

cap. 2 - COMBUSTÍVEIS

Combustíveis para utilização em energia e aquecimento industrial apresentam características importantes tais como baixo custo por conteúdo energético, disponibilidade, facilidade de transporte e armazenamento, possibilidade de utilização dentro de tecnologias disponíveis, baixo custo operacional e de investimento, etc. Durante muitos anos, os derivados de petróleo preencheram a maioria destas características e se tornaram o tipo mais utilizado de combustível industrial. Nas décadas recentes, outros tipos de combustíveis tem sido utilizados e pesquisados, principalmente aqueles que produzem menor impacto ambiental que os combustíveis fósseis.

Do ponto de vista de origem, os combustíveis podem ser classificados como: fósseis (não renováveis) e vegetais (renováveis), representados pela tabela abaixo.

Origem	Combustível Básico	Derivado
FÓSSEIS	Petróleo	GLP Gasolina Óleo Diesel Óleo Combustível Óleos Residuais
	Gás Natural	
	Xisto Betuminoso Carvões Minerais	Gases manufacturados
VEGETAIS	Cana-de-açucar	Bagaço de cana Alcool Etílico
	Lenha	Carvão Vegetal Gases manufacturados Metanol
	Resíduos Vegetais	Biogás

Quanto a utilização de combustíveis é conveniente classificá-los e estudá-los quanto a sua forma física: sólidos, líquidos ou gases.

Composição dos combustíveis:

Os combustíveis industriais apresentam em sua composição alguns dos seguintes elementos ou compostos:

Carbono	C
Hidrogênio	H
Oxigênio	O
Enxofre	S
Nitrogênio	N
Água	H ₂ O
Cinzas	(Z)

Carbono e hidrogênio são os elementos que mais contribuem para o poder calorífico dos combustíveis e oxigênio é geralmente presente em combustíveis vegetais, sendo que sua presença diminui o poder calorífico do combustível, bem como as exigências teóricas de ar de combustão.

Embora o enxofre seja também combustível, este traz consequências prejudiciais ao meio ambiente e aos equipamentos:

- seu poder calorífico é menor que o carbono e hidrogênio
- Os produtos de combustão, SO₂ e SO₃, em presença de umidade formam ácido sulfúrico, que irá atacar as partes mais frias da instalação. H₂SO₄ é o principal causador de "chuva ácida", com consequências desastrosas ao meio ambiente.

- se a atmosfera da combustão for redutora, pode haver formação de H₂S, ou outros compostos, que são perigosos e produzem mal cheiro.

O enxofre nos combustíveis líquidos é encontrado na forma de mercaptanas (um radical R-S-H) ou também na forma de dissulfetos (radicais R-S-R).

Nitrogênio é responsável pela formação de diversos óxidos: N₂O, NO e NO₂, que são compostos de alta irritabilidade para as mucosas além de reagirem com o ozônio da atmosfera (O₃).

Outros elementos ocorrem eventualmente nos combustíveis em concentrações muito pequenas, porém de efeitos não menos importantes. Os metais são mais frequentes: Níquel, Vanádio, Cálcio, Sódio, Potássio e Manganês.

O vanádio forma um óxido: V₂O₅, que é catalizador da reação de formação de ácido sulfúrico, agravando as consequências de corrosão com combustíveis que contenham enxofre. Sódio e potássio (metais alcalinos) contribuem para a corrosão a baixa temperatura formando compostos de baixo ponto de fusão, podendo inclusive atacar materiais refratários.

A água é normalmente encontrada em todos os combustíveis, principalmente nos combustíveis sólidos, na forma de umidade, e traz duas consequências:

- diminui o poder calorífico,
- aumenta a temperatura do ponto de orvalho do ácido sulfúrico, aumentando os problemas de corrosão.

2.1 - COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

Os combustíveis líquidos são amplamente utilizados na indústria pelas facilidades de armazenamento, operação e transporte, e os derivados de petróleo praticamente estão presentes na maioria das aplicações.

A caracterização dos combustíveis líquidos compreende a medição de algumas propriedades aplicáveis a estes, as quais serão definidas a seguir. O poder calorífico de combustível, como definido no capítulo anterior é aplicável a todos os tipos de combustíveis.

Propriedades de combustíveis líquidos

Ponto de fulgor: é a temperatura do combustível na qual, sob a ação de uma chama escorvadora sobre a superfