



**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

## **“FLUIDOS DE RESERVATÓRIO”**

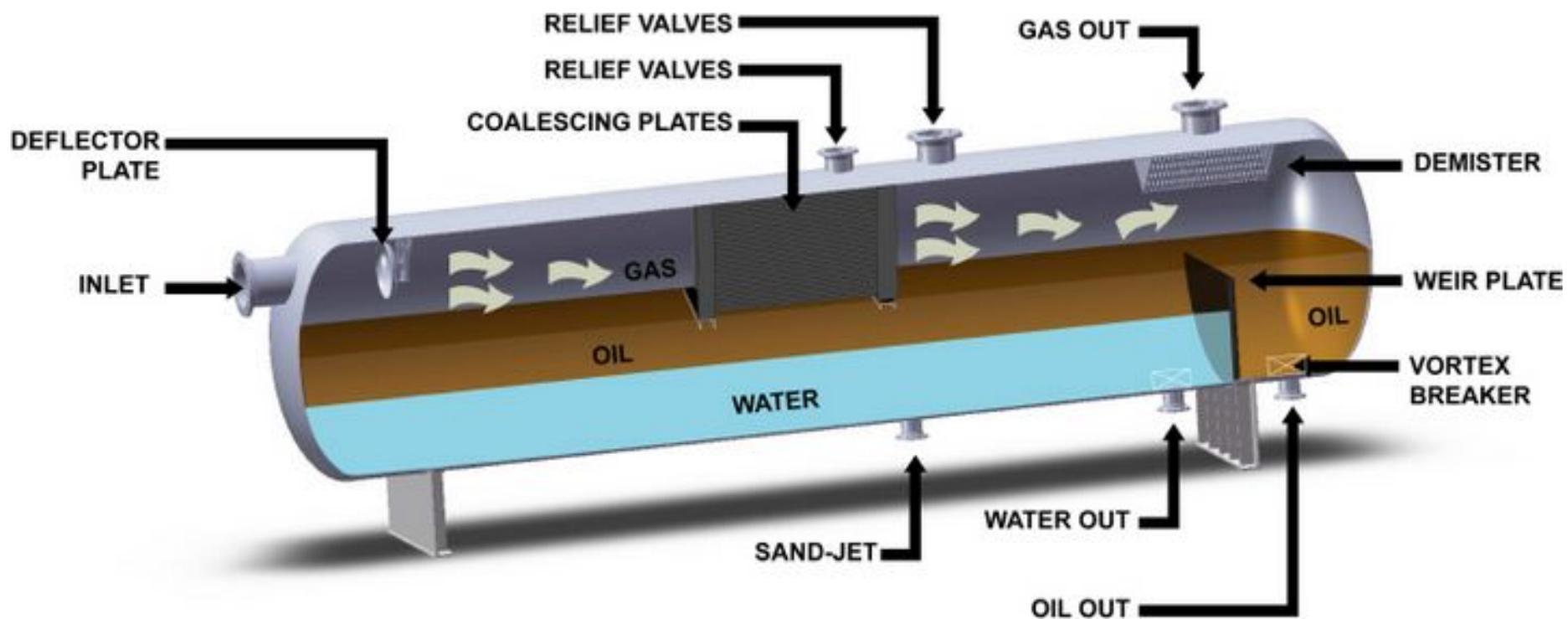
**PMI 1673 - Mecânica de Fluidos Aplicada a Reservatórios**

**Prof. Eduardo César Sansone**



## OBTENÇÃO DE AMOSTRAS PARA ENSAIO

- Amostragem em superfície.
- Amostragem em fundo de poço.
- Amostragem em teste da formação.

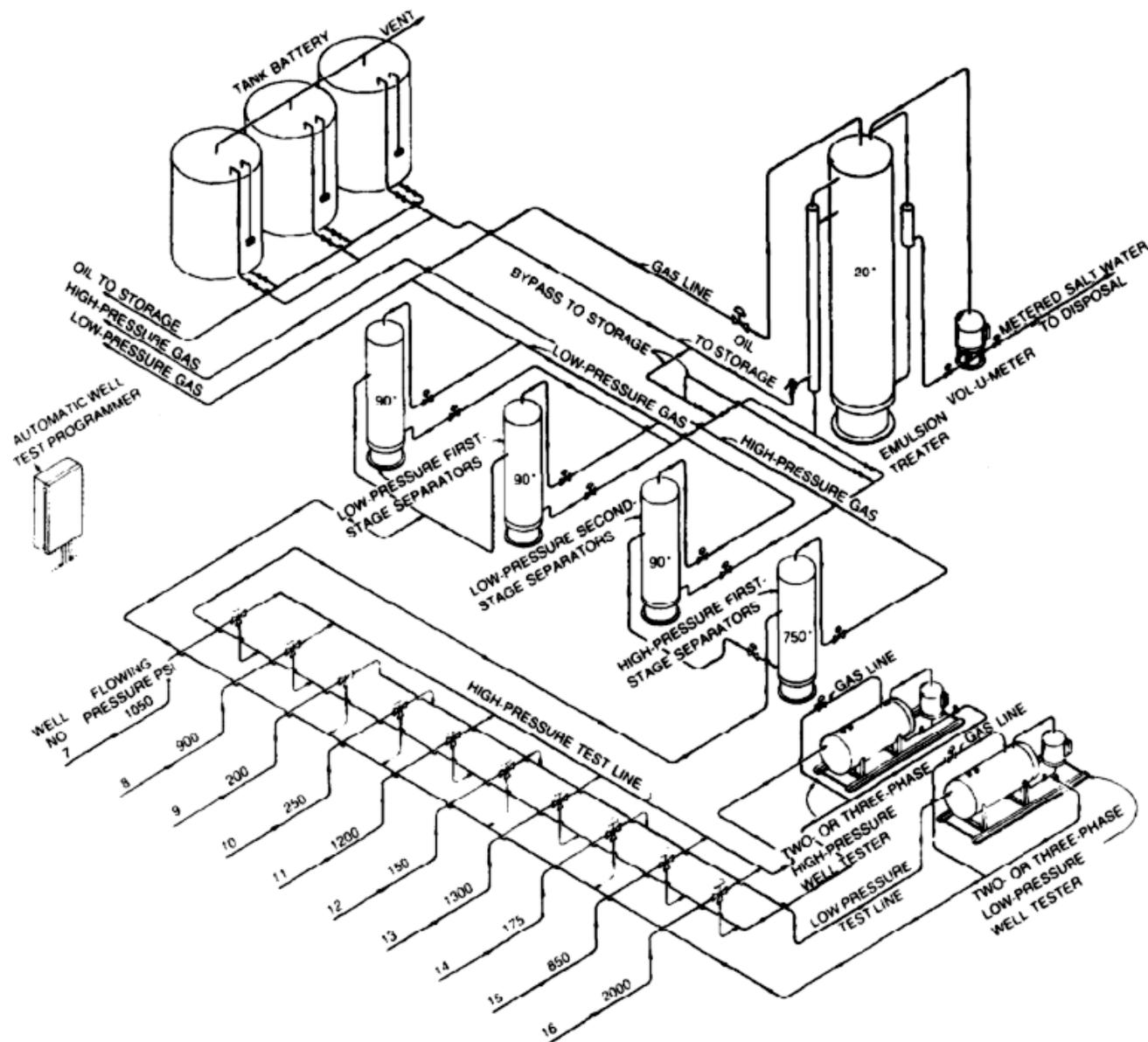


Separador água-óleo-gás



**Separador água-óleo-gás**

# AMOSTRAGEM EM SUPERFÍCIE



Sistema de processamento primário de óleo



## CARACTERÍSTICAS

- Amostras preservadas.
- Condições de reservatório.
- Amostragem seletiva.
- Amostragem no início da vida útil do reservatório com um mínimo de distúrbio.

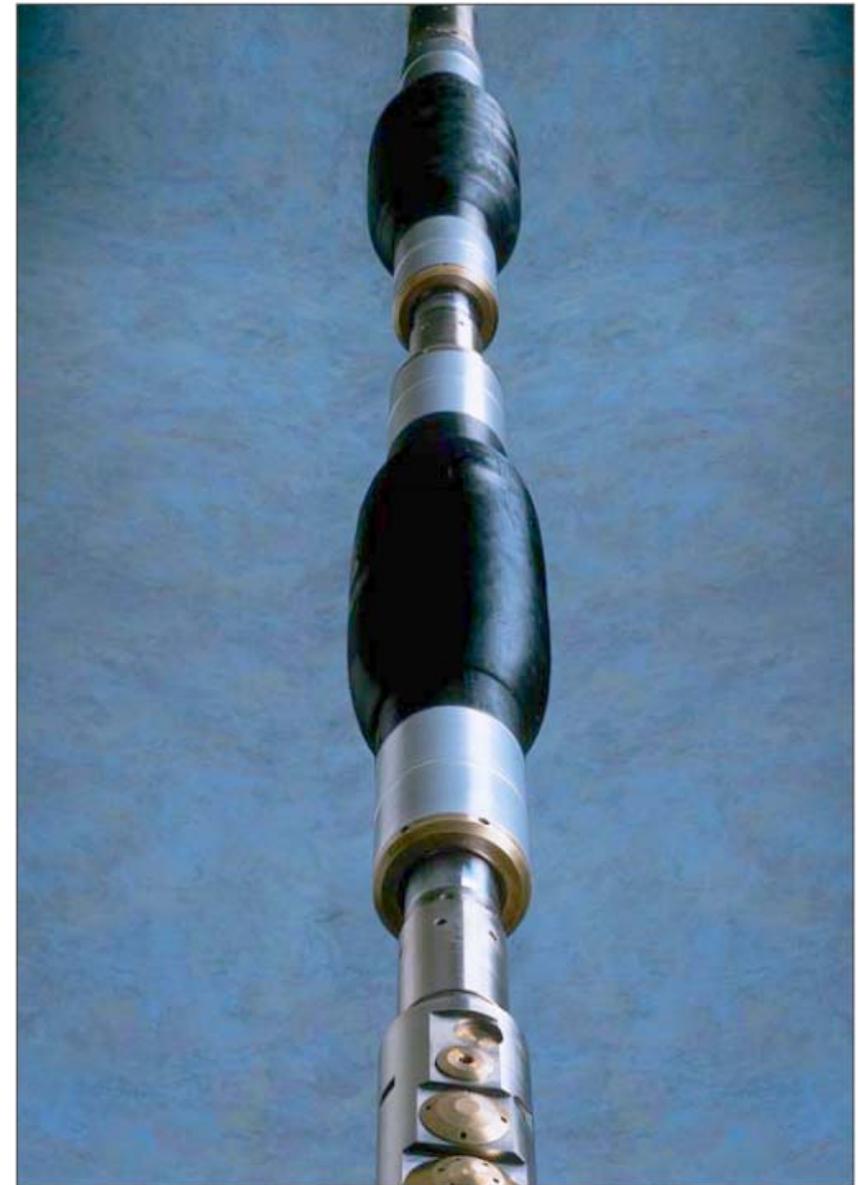


Cilindro amostrador PVT



## CARACTERÍSTICAS

- Avaliação direta da qualidade dos fluidos da formação.
- Monitoramento de contaminações.



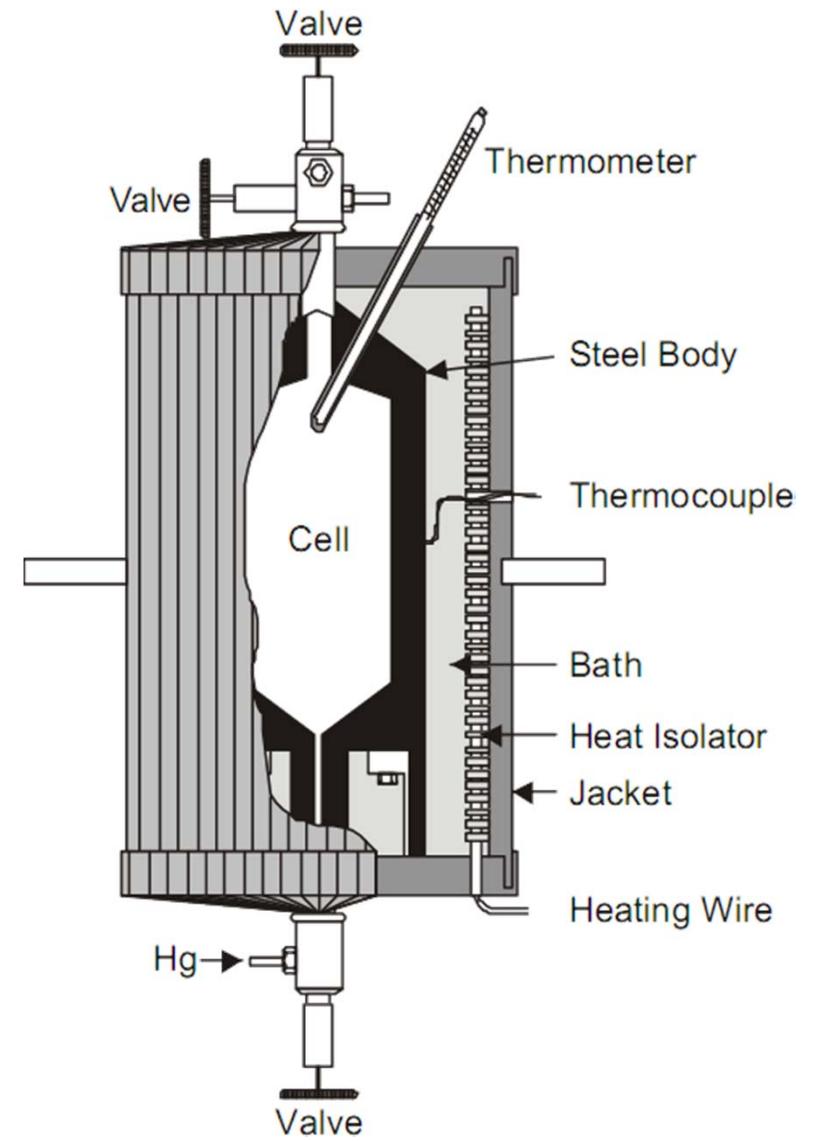
Equipamento para teste de formação



## ANÁLISES NORMALMENTE REALIZADAS

- Determinação da composição.
- Análise de contaminantes.
- Determinação de propriedades tecnológicas: Bo, Rs etc.
- Testes de compatibilidades de fluidos.
- Análises PVT (comportamento de fase).

# DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS



Equipamento para análises PVT



## **COMPORTAMENTO DE FASE NOS RESERVATÓRIOS**

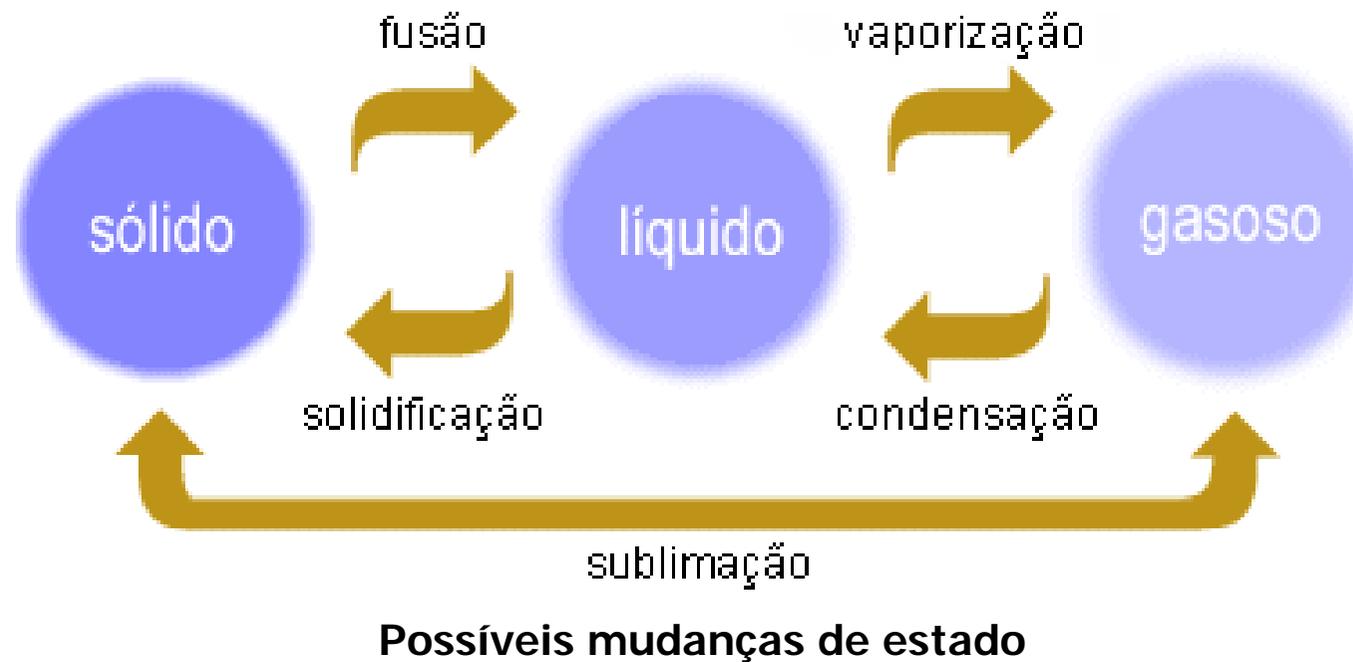


# MUDANÇAS DE ESTADO DOS FLUIDOS DE RESERVATÓRIO



O estudo de um reservatório com a finalidade da caracterização dos fluidos presentes e o estabelecimento de uma estratégia de produção envolve muitas dificuldades:

- Várias fases estão presentes.
- São esperadas mudanças de estado durante o processo de produção, na elevação e dentro do próprio reservatório.



# MUDANÇAS DE ESTADO DA ÁGUA A TEMPERATURA CONSTANTE

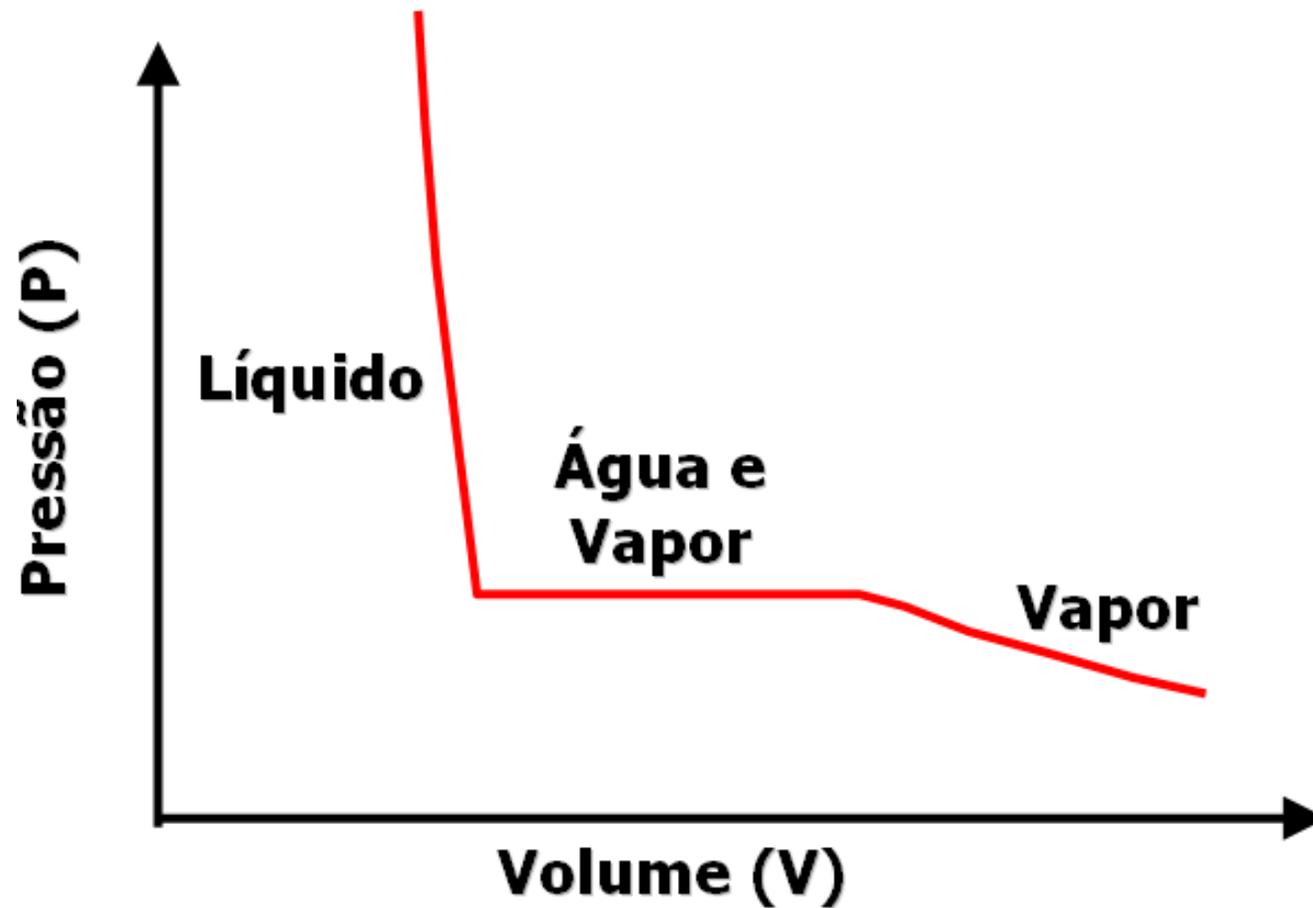


Diagrama P x V para a água a temperatura constante

# MUDANÇAS DE ESTADO DA ÁGUA

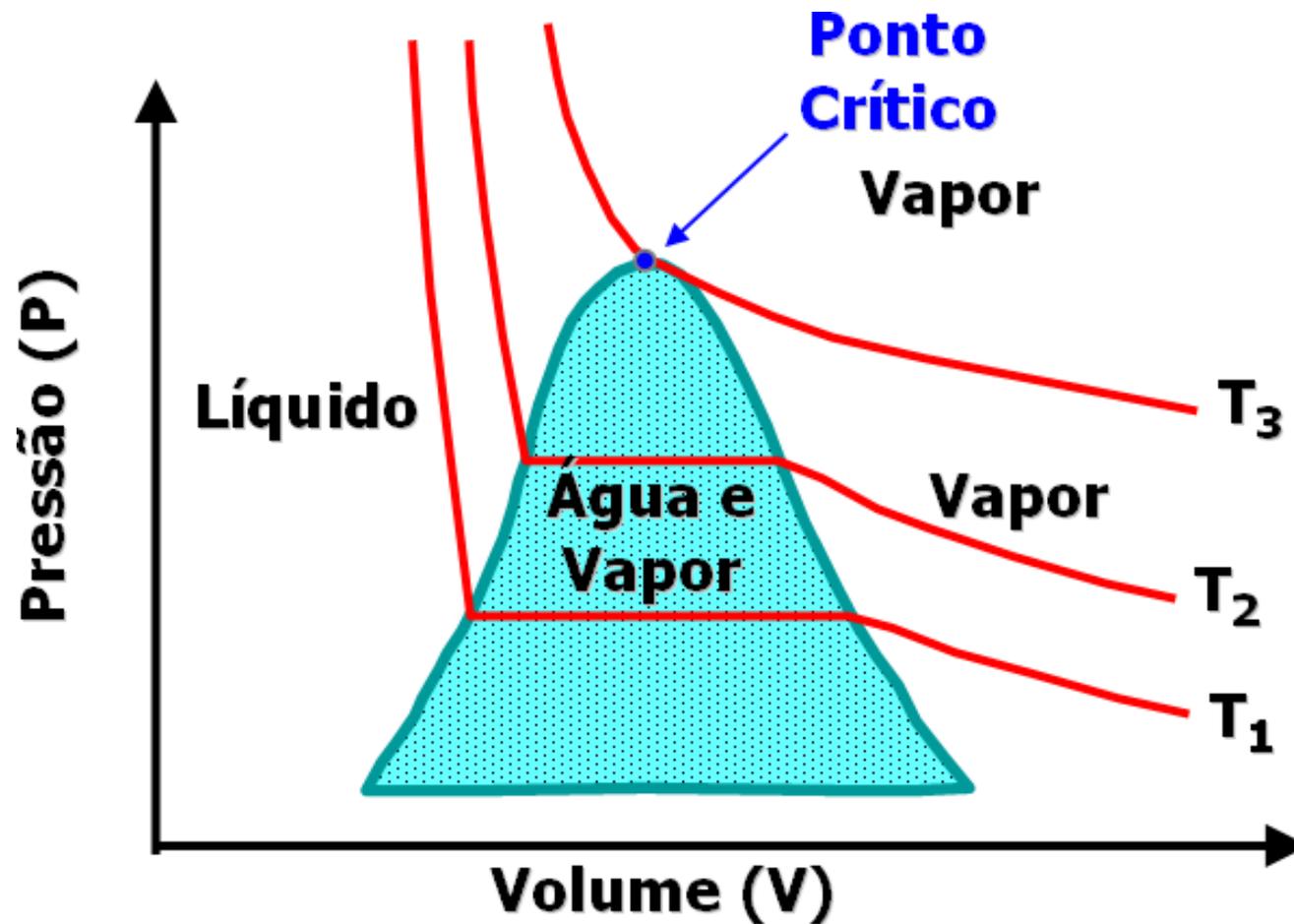


Diagrama P x V para a água para várias temperaturas

# DIAGRAMA PVT DA ÁGUA

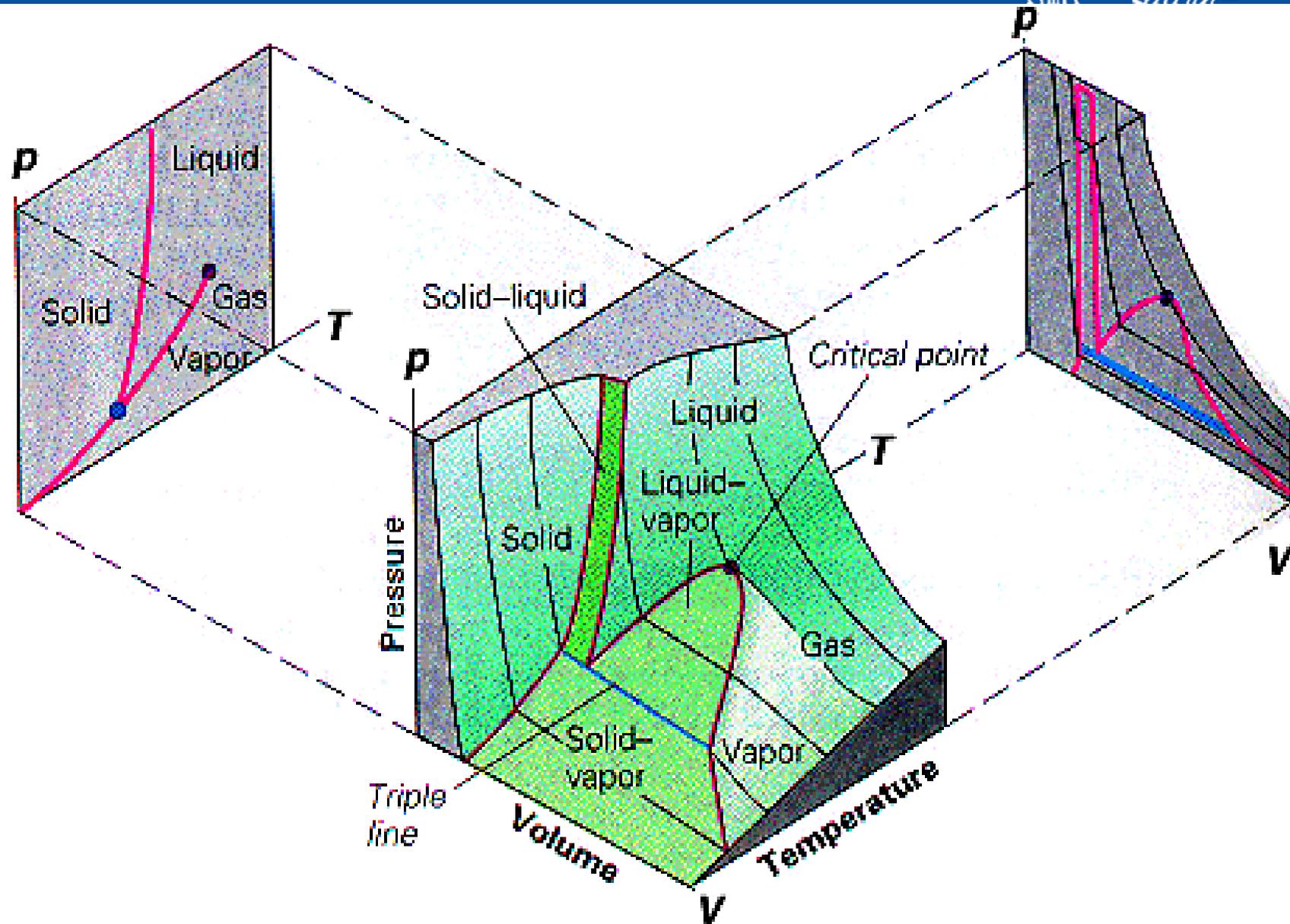


Diagrama  $P \times V \times T$  para a água

# DIAGRAMA DE ESTADO TÍPICO DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

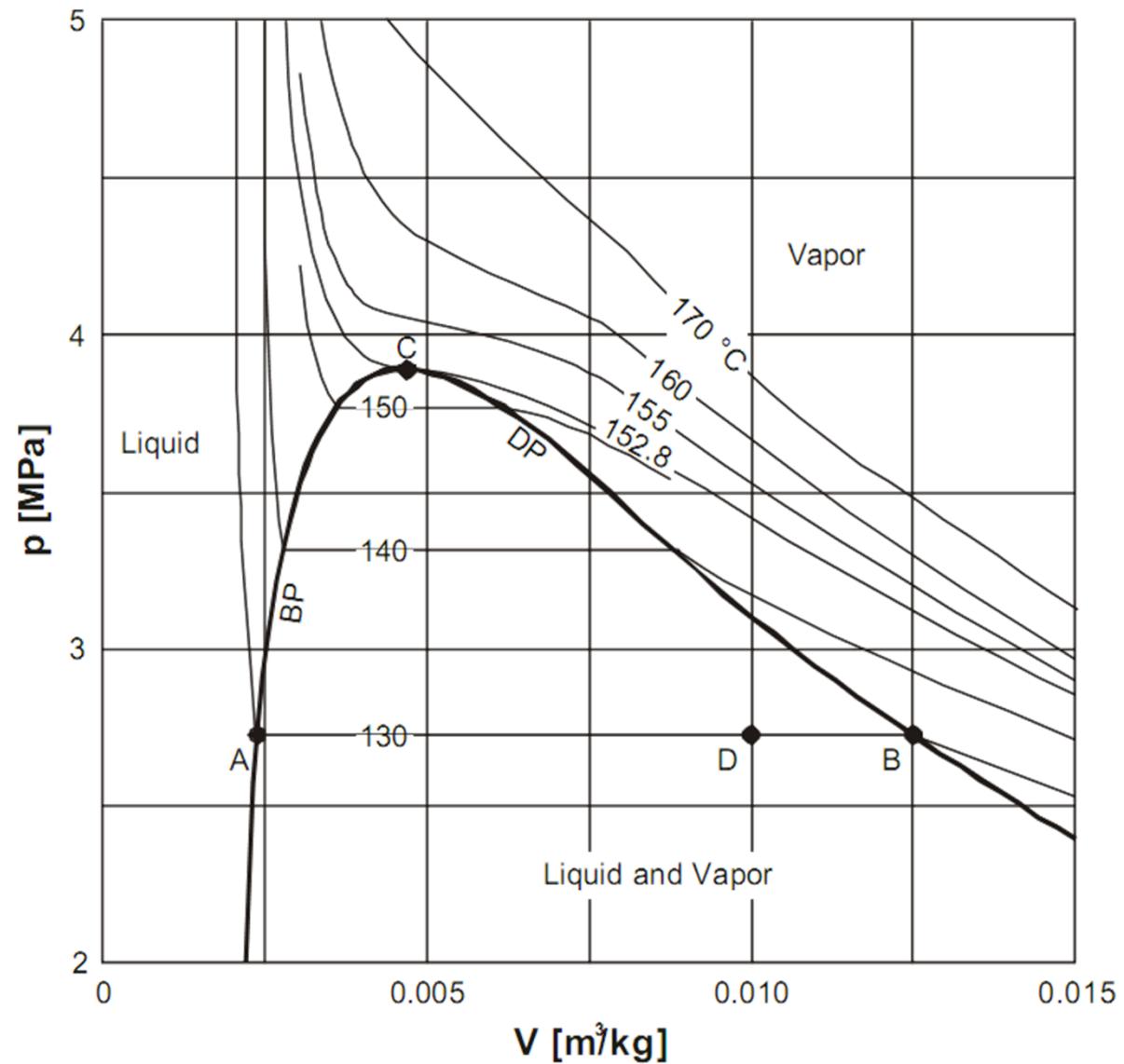


Diagrama P x V para o n-Butano segundo várias temperaturas



## **PROPRIEDADES FÍSICAS DE SUBSTÂNCIAS PURAS**



## LEI DOS GASES

$$PV = nRT$$

ou

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

Onde:  $R = 10,732 \frac{\text{psi ft}^3}{\text{lb mol } ^\circ\text{R}}$



## DENSIDADE DE UM GÁS

$$\rho_g = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT}$$

## PESO ESPECÍFICO DE UM GÁS

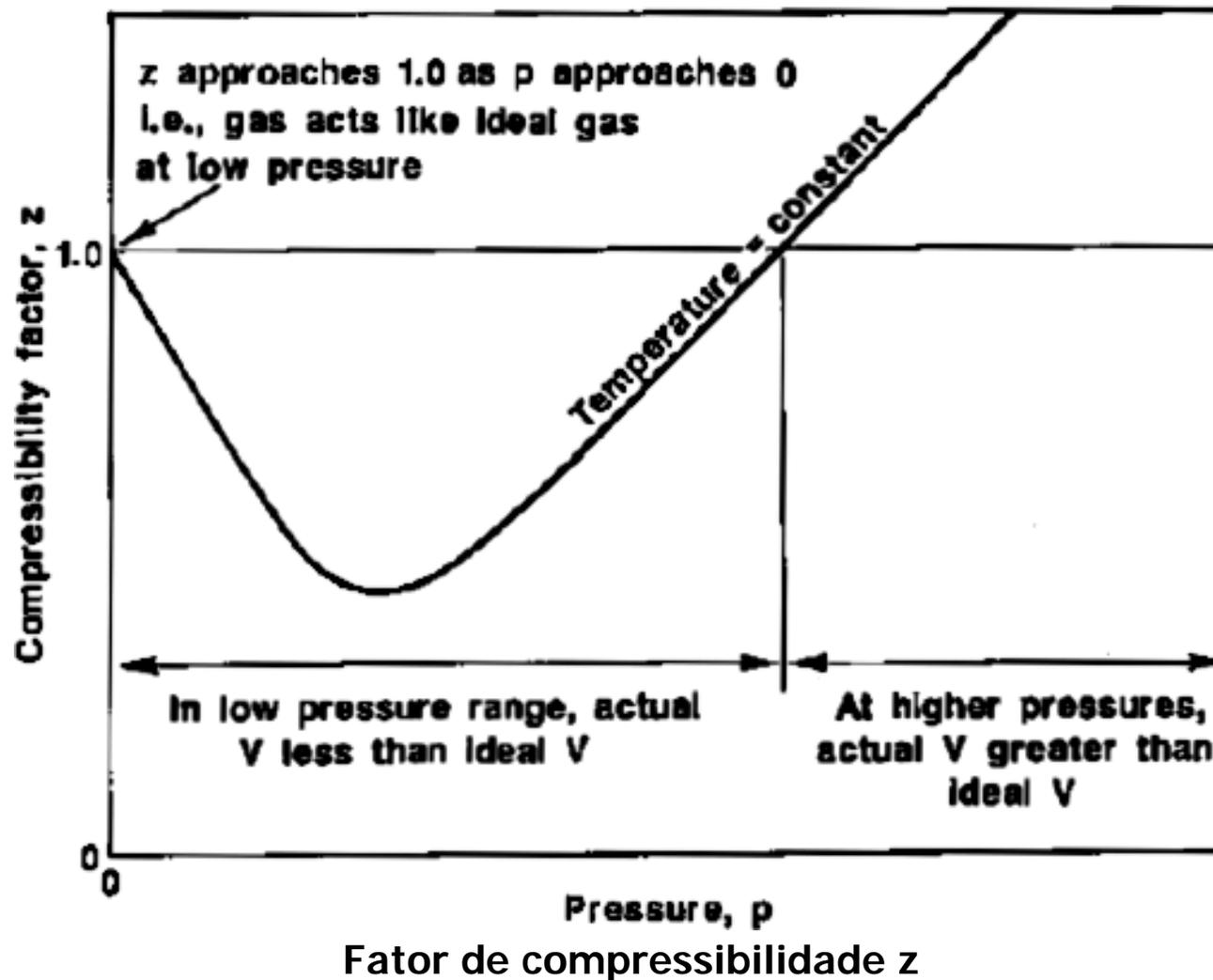
$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{ar}} = \frac{\frac{PM_g}{RT}}{\frac{PM_{ar}}{RT}} = \frac{M_g}{M_{ar}} = \frac{M_g}{28,96}$$

