61397	0,6141	0,6143	0,6145	0,6147	0,6148	0,6148	0,6142
100,0	0,53870	0,5889	0,5891	0,5900	0,5903	0,5901	0,5895	0,5883

Tabla 3. Potenciales de Lennard-Jones determinados a partir de datos de viscosidad

Molécula	Compuesto	$b_0$ , cm <sup>3</sup> /gmol	$\sigma$ , Å	$\varepsilon_0/k$ , °K
A	Argón	46,08	3,542	93,3
He	Helio	20,95	2,551	10,22
Kr	Criptón	61,62	3,655	178,9
Ne	Neón	28,30	2,820	32,8
Xe	Xenón	83,66	4,047	231,0
Aire	Aire	64,50	3,711	78,6
AsH <sub>3</sub>	Arsina	89,88	4,145	259,8
BCl <sub>3</sub>	Cloruro de Boro	170,1	5,127	337,7
BF <sub>3</sub>	Fluoruro de Boro	93,35	4,198	186,3
B(OCH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>	Borato Metílico	210,3	5,503	396,7
Br <sub>2</sub>	Bromo	100,1	4,296	507,9
CCl <sub>4</sub>	Tetracloruro de Carbono	265,5	5,947	322,7
CF <sub>4</sub>	Tetrafluoruro de Carbono	127,9	4,662	134,0
CHCl <sub>3</sub>	Cloroformo	197,5	5,389	340,2
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Cloruro de metileno	148,3	4,898	356,3
CH <sub>3</sub> Br	Bromuro de metilo	88,14	4,118	449,2
CH <sub>3</sub> Cl	Cloruro de Metilo	92,31	4,182	350
CH <sub>3</sub> OH	Metanol	60,17	3,626	481,8
CH <sub>4</sub>	Metano	66,98	3,758	148,6
CO	Monóxido de Carbono	63,41	3,690	91,7
COS	Sulfuro de Carbonilo	88,91	4,130	336,0
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono	77,25	3,941	195,2
CS <sub>2</sub>	Disulfuro de Carbono	113,7	4,483	467
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetileno	82,79	4,033	231,8
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno	91,06	4,163	224,7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etano	110,7	4,443	215,7
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	Cloruro etílico	148,3	4,898	300
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Etanol	117,3	4,530	362,6
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	Cianógeno	104,7	4,361	348,6
CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	Eter metílico	100,9	4,307	395,0
CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>	Propileno	129,2	4,678	298,9
CH <sub>3</sub> CCH	Metilacetileno	136,2	4,761	251,8
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Ciclopropano	140,2	4,807	248,9
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propano	169,2	5,118	237,1
n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	Alcohol n-propílico	118,8	4,549	576,7
CHCOCH <sub>3</sub>	Acetona	122,8	4,600	560,2

Potenciales de Lennard-Jones determinados a partir de datos de viscosidad (Continuación Tabla 3)

Molécula	Compuesto	$b_0$ , cm <sup>3</sup> /gmol	$\sigma$ , Å	$\epsilon_0/k$ , °K
CH <sub>3</sub> COOCH <sub>3</sub>	Acetato metílico	151,8	4,936	469,8
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-Butano	130,0	4,687	531,4
Iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Isobutano	185,6	5,278	330,1
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	Eter etílico	231,0	5,678	313,8
CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	Acetato etílico	178,0	5,205	521,3
n-C <sub>2</sub> H <sub>12</sub>	n-Pentano	244,2	5,784	341,1
C(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	2,2-Dimetilpropano	340,9	6,464	193,4
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benceno	193,2	5,349	412,3
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	Ciclohexano	298,2	6,182	297,1
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-hexano	265,7	5,949	399,3
Cl <sub>2</sub>	Cloro	94,65	4,217	316,0
F <sub>2</sub>	Fluor	47,75	3,357	112,6
HBr	Acido bromhídrico	47,58	3,353	449
HCN	Acido cianhídrico	60,37	3,630	569,1
HCl	Acido clorhídrico	46,98	3,339	344,7
HF	Acido fluorhídrico	39,37	3,148	330
HI	Acido yodhídrico	94,24	4,211	288,7
H <sub>2</sub>	Hidrógeno	28,51	2,827	59,7
H <sub>2</sub> O	Agua	23,25	2,641	809,1
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrógeno	93,24	4,196	289,3
H <sub>2</sub> S	Acido sulfhídrico	60,02	3,623	301,1
Hg	Mercurio	33,03	2,969	750
HgBr <sub>2</sub>	Bromuro mercúrico	165,5	5,080	686,2
HgCl <sub>2</sub>	Cloruro mercúrico	118,9	4,550	750
HgI <sub>2</sub>	Yoduro mercúrico	224,6	5,625	695,6
I <sub>2</sub>	Yodo	173,4	5,160	474,2
NH <sub>3</sub>	Amoníaco	30,78	2,900	558,3
NO	Oxido nítrico	53,74	3,492	116,7
NOCl	Cloruro de nitrosilo	87,75	4,112	395,3
N <sub>2</sub>	Nitrógeno	69,14	3,798	71,4
N <sub>2</sub> O	Oxido nitroso	70,80	3,828	232,4
O <sub>2</sub>	Oxígeno	52,60	3,467	106,7
PH <sub>3</sub>	Fosfina	79,63	3,981	251,5
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre	170,2	5,128	222,1
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre	87,75	4,112	335,4
SiF <sub>4</sub>	Tetrafluoruro de silicio	146,7	4,880	171,9
SiH <sub>4</sub>	Hidruro de silicio	85,97	4,084	207,6
SnBr <sub>4</sub>	Bromuro estánico	329,0	6,388	563,7
UF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de uranio	268,1	5,967	236,8