# COMPORTAMENTO DE GASES REAIS

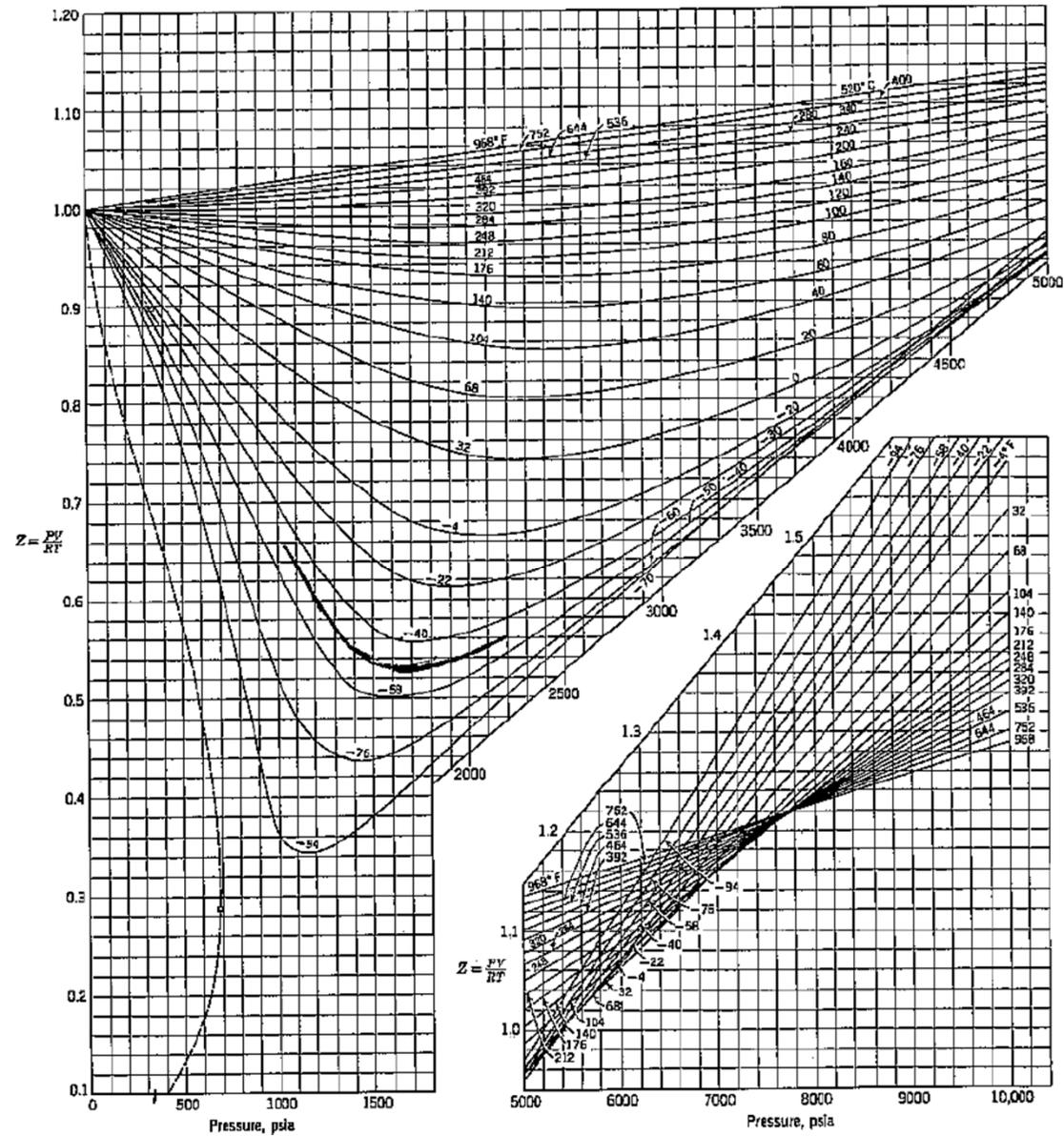


Equação de estado para um gás real:

$PV = znRT$ , onde:  $z$  = fator de compressibilidade

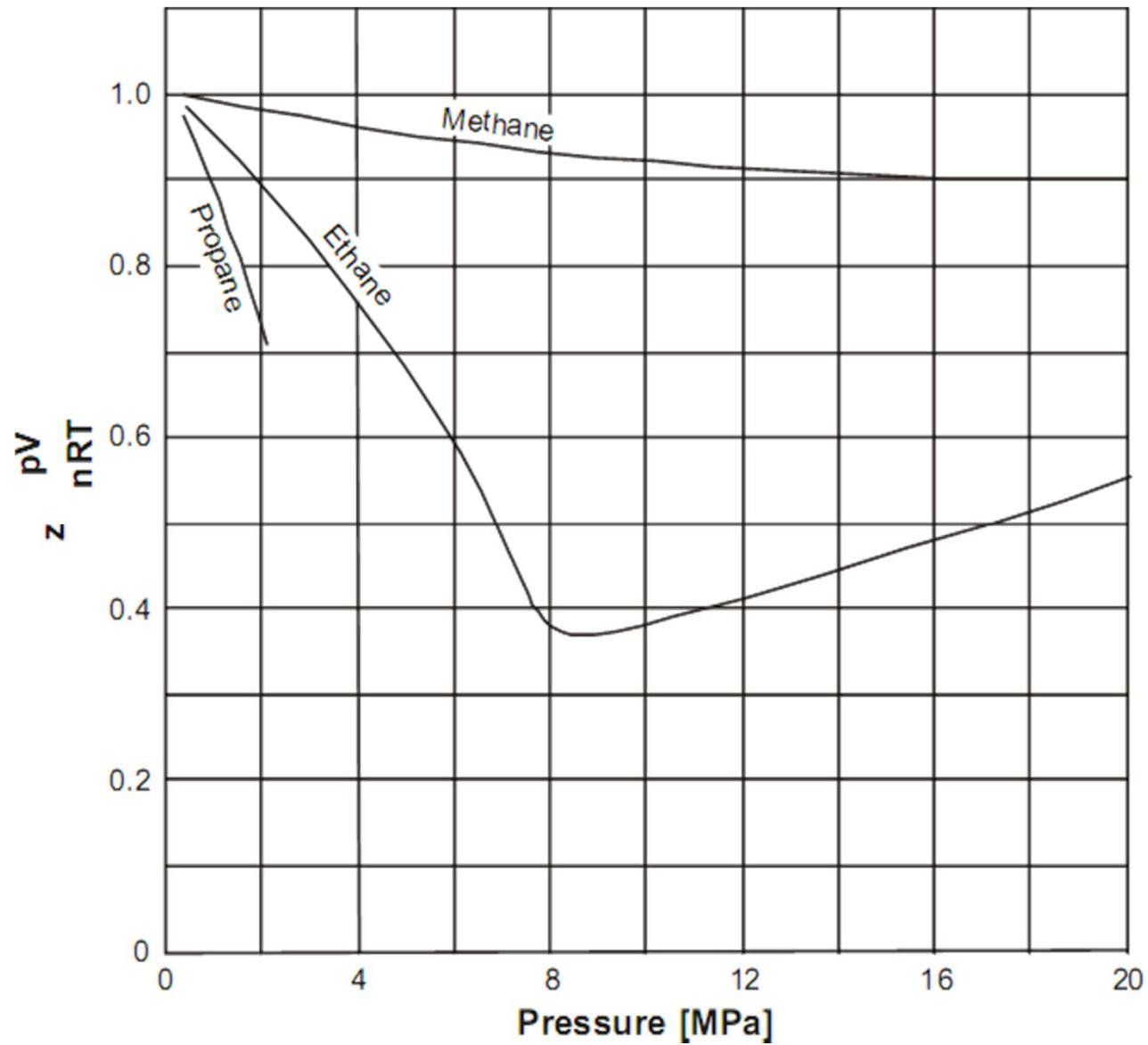


# FATOR DE COMPRESSIBILIDADE



Fator de compressibilidade para o metano

# FATOR DE COMPRESSIBILIDADE



Fator de compressibilidade para gases de reservatórios

# FATOR DE COMPRESSIBILIDADE PARA GASES DE RESERVATÓRIO



## LEI DOS ESTADOS CORRESPONDENTES

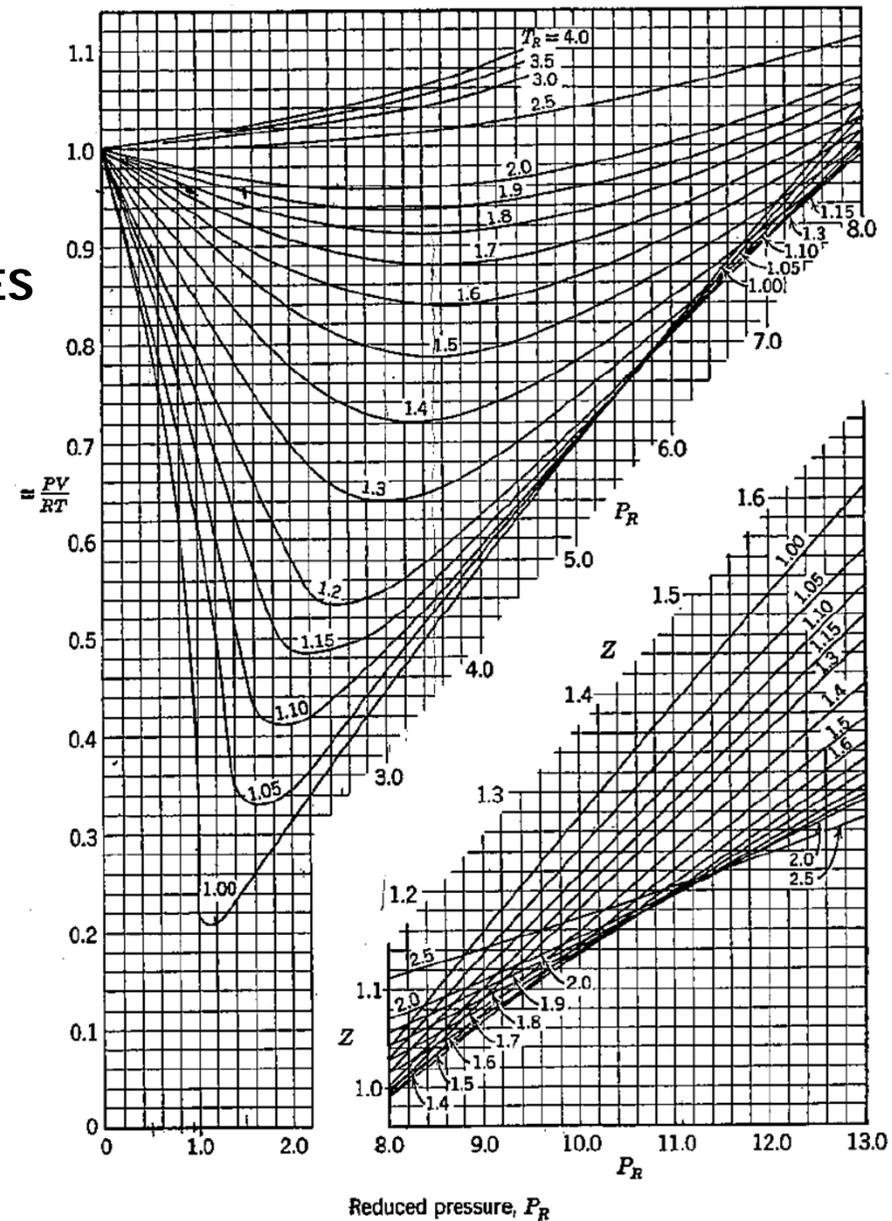
Cálculo da pressão e temperatura reduzidas:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad \text{e} \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

Onde:

$P_c$  = pressão crítica

$T_c$  = temperatura crítica



# FATOR DE COMPRESSIBILIDADE PARA GASES DE RESERVATÓRIO



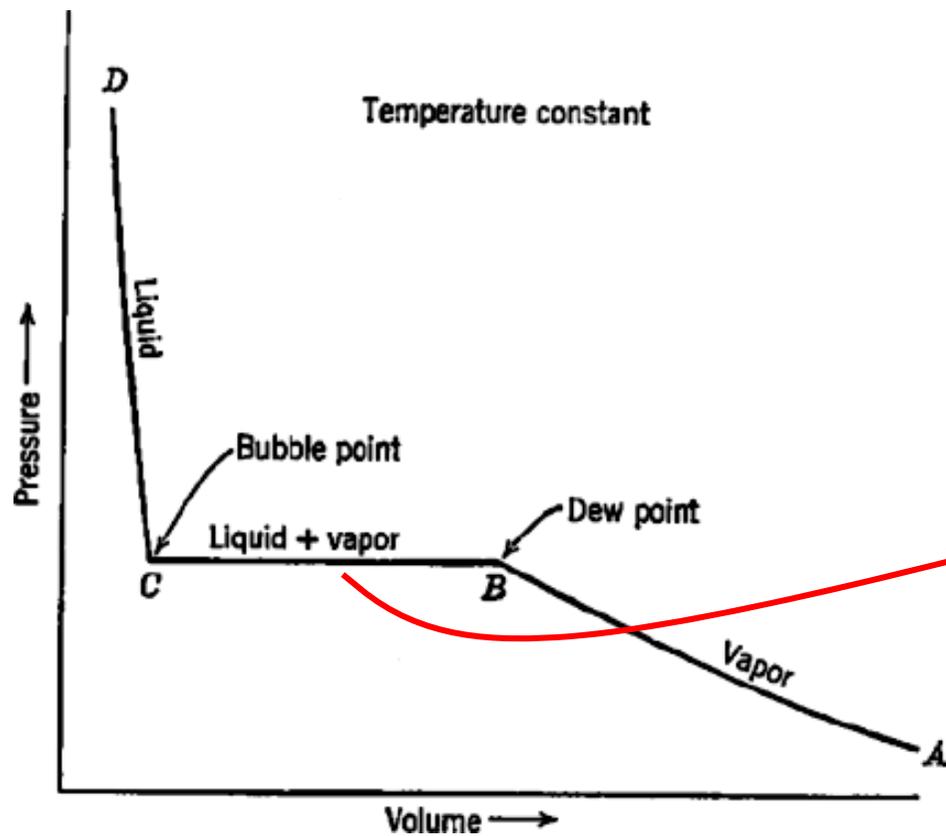
Number	Compound	Formula	A. Molar mass (molecular weight)	B. Boiling point, °F 14.696 psia	Vapor pressure, psia 100 °F	C. Freezing point, °F 14.696 psia	D. Refractive index, $n_D$ 60 °F	Critical constants			Number
								Pressure, psia	Temperature, °F	Volume, ft <sup>3</sup> /lbm	
1	Methane	CH <sub>4</sub>	16.043	-258.73	(5000)*	-296.44*	1.00042*	666.4	-116.67	0.0988	1
2	Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	-127.49	(800)*	-297.04*	1.20971*	708.5	89.92	0.0783	2
3	Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	-43.75	188.64	-305.73*	1.29480*	616.0	206.06	0.0727	3
4	Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	10.78	72.581	-255.28	1.3245*	527.9	274.46	0.0714	4
5	n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	31.08	51.706	-217.05	1.33588*	550.6	305.62	0.0703	5
6	Isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	82.12	20.445	-255.82	1.35631	490.4	369.10	0.0679	6
7	n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	96.92	15.574	-201.51	1.35992	488.6	385.8	0.0675	7
8	Neopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	49.10	36.69	2.17	1.342*	464.0	321.13	0.0673	8
9	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	155.72	4.9597	-139.58	1.37708	438.9	453.6	0.0688	9
10	2-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	140.47	6.769	-244.62	1.37387	436.6	435.83	0.0682	10
11	3-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	145.89	6.103		1.37888	453.1	448.4	0.0682	11
12	Neohexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	121.52	9.859	-147.72	1.37126	446.8	420.13	0.0667	12
13	2,3-Dimethylbutane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	136.36	7.406	-199.38	1.37730	453.5	440.29	0.0665	13
14	n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	209.16	1.620	-131.05	1.38989	398.8	512.7	0.0691	14
15	2-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	194.09	2.272	-180.89	1.38714	396.5	495.00	0.0673	15
16	3-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	197.33	2.131		1.39091	408.1	503.80	0.0646	16
17	3-Ethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	200.25	2.013	-181.48	1.39586	419.3	513.39	0.0665	17
18	2,2-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	174.54	3.494	-190.86	1.38446	402.2	477.23	0.0665	18
19	2,4-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	176.89	3.293	-182.63	1.38379	398.9	475.95	0.0668	19
20	3,3-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	186.91	2.774	-210.01	1.38564	427.2	505.87	0.0662	20
21	Triptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	177.58	3.375	-12.81	1.39168	428.4	496.44	0.0636	21
22	n-Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	258.21	0.53694	-70.18	1.39956	360.7	584.22	0.0690	22
23	Diisobutyl	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	228.39	1.102	-132.11	1.39461	360.8	530.44	0.0676	23
24	Isooctane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	210.63	1.709	-161.27	1.38624	372.4	519.46	0.0656	24

Propriedades físicas de substâncias puras

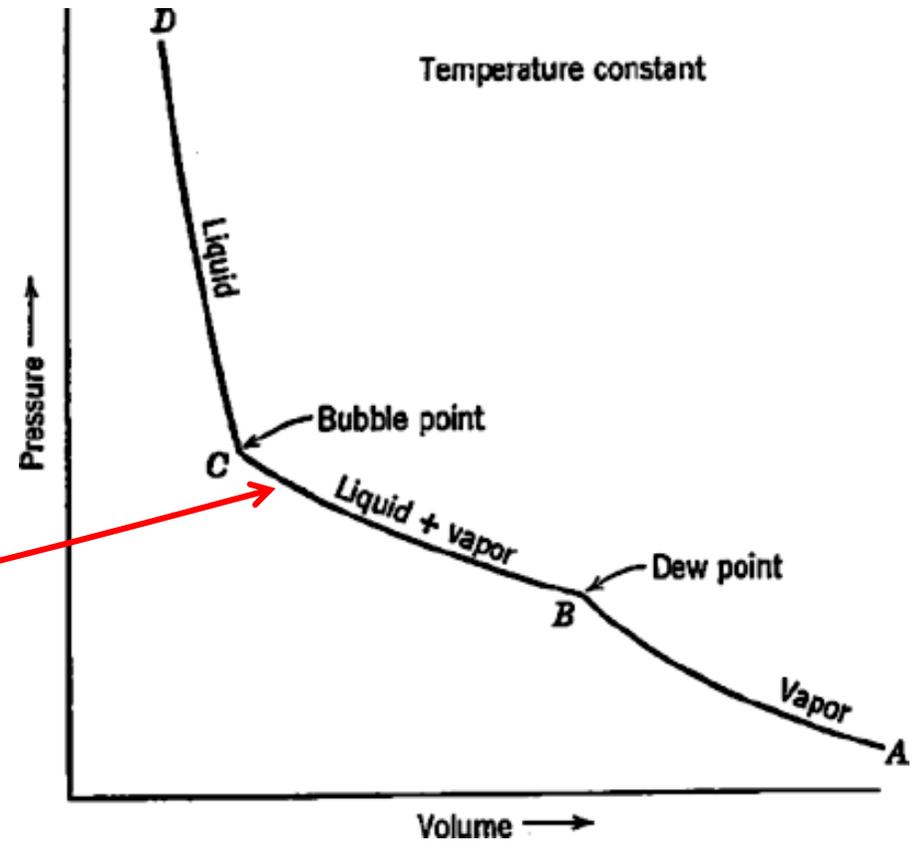


## **COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE SUBSTÂNCIAS**

# MUDANÇAS DE ESTADO DE UMA MISTURA DE DUAS SUBSTÂNCIAS

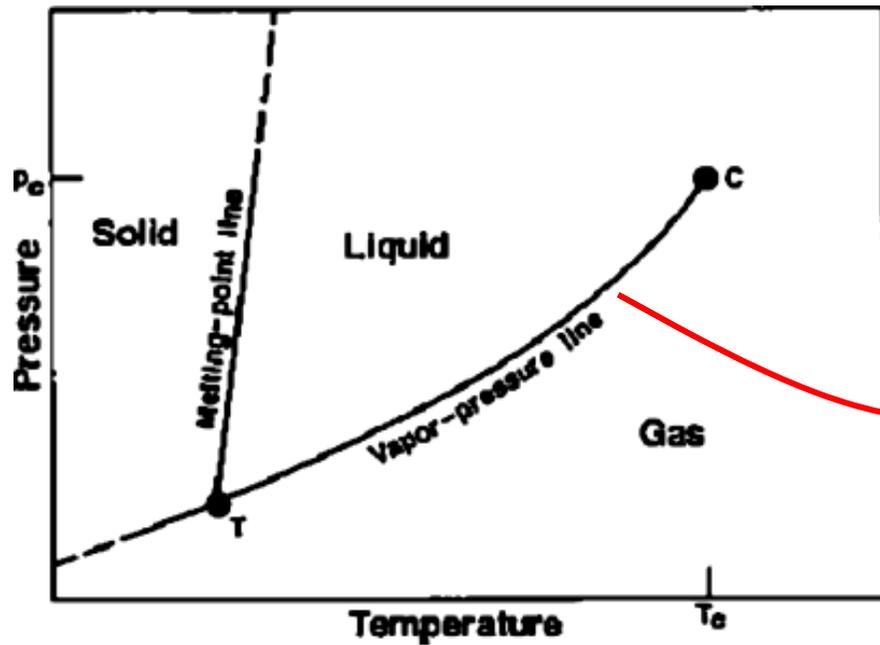


Substância Pura

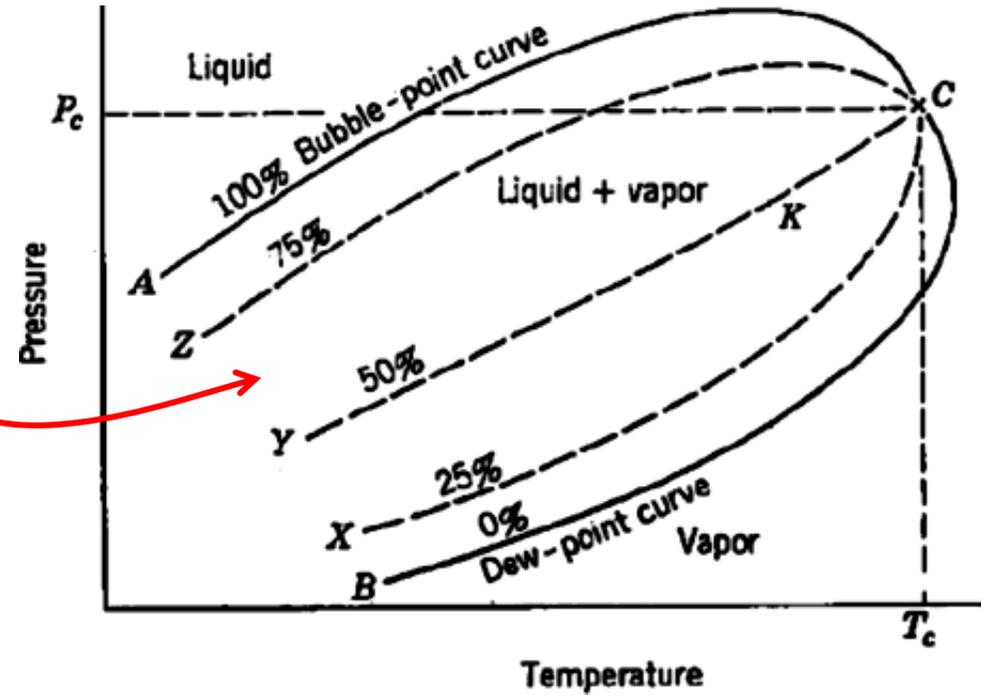


Mistura de 2 Substâncias

# DIAGRAMA DE ESTADO DE UMA MISTURA DE DUAS SUBSTÂNCIAS



Substância Pura



Mistura de 2 Substâncias

# DIAGRAMA DE ESTADO DE DIFERENTES MISTURAS DE SUBSTÂNCIAS

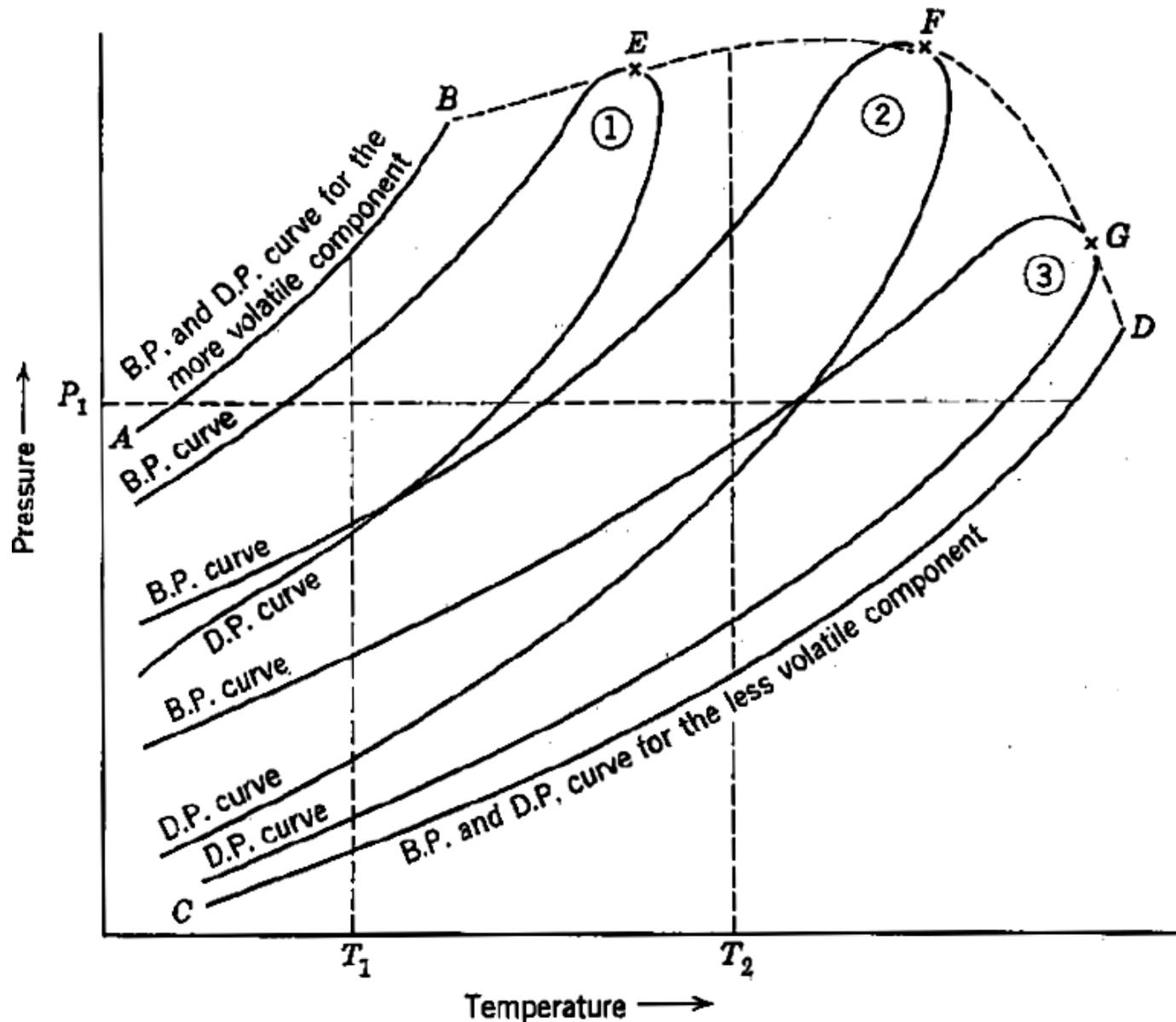


Diagrama de fases para misturas de 2 substâncias segundo diferentes relações

# CURVAS DE PONTOS CRÍTICOS PARA MISTURAS DE DUAS SUBSTÂNCIAS

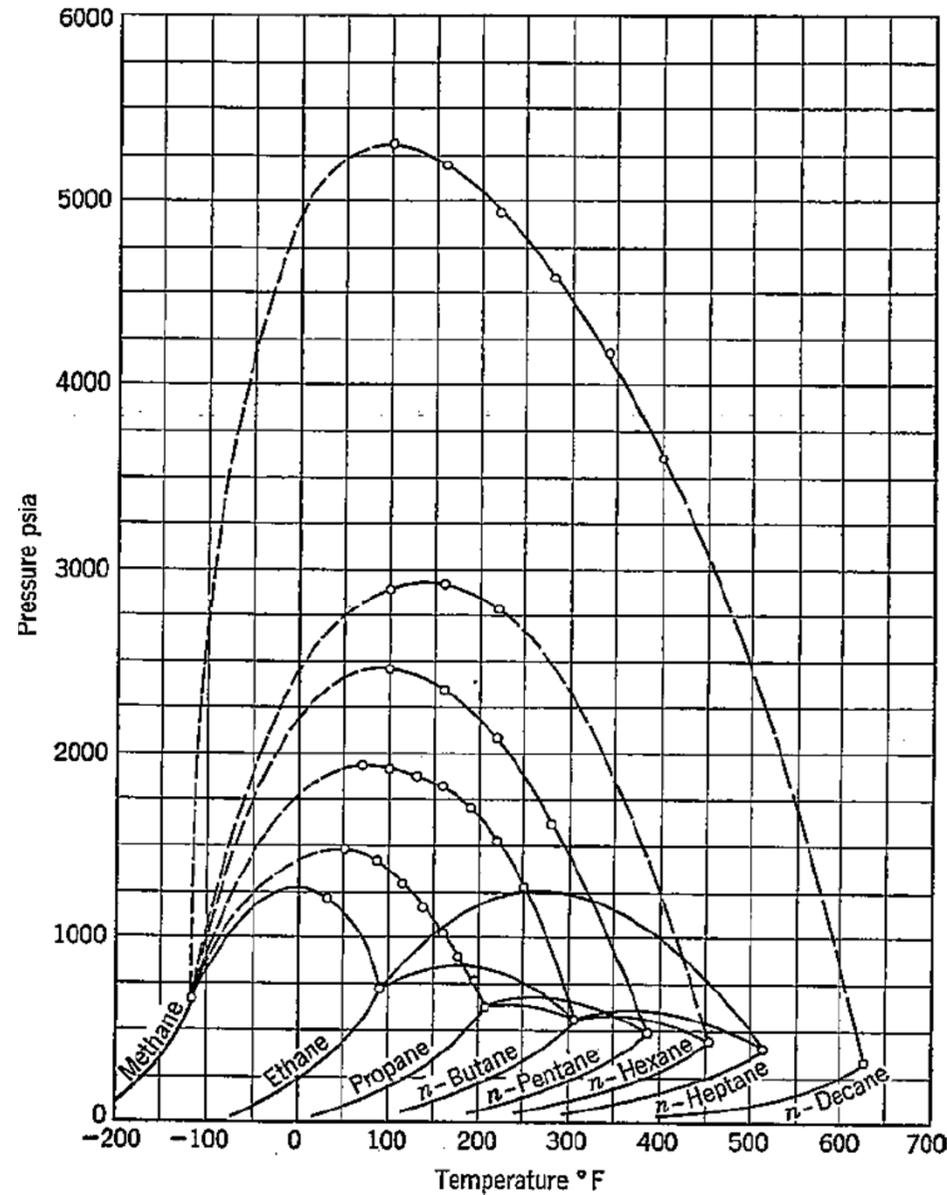


Diagrama de fases para misturas de vários fluidos de reservatório

# FATOR DE COMPRESSIBILIDADE PARA MISTURAS DE GASES



## LEI DOS ESTADOS CORRESPONDENTES

Cálculo da pressão e temperatura pseudo-reduzidas:

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad \text{e} \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}$$

$$P_{pc} = \sum_i y_i P_{ci} \quad \text{e} \quad T_{pc} = \sum_i y_i T_{ci}$$

Onde:

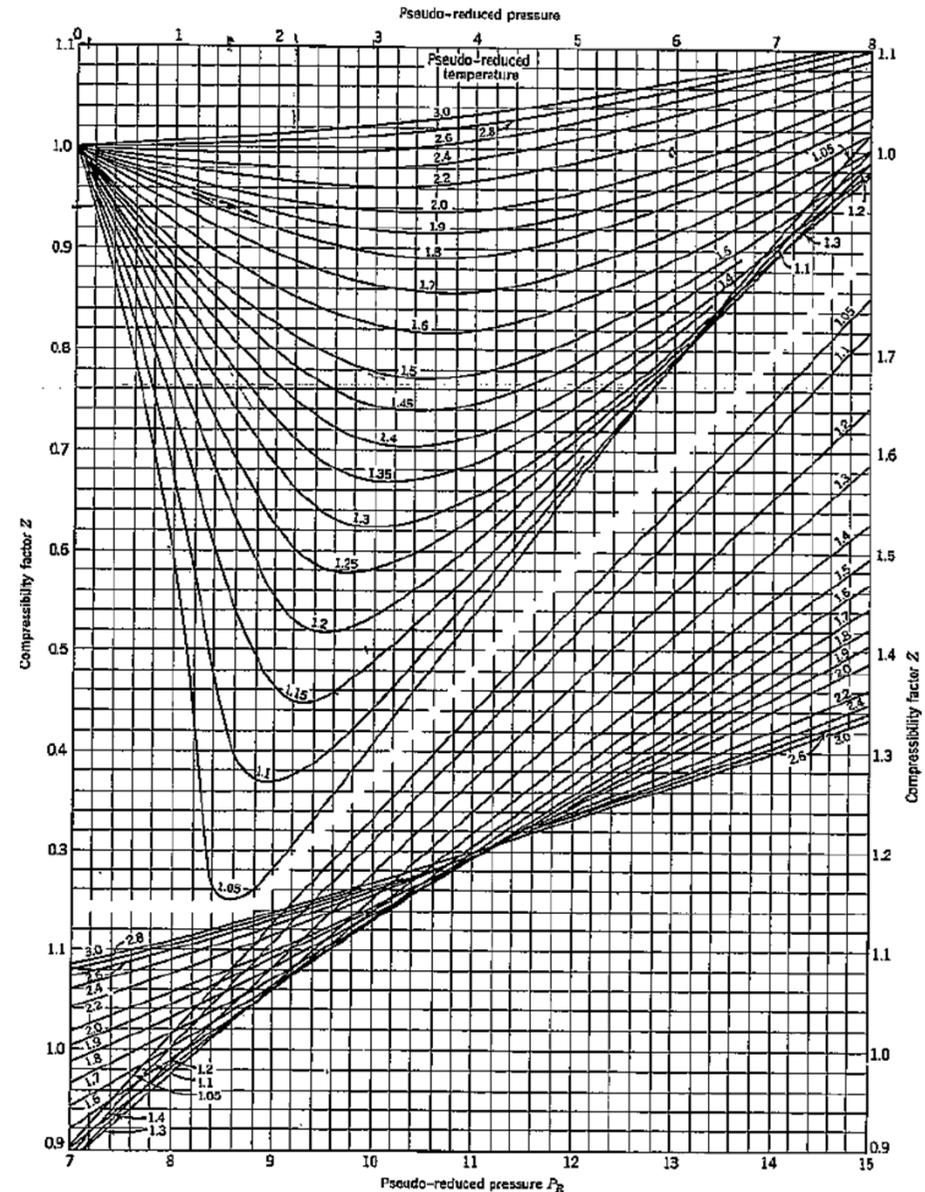
$P_{ci}$  = pressão crítica da fase  $i$

$T_{ci}$  = temperatura crítica da fase  $i$

$P_{pc}$  = pressão pseudo-crítica

$T_{pc}$  = temperatura pseudo-crítica

$y_i$  = fração molar da fase  $i$





## **CLASSIFICAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS SEGUNDO O ESTADO DOS FLUIDOS PRESENTES**



Os reservatórios são classificados em função da composição da mistura de hidrocarbonetos presente e das pressões: do reservatório, bem como sua variação ao longo da vida do reservatório, e de superfície.

## 5 TIPOS DE RESERVATÓRIOS

- Óleo (Black Oil).
- Óleo Volátil (Volatile Oil).
- Gás Retrógrado (Retrograde Gas).
- Gás Úmido (Wet Gas).
- Gás Seco (Dry Gas).