Tabla 4. Valores de la integral de colisión  $\Omega_v$  para la viscosidad y de la función de temperatura y viscosidad  $f_1(kT/\epsilon_0)$  Basados en el potencial de Lennard-Jones.

$T^* =$ $kT/\epsilon_0$	$\Omega_v$	$f_1(kT/\epsilon_0)$	$kT/\epsilon_0$	$\Omega_v$	$f_1(kT/\epsilon_0)$	$kT/\epsilon_0$	$\Omega_v$	$f_1(kT/\epsilon_0)$
0,30	2,785	0,1969	1,65	1,264	1,0174	4,0	0,9700	2,0719
0,35	2,628	0,2252	1,70	1,248	1,0453	4,1	0,9649	2,1090
0,40	2,492	0,2540	1,75	1,234	1,0729	4,2	0,9600	2,1457
0,45	2,368	0,2834	1,80	1,221	1,0999	4,3	0,9553	2,1820
0,50	2,257	0,3134	1,85	1,209	1,1264	4,4	0,9507	2,2180
0,55	2,156	0,3440	1,90	1,197	1,1529	4,5	0,9464	2,2536
0,60	2,065	0,3751	1,95	1,186	1,1790	4,6	0,9422	2,2888
0,65	1,982	0,4066	2,00	1,175	1,2048	4,7	0,9382	2,3237
0,70	1,908	0,4384	2,10	1,156	1,2558	4,8	0,9343	2,3583
0,75	1,841	0,4704	2,20	1,138	1,3057	4,9	0,9305	2,3926
0,80	1,780	0,5025	2,30	1,122	1,3547	5,0	0,9269	2,4264
0,85	1,725	0,5346	2,40	1,107	1,4028	6,0	0,8963	2,751
0,90	1,675	0,5566	2,50	1,093	1,4501	7,0	0,8727	3,053
0,95	1,629	0,5985	2,60	1,081	1,4962	8,0	0,8538	3,337
1,00	1,587	0,6302	2,70	1,069	1,5417	9,0	0,8379	3,607
1,05	1,549	0,6616	2,80	1,058	1,5861	10	0,8242	3,866
1,10	1,514	0,6928	2,90	1,048	1,6298	20	0,7432	6,063
1,15	1,482	0,7237	3,00	1,039	1,6728	30	0,7005	7,880
1,20	1,452	0,7544	3,10	1,030	1,7154	40	0,6718	9,488
1,25	1,424	0,7849	3,20	1,022	1,7573	50	0,6504	10,958
1,30	1,399	0,8151	3,30	1,014	1,7983	60	0,6335	12,324
1,35	1,375	0,8449	3,40	1,007	1,8388	70	0,6194	13,615
1,40	1,353	0,8744	3,50	0,9999	1,8789	80	0,6076	14,839
1,45	1,333	0,9026	3,60	0,9932	1,9186	90	0,5973	16,010
1,50	1,314	0,9325	3,70	0,9870	1,9576	100	0,5882	17,137
1,55	1,296	0,9611	3,80	0,9811	1,9962	200	0,5320	26,80
1,60	1,279	0,9894	3,90	0,9755	2,0343	400	0,4811	41,90

$$b_0 = 2\pi N_0 \sigma^3 / 3$$

El potencial  $\sigma$  se determinó con fórmulas de mecánica cuántica.

Tabla 5.1. Viscosidades de fracciones de petróleo  
Para rangos de temperatura empleados en el texto las coordenadas deberán usarse con la figura 2:

	X	Y
75°API gasolina natural	14,4	6,4
56°API gasolina	14,0	10,5
42°API kerosén	11,6	16,0
35°API destilado	10,0	20,0
34°API crudo continental	10,3	21,3
28°API gas-oil	10,0	23,6

Tabla 5.2. Viscosidades de aceites animales y vegetales (figura 2)

	Acido No.	Grav.Esp. 20/4°C	X	Y
Almendra	2,85	0,9188	6,9	28,2
Coco	0,01	0,9226	6,9	26,9
Hígado de bacalao	----	0,9138	7,7	27,7
Algodón	14,24	0,9187	7,0	28,0
Lardo	3,39	0,9138	7,0	28,2
Linaza	3,42	0,9297	6,8	27,5
Mostaza	----	0,9237	7,0	28,5
Aceite de manitas	18,35	0,9158	6,5	28,0
Oliva	----	0,9158	6,6	28,3
Aceite de Palma	9,0	0,9190	7,0	26,9
Perilla, Crudo	1,36	0,9297	8,1	27,8
Nabo	0,34	0,9114	7,0	28,8
Sardina	0,57	0,9384	7,7	27,8
Soya	3,50	0,9228	8,3	27,8
Esperma	0,80	0,8820	7,7	26,8
Girasol	2,79	0,9207	7,5	27,0
Ballena, refinado	0,78	0,9227	7,5	27,5

Tabla 5.3. Viscosidades de ácidos grasos comerciales 250 a 400°F (figura 2)

	Grav.Esp. a 300°F	X	Y
Láurico	0,792	10,1	23,1
Oleico	0,799	10,0	25,2
Palmítico	0,780	9,2	25,9
Estéarico	0,789	10,5	25,5

Tabla 6. Propiedades Críticas de diferentes compuestos.

Compound	T <sub>C</sub> (K)	P <sub>C</sub> (atm)	V <sub>C</sub> (cm <sup>3</sup> /gmol)	Z <sub>C</sub>	W
Acetileno	308.3	60.6	113	0.271	0.184
Benceno	562.1	48.3	259	0.271	0.210
1,3-Butadieno	425.0	42.7	221	0.270	0.181
Clorobenceno	632.4	44.6	308	0.265	0.255
Ciclohexano	553.4	40.2	308	0.273	0.214
Diclorodifluorometano(freon-12)	385.0	40.7	217	0.279	0.158
Dietil eter	467.7	35.9	280	0.262	0.283
Etanol	516.2	63	167	0.248	0.635
Oxido de etileno	469	71	140	0.259	0.157
Metanol	512.6	79.9	118	0.224	0.556
Cloruro de metilo	416.2	65.9	139	0.268	0.158
Methyl ethyl Ketone	535.6	41	267	0.249	0.337
Tolueno	591.7	40.6	316	0.264	0.257
Triclorofluorometano (freon-11)	471.2	43.5	248	0.279	0.295
Triclorotrifluoroetano (freon-113)	487.2	33.7	304	0.257	0.249
Gases elementales					
Argon	150.8	48.1	74.9	0.291	0.0
Bromo	584	102	127	0.270	0.132
Cloro	417	76	124	0.275	0.074
Helium	5.2	2.24	57.3	0.301	0.0
Hidrógeno	33.2	12.8	65	0.305	0.0
Kripton	209.4	54.3	91.2	0.287	0.0
Neon	44.4	27.2	41.7	0.311	0.0
Nitrógeno	126.2	33.5	89.5	0.290	0.040
Oxígeno	154.6	49.8	73.4	0.288	0.021
Xenón	289.7	57.6	118	0.286	0.0
Compuestos inorgánicos					
Amoníaco	405.6	111.3	72.5	0.242	0.250
Dióxido de carbono	304.2	72.8	94	0.274	0.225
Disulfuro de carbono	552	78	160	0.28	0.123
Monóxido de carbono	132.9	34.5	93.1	0.295	0.041
Tetracloruro de carbono	556.4	45	276	0.272	0.193
Cloroformo	536.4	54	239	0.293	0.214
Hidrazina	653	145	....	....	0.337
Cloruro de hidrógeno	324.6	82	81	0.25	0.266



Continuación de la tabla 6.

Compuesto	T <sub>C</sub> (K)	P <sub>C</sub> (atm)	V <sub>C</sub> (cm <sup>3</sup> /gmol)	Z <sub>C</sub>	W
Cianuro de hidrógeno	456.8	53.2	139	0.197	0.399
Sulfuro de hidrógeno	373.2	88.2	98.5	0.284	0.100
Oxido nítrico (NO)	180	64	58	0.25	0.600
Oxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	309.6	71.5	97.4	0.274	0.160
Azufre	1314	116	....	....	0.070
Dióxido de azufre	430.8	77.8	122	0.268	0.273
Trióxido de azufre	491	81	130	0.26	0.510
Agua	674.1	217.6	56	0.23	0.348
Parafinas:					
Metano	190.6	45.4	99	0.288	0.007
Etano	305.4	48.2	148	0.285	0.091
Propano	369.8	41.9	203	0.281	0.145
n-Butano	425.2	37.5	255	0.274	0.193
Isobutano	408.1	36	263	0.283	0.176
n-Pentano	469.6	33.3	304	0.262	0.251
Isopentano	460.4	33.4	306	0.273	0.227
Neopentano	433.8	31.6	303	0.269	0.197
n-Hexano	507.4	29.3	370	0.264	0.296
n-Heptano	540.2	27	432	0.263	0.351
n-Octano	568.8	24.5	492	0.259	0.394
Monoolefinas:					
Etileno	282.4	49.7	129	0.276	0.086
Propileno	365.0	45.6	181	0.275	0.148
1-Buteno	419.6	39.7	240	0.277	0.187
1-Penteno	464.7	40	....	....	0.245
Compuestos orgánicos:					
Acido acético	594.5	57.1	171	0.200	0.450
Acetona	508.2	46.4	209	0.232	0.318
Acetonitrilo	547.9	47.7	173	0.184	0.321