# RESERVATÓRIOS DE ÓLEO (BLACK OIL)

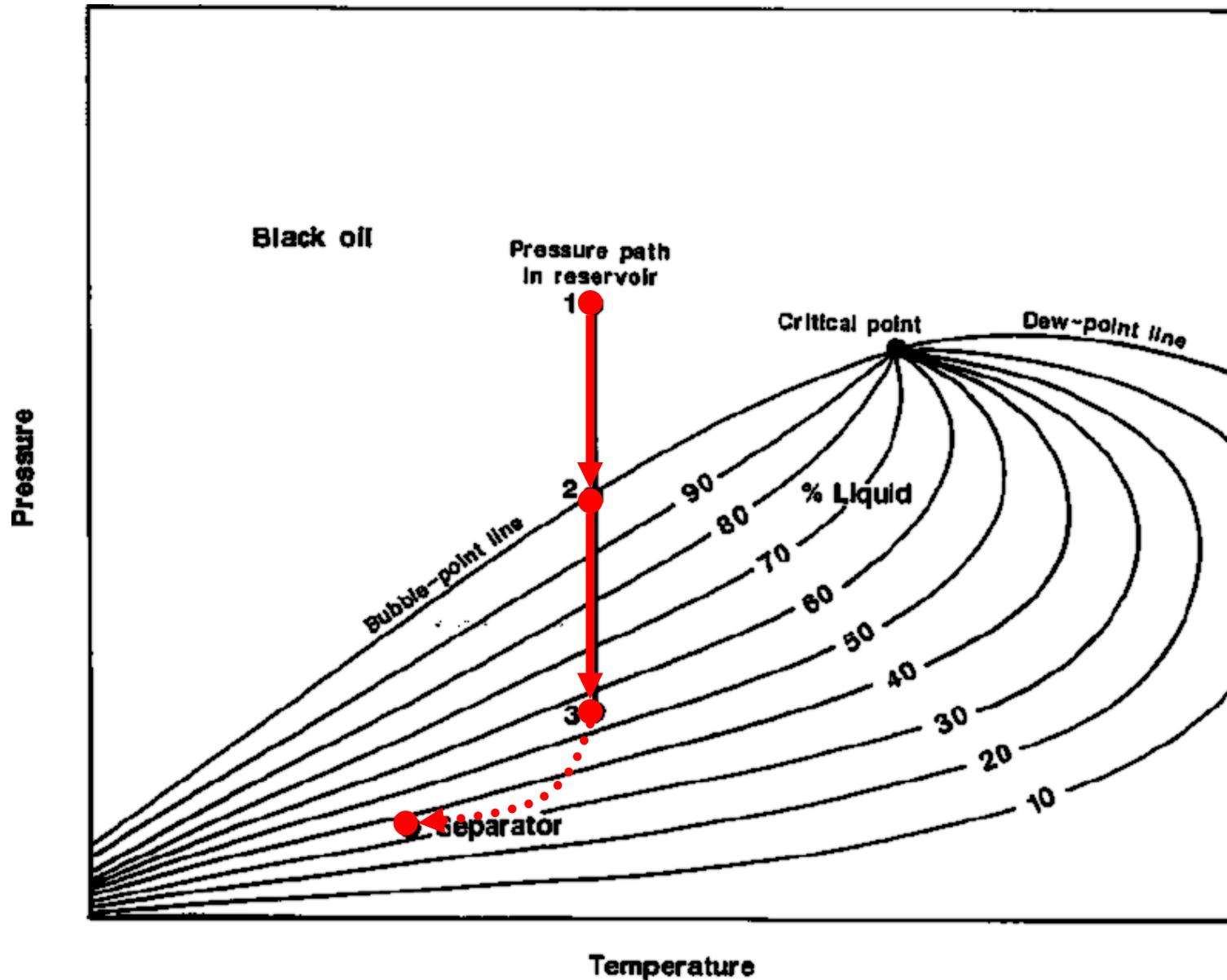


Diagrama de fases para reservatórios de óleo

# RESERVATÓRIOS DE ÓLEO VOLÁTIL (VOLATILE OIL)

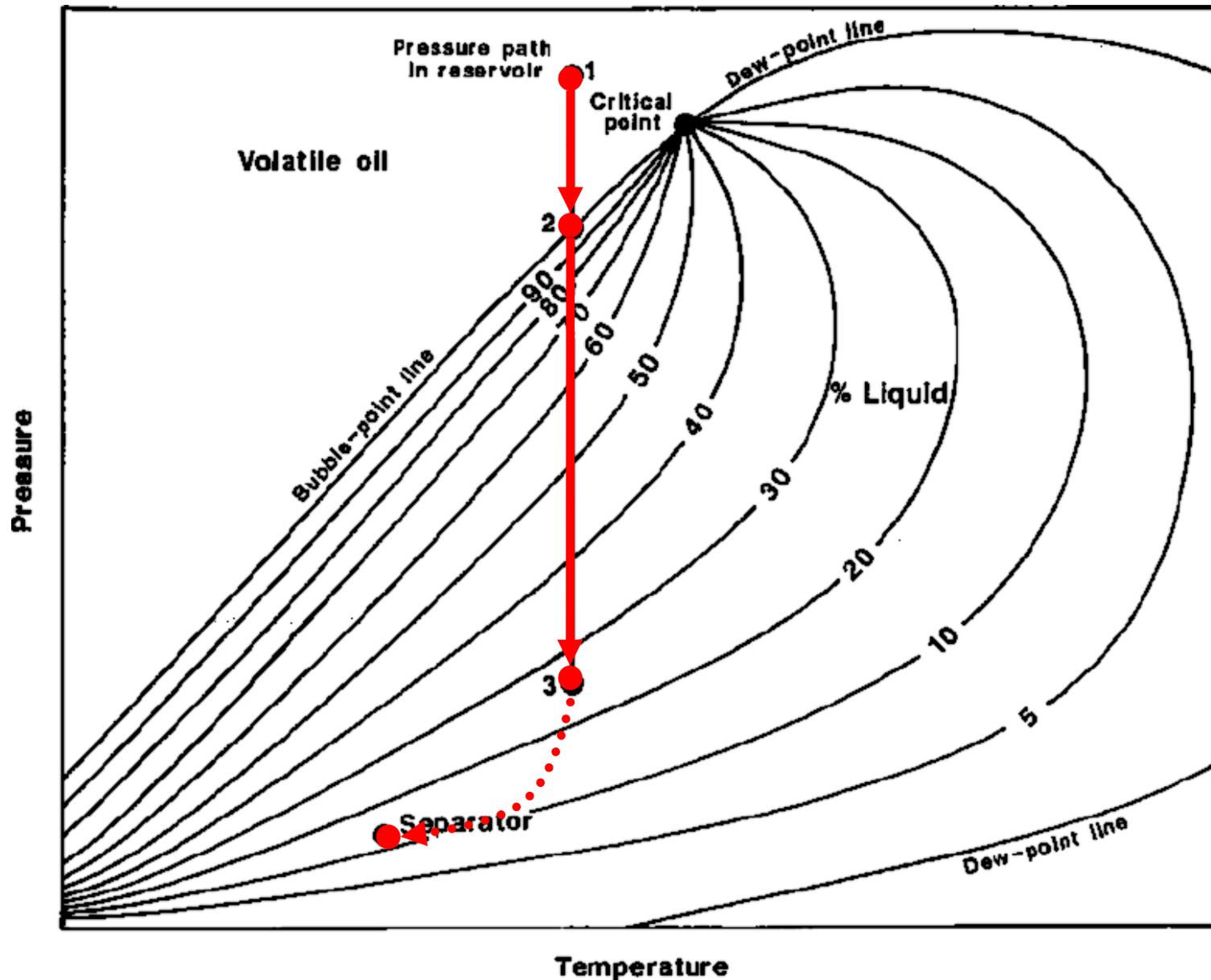


Diagrama de fases para reservatórios de óleo volátil

# RESERVATÓRIOS DE GÁS RETRÓGRADO (RETROGRADE GAS)

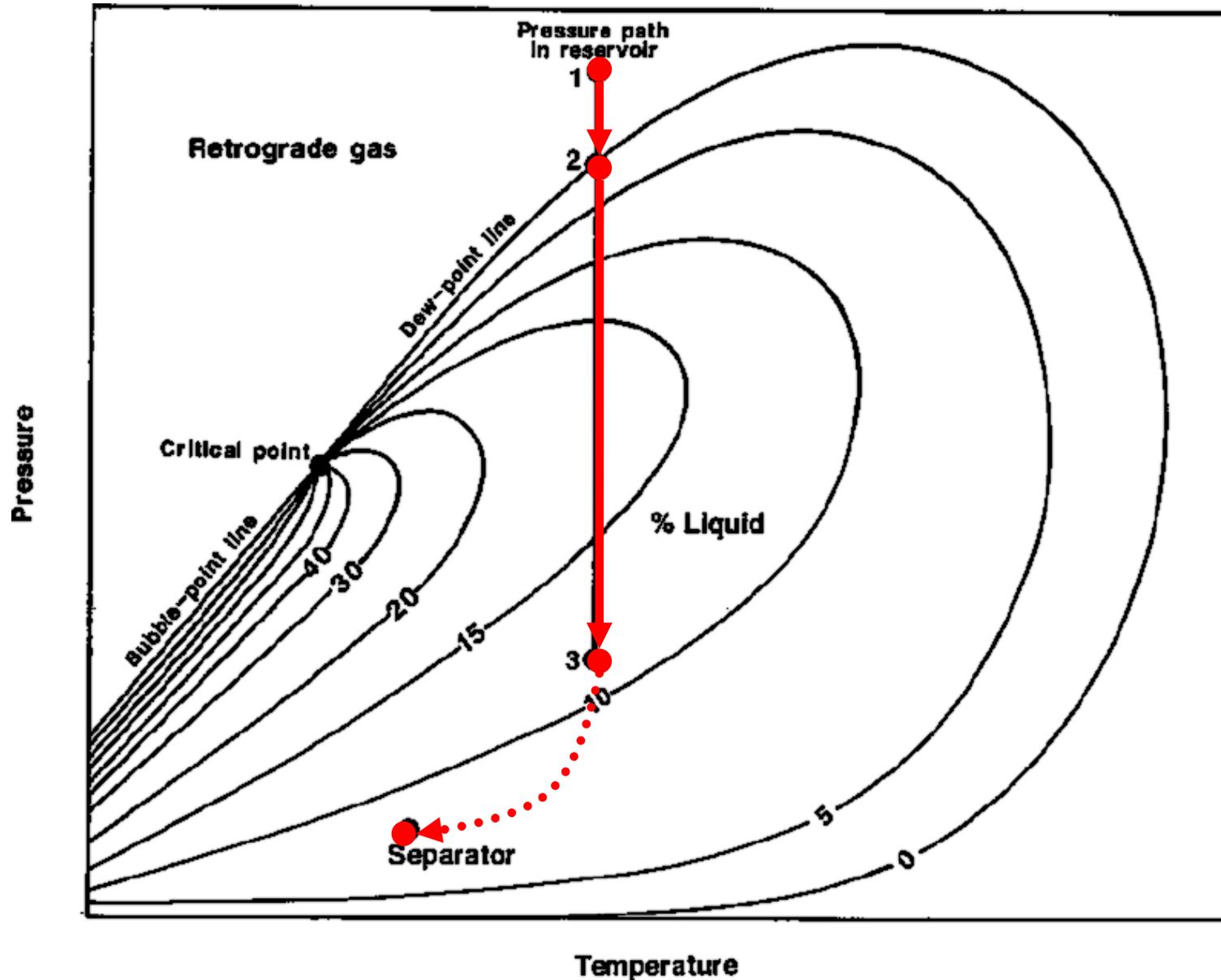


Diagrama de fases para reservatórios de gás retrógrado

# RESERVATÓRIOS DE GÁS ÚMIDO (WET GAS)

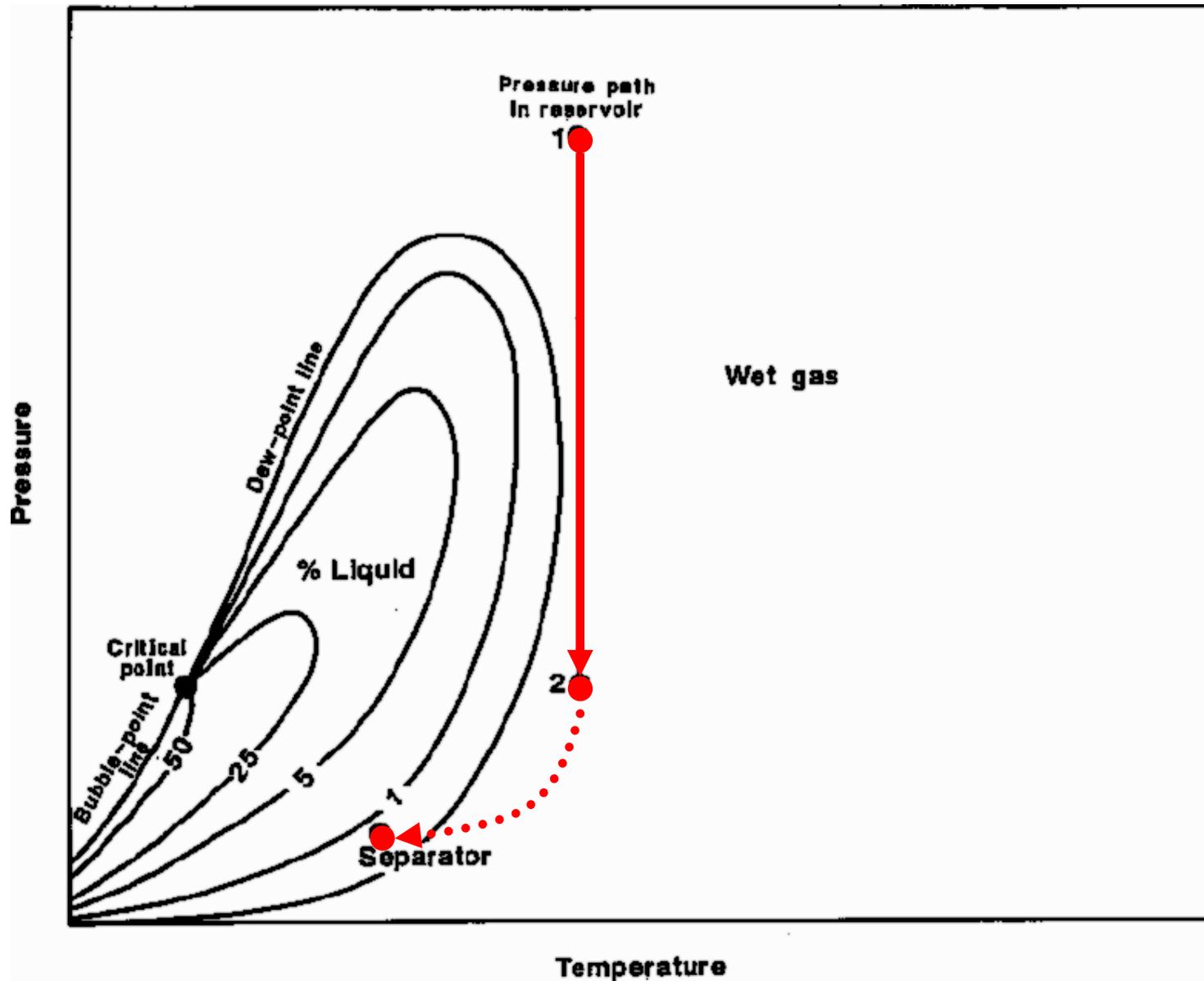


Diagrama de fases para reservatórios de gás úmido

# RESERVATÓRIOS DE GÁS SECO (DRY GAS)

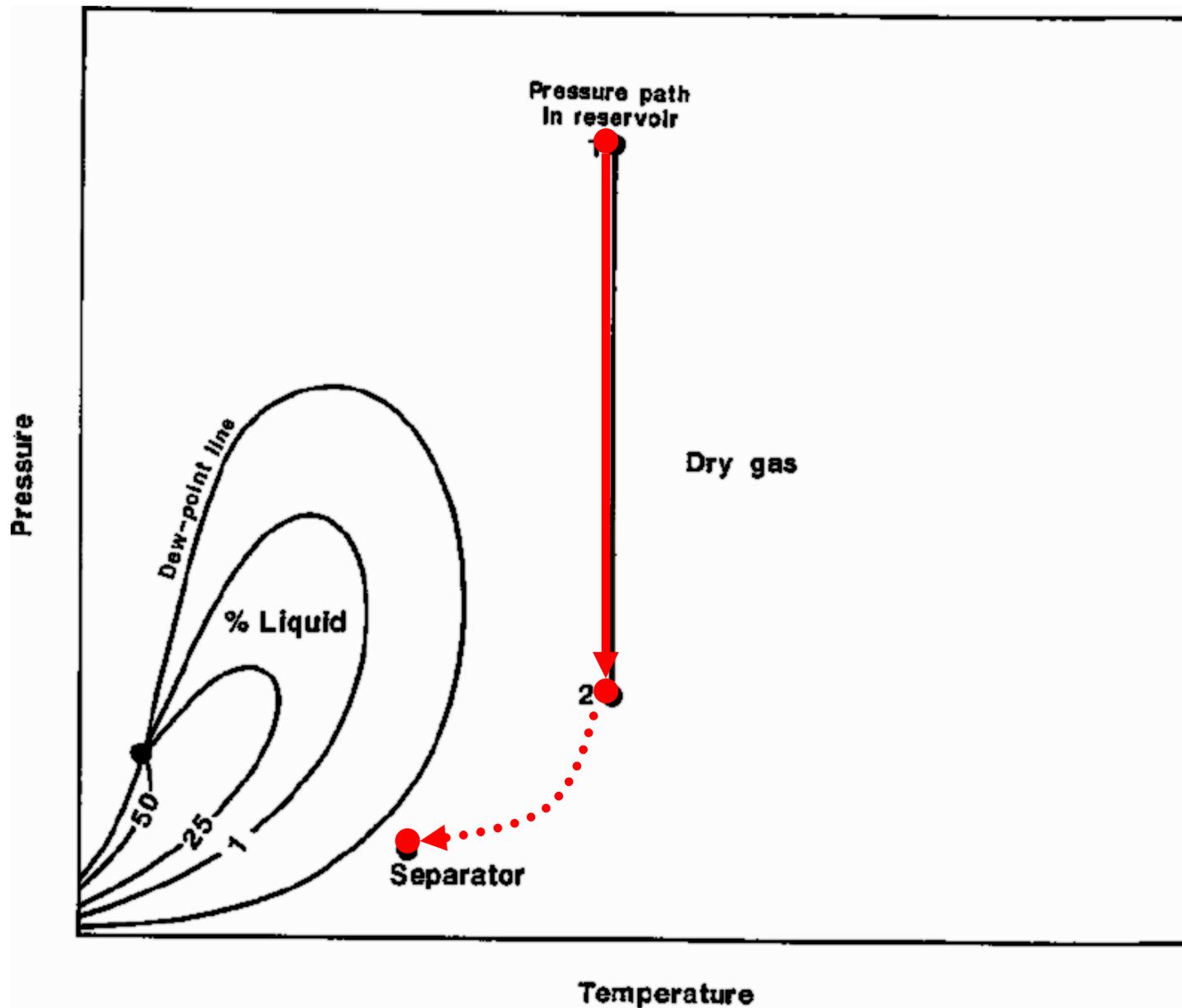


Diagrama de fases para reservatórios de gás seco

# CLASSIFICAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS SEGUNDO O ESTADO DOS FLUIDOS PRESENTES



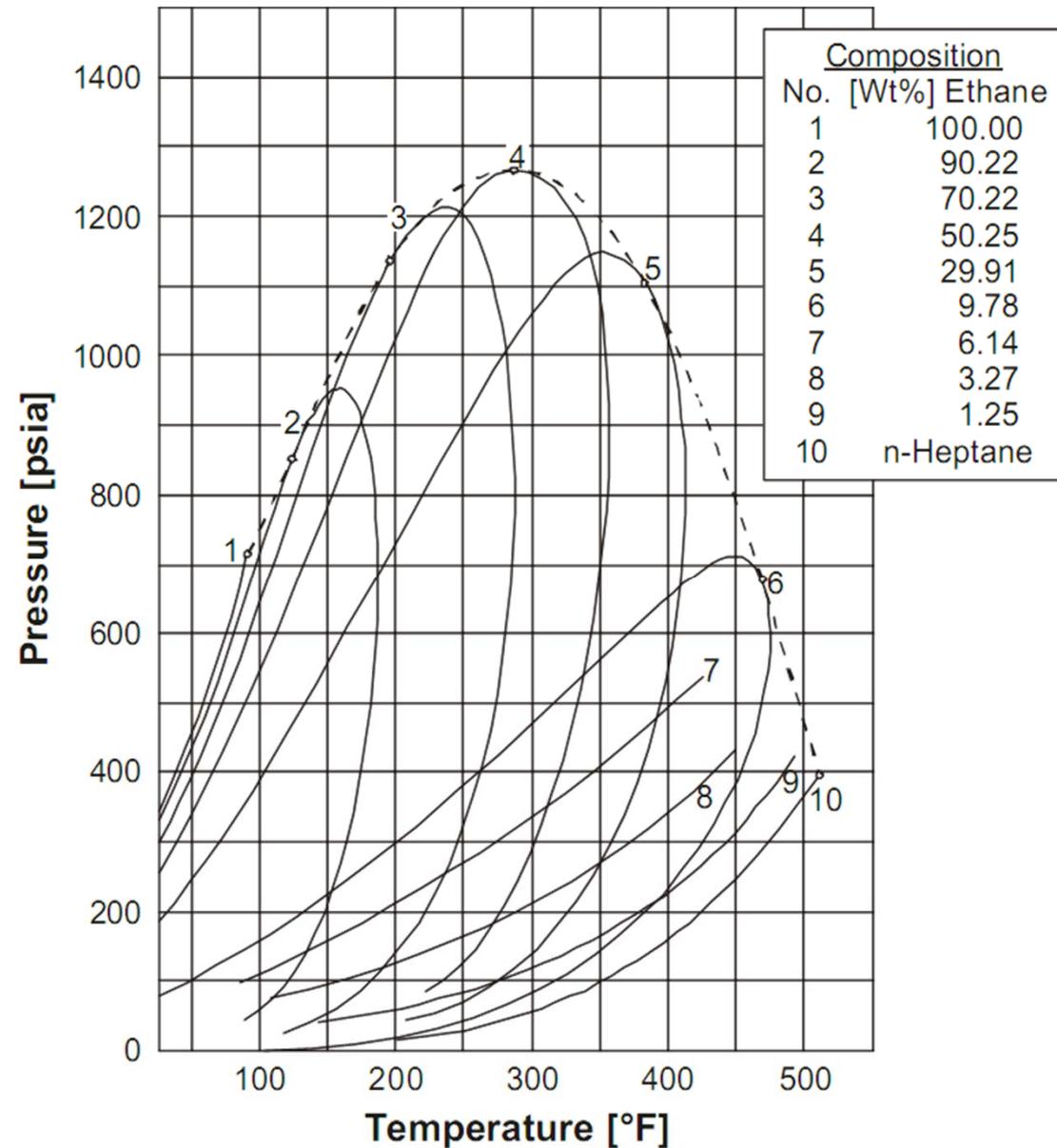
## EXEMPLO

Classificar os reservatórios que contém misturas de etano e n-heptano nas seguintes condições:

- Inicial: 1300 psi e 300°F
- Final: 400 psi e 300°F
- Separador: 100 psi e 150°F

Para as composições:

- a) 2
- b) 3
- c) 4
- d) 5
- e) 6



# CLASSIFICAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS SEGUNDO O ESTADO DOS FLUIDOS PRESENTES

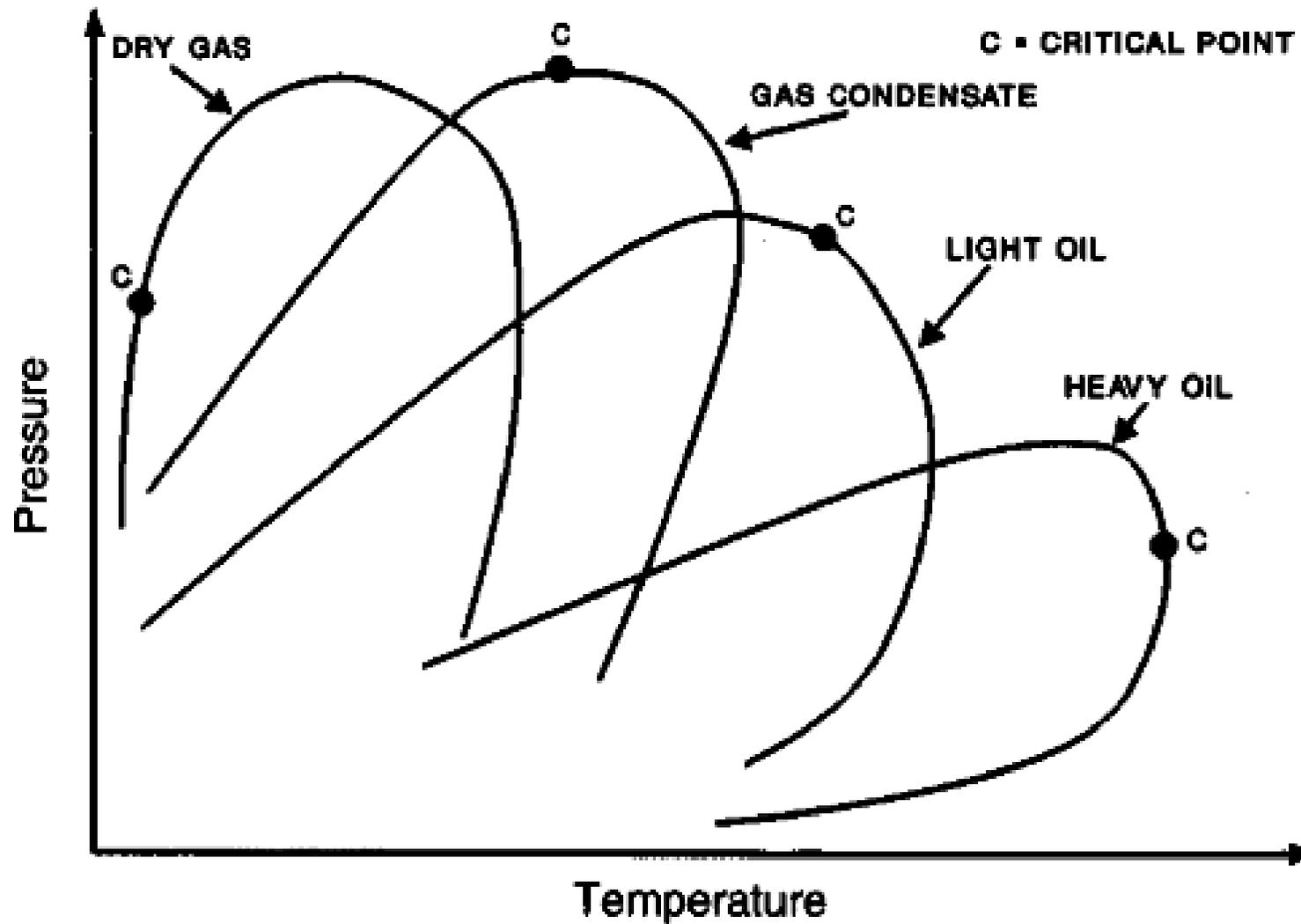