Tabla 7. Viscosidades de Líquidos (para usarse como coordenadas de la figura 2)

Líquido	X	Y	Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8	Cloruro Estánico	13.5	12.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5	Cresol, meta	2.5	20.8
Acetato de Butilo	12.3	11.0	Dibromoetano	12.7	15.8
Acetato de Etilo	13.7	9.1	Dicloroetano	13.2	12.2
Acetato de Metilo	14.2	8.2	Diclorometano	14.6	8.9
Acetato de Vinilo	14.0	8.8	Difenilo	12.0	18.3
Acetona 100%	14.5	7.2	Eter Etilico	14.5	5.3
Acetona 35%	7.9	15.0	Etilbenceno	13.2	11.5
Agua	10.2	13.0	Etilenglicol	6.0	23.6
Acido Acético 100%	12.1	14.2	Fenol	6.9	20.8
Acido Acético 70%	9.5	17.0	Formiato de Etilo	14.2	8.4
Acido Butírico	12.1	15.3	Freon 11	14.4	9.0
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1	Freon 12	16.8	5.6
Acido Fórmico	10.7	15.8	Freon 21	15.7	7.5
Acido Isobutírico	12.2	14.4	Freon 22	17.2	4.7
Acido Nítrico 95%	12.8	13.8	Freon 113	12.5	11.4
Acido Nítrico 60%	10.8	17.0	Freon 114	14.6	8.3
Acido Propiónico	12.8	13.8	Glicerina 100%	2.0	30.0
Acido Sulfúrico 110%	7.2	27.4	Glicerina 50%	6.9	19.6
Acido Sulfúrico 98%	7.0	24.8	Heptano	14.1	8.4
Acido Sulfúrico 60%	10.2	21.3	Hexano	14.7	7.0
Alcohol Alílico	10.2	14.3	Hidróxido de Sodio 50%	3.2	25.8
Alcohol Amílico	7.5	18.4	Yoduro de Etilo	14.7	10.3
Alcohol Butílico	8.6	17.2	Yoduro de Propilo	14.1	11.6
Alcohol Etilico 100%	10.5	13.8	Isobutano	14.5	3.7
Alcohol Etilico 95%	9.8	14.3	Mercurio	18.4	16.4
Alcohol Etilico 40%	6.5	16.6	Metanol 100%	12.4	10.5
Acido Clorhídrico 31.5%	13.0	16.6	Metanol 90%	12.3	11.8
Alcohol Isobutílico	7.1	18.0	Metanol 40%	7.8	15.5
Alcohol Isopropílico	8.2	16.0	Metiletilcetona	13.9	8.6
Alcohol Octílico	6.2	21.1	Naftaleno	7.9	18.1
Alcohol Propílico	9.1	16.5	Nitrobenceno	10.6	16.2
Amoniaco 100%	12.6	2.0	Nitrotolueno	11.0	17.0
Amoniaco 26%	10.1	13.9	Octano	13.7	10.0
Anhidrico Acético	12.7	12.8	Oxalato de Dietilo	11.0	16.4
Anilina	8.1	18.7	Oxalato de Dimetilo	12.3	15.8
Anisol	12.3	13.5	Oxalato de Dipropilo	10.3	17.7
Benceno	12.5	10.9	Pentacloroetano	10.9	17.3
Bióxido de Azufre	15.2	7.1	Pentano	14.9	5.2
Bióxido de Carbono	11.6	0.3	Propano	15.3	1.0
Bisulfuro de Carbono	16.1	7.5	Salmuera $C_aCl_2$ 25%	6.6	15.9
Bromo	14.2	13.2	Salmuera $N_aCl$ 25%	10.2	16.6
Líquido	X	Y	Líquido	X	Y
Bromotolueno	20.0	15.9	Sodio	16.4	13.9
Bromuro de Etilo	14.5	8.1	Tetracloroetano	11.9	15.7
Bromuro de Propilo	14.5	9.6	Tetracloroetileno	14.2	12.7
n-Butano	15.3	3.3	Tetracloruro de Carbono	12.7	13.1
Ciclohexanol	2.9	24.3	Tetracloruro de Titanio	14.4	12.3
Clorobenceno	12.3	12.4	Tribromuro de Fósforo	13.8	16.7
Cloroformo	14.4	10.2	Tricloruro de Arsénico	13.9	14.5

Continuación de la tabla 7.

Clorotolueno. Orto	13.0	13.3	Tricloruro de Fósforo	16.2	10.9
Clorotolueno, meta	13.3	12.5	Tricloroetileno	14.8	10.5
Clorotolueno, para	13.3	12.5	Tolueno	13.7	10.4
Cloruro de Etilo	14.8	6.0	Turpentina	11.5	14.9
Cloruro de Metilo	15.0	3.8	Xileno, orto	13.5	12.1
Cloruro de Propilo	14.4	7.5	Xileno, meta	13.9	12.1
Cloruro de Sulfurilo	15.2	12.4	Xileno, para	13.9	10.9

Tabla 8. Viscosidades de Gases (para usarse como coordenadas de la figura 1)

Gas	X	Y
Acetato de Etilo	8.5	13.2
Acetona	8.9	13.0
Acetileno	9.8	14.9
Acido acético	7.7	14.3
Agua	8.0	16.0
Aire	11.0	20.0
Alcohol Etilico	9.2	14.2
Alcohol Metílico	8.5	15.6
Alcohol Propílico	8.4	13.4
Amoniaco	8.4	16.0
Argón	10.5	22.4
Benceno	8.5	13.2
Bromo	8.9	19.2
Buteno	9.2	13.7
Butileno	8.9	13.0
Bióxido de Azufre	9.6	17.0
Bióxido de Carbono	9.5	18.7
Bisulfuro de Carbono	8.0	16.0
Bromuro de Hidrógeno	8.8	20.9
Cianógeno	9.2	15.2
Ciclohexano	9.2	12.0
Cianuro de Hidrógeno	9.8	14.9
Cloro	9.0	18.4
Cloroformo	8.9	15.7
Cloruro de Etilo	8.5	15.6
Cloruro de Hidrógeno	8.8	18.7
Cloruro de Nitrosilo	8.0	17.6
Etano	9.1	14.5
Eter Etilico	8.9	13.0
Etileno	9.5	15.1
Flúor	7.3	23.8
Freon 11	10.6	15.1
Freon 12	11.1	16.0
Freon 21	10.8	15.3
Freon 22	10.1	17.0
Freon 113	11.3	14.0
Helio	10.9	20.5
Hexano	8.6	11.8
Hidrógeno	11.2	12.4
3H <sub>2</sub> + 1N <sub>2</sub>	11.2	17.2
Yodo	9.0	18.4
Gas	X	Y
Yoduro de Hidrógeno	9.0	21.3
Mercurio	5.3	22.9
Metano	9.9	15.5
Monóxido de Carbono	11.0	20.0
Nitrógeno	10.6	20.0
Oxido Nítrico	10.9	20.5
Oxido Nitroso	8.8	19.0
Oxígeno	11.0	21.3
Pentano	7.0	12.8

Continuación de la tabla 8.

Propano	9.7	12.9
Propileno	9.0	13.8
Sulfuro de Hidrógeno	8.6	18.0
Tolueno	8.6	12.4
2, 3, 3-trimetilbutano	9.5	10.5
Xenón	9.3	23.0