Diagrama de fases para vários tipos de reservatórios



### **ANÁLISE DOS FLUIDOS DE RESERVATÓRIO**

- Amostragem em superfície (processamento primário), em fundo de poço e em teste da formação.

### **COMPORTAMENTO DE FASE NOS RESERVATÓRIOS**

- Mudanças de estado dos fluidos de reservatório.
- Diagrama de estado de substâncias puras.

### **PROPRIEDADES FÍSICAS DE SUBSTÂNCIAS PURAS**

- Lei dos gases.
- Comportamento de gases reais e fator de compressibilidade.

### **COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE SUBSTÂNCIAS**

- Diagrama de estado de misturas de substâncias.
- Fator de compressibilidade para misturas de gases.

### **CLASSIFICAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS**

- Óleo (Black Oil).
- Óleo Volátil (Volatile Oil).
- Gás Retrógrado (Retrograde Gas).
- Gás Úmido (Wet Gas).
- Gás Seco (Dry Gas).



**AHMED, T. Reservoir engineering. Gulf Professional Publishing: Houston, 2001.**

**BRADLEY, H. B. Petroleum engineering handbook. Society of Petroleum Engineers: Richardson, 2005.**

**ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. Engenharia de reservatórios de petróleo. Interciência: Rio de Janeiro, 2006.**