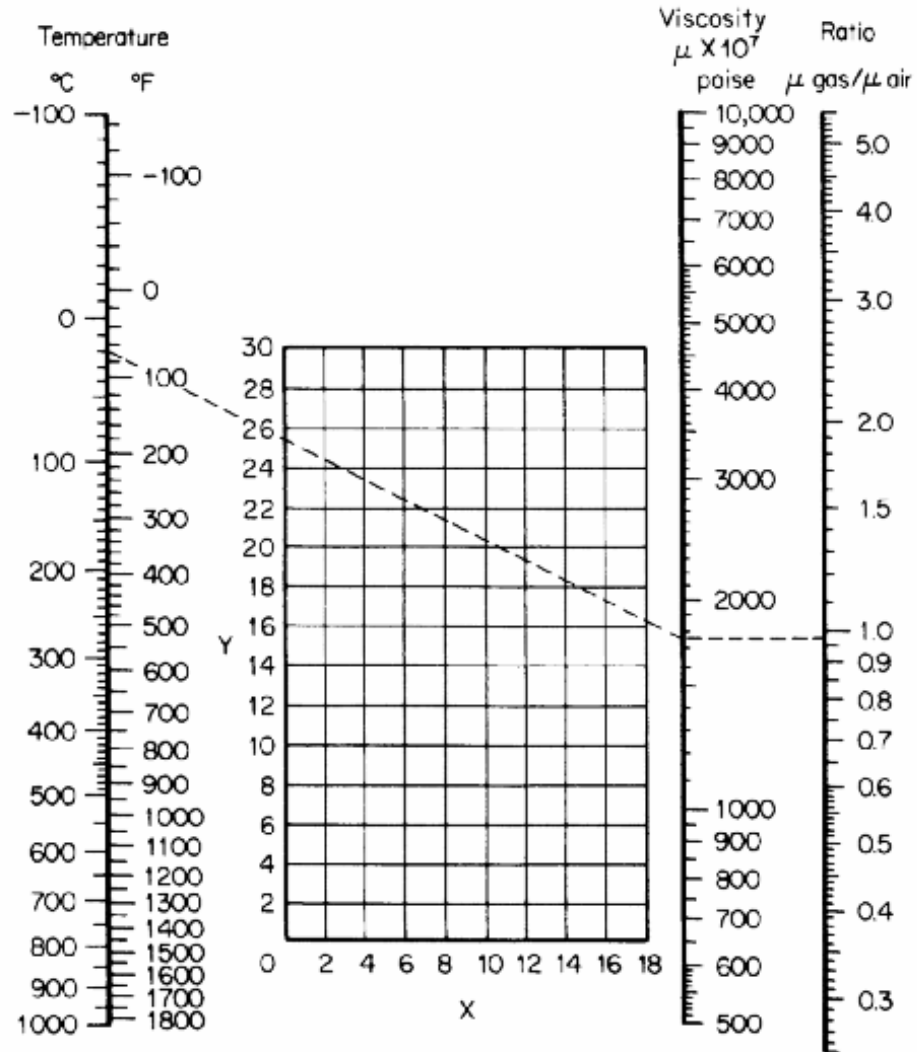


Figura 1. Nomograma para la predicción de la viscosidad de gases a presiones cercanas a la atmosférica.

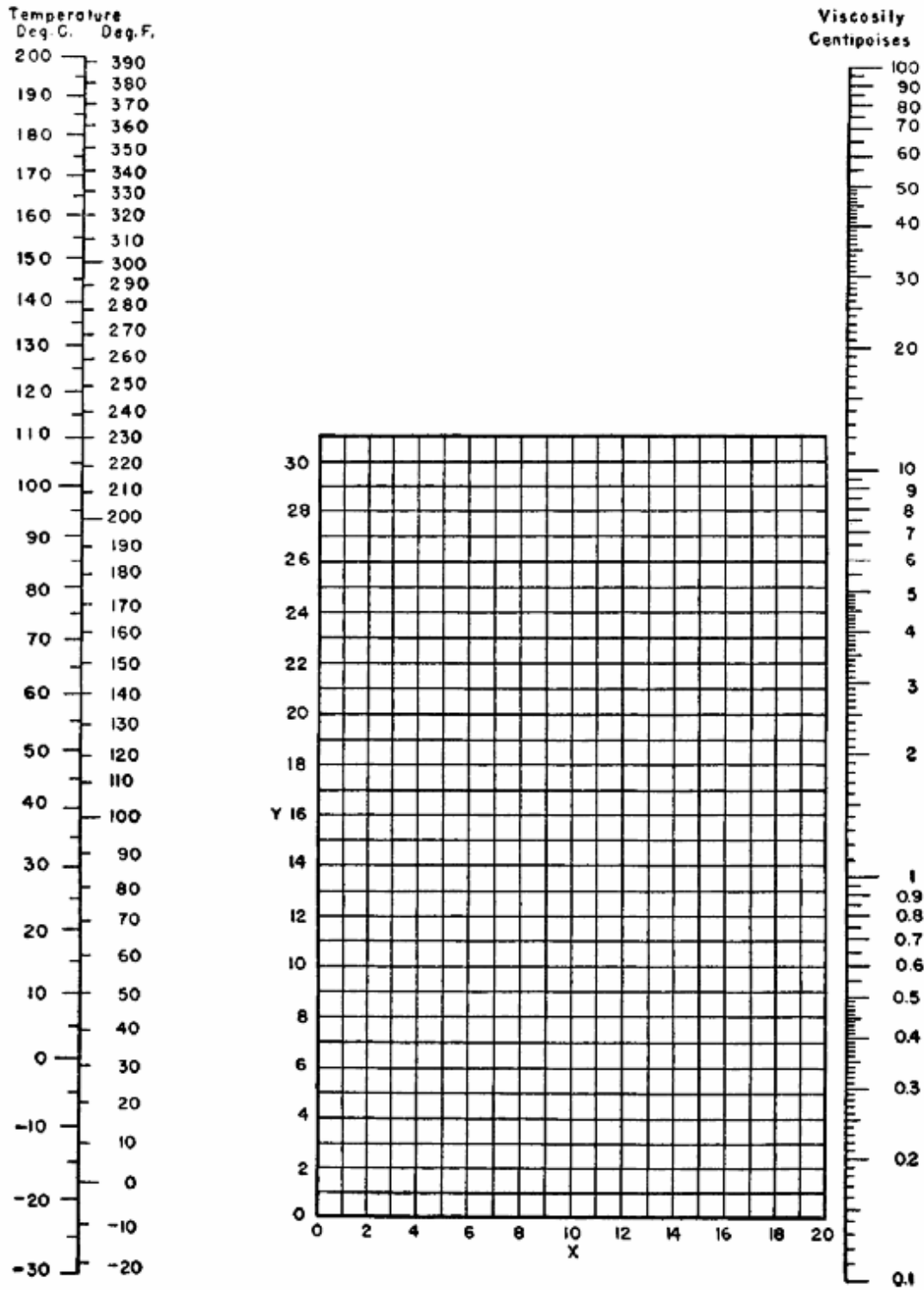


Figura 2. Nomograma para la predicción de la viscosidad de líquidos a 1 atm.

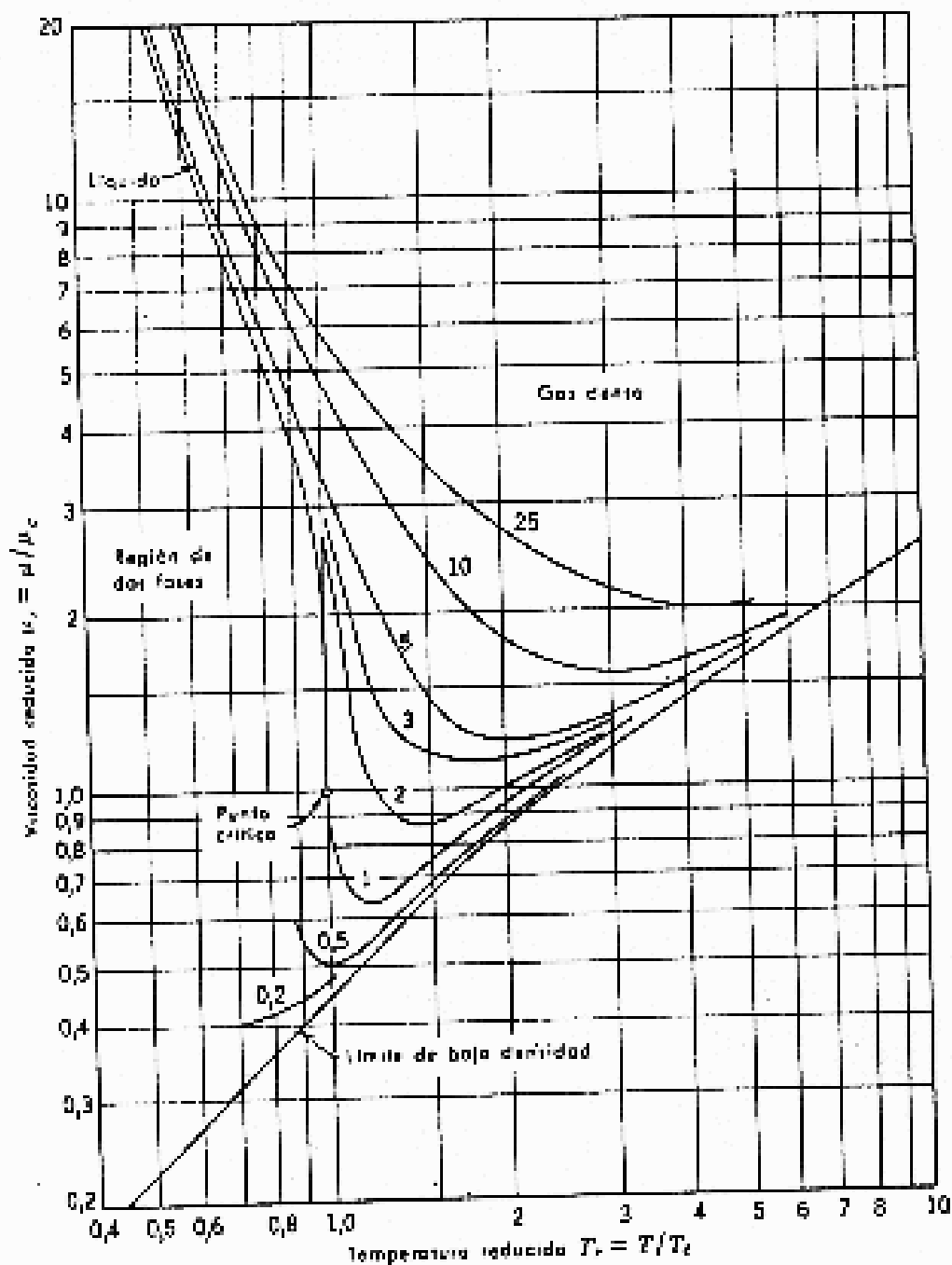


Fig. 1.3—1. Viscosidad reducida  $\mu_r = \mu/\mu_c$  en función de la temperatura reducida, para diversos valores de la presión reducida  $p_r = p/p_c$ . [O. A. Uyehara y K. M. Watson, *Nat. Petroleum News, Tech. Section* 36, 764 (Oct. 4, 1944); revisada por K. M. Watson (1960). Una versión a gran escala de este gráfico se inserta en O. A. Hougen, K. M. Watson y R. A. Ragatz, *C. P. P. Charts*, Wiley, Nueva York (1960), Segunda edición.]

Figura 3. Cálculo de la viscosidad de gases mediante propiedades reducidas.

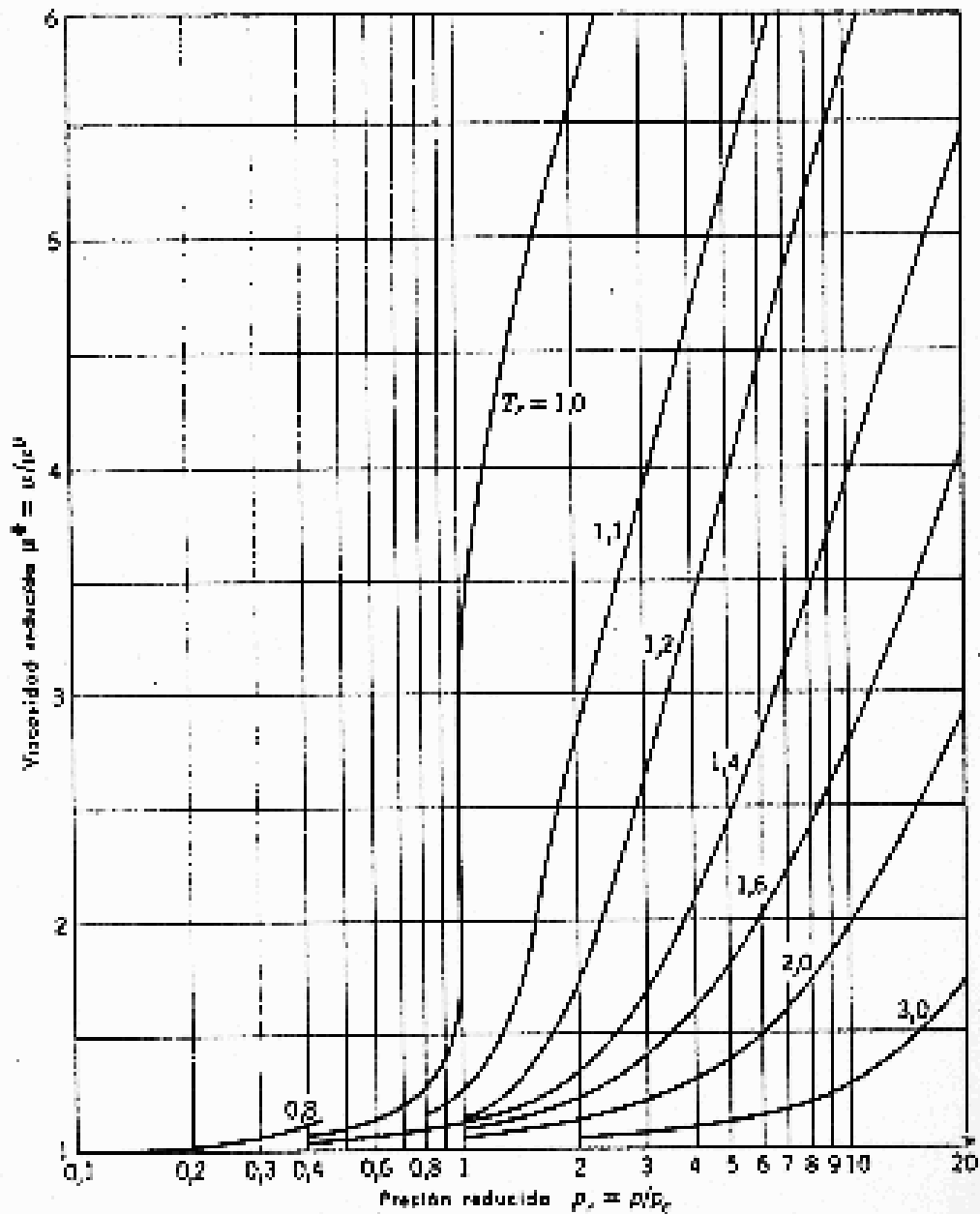


Fig. 1.3-1. Viscosidad reducida  $\mu^R = \mu/\mu^0$  en función de la presión reducida  $p_r = p/p_0$ , temperatura reducida  $T_r = T/T_0$ . [N. L. Carr, R. Kabayashi y D. B. Burroughs, *Am. Inst. & Mer. Engrs., Petroleum Tech.*, 6, 47 (1954).]

Figura 4. Cálculo de la viscosidad de gases mediante propiedades reducidas



## 6. BIBLIOGRAFIA

- Perry-Chilton, "Chemical Engineer's Handbook", 5ª edición, Mc Graw Hill, capítulo 3.
- Reid, R. y T. Sherwood, "Propiedades de los gases y líquidos: su estimación y correlación", Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, México (1968).
- Bird, R. B.; Stewart, W. E. y Lightfoot, E. N. "Fenómenos de Transporte", Editorial Reverté, Barcelona, España (1975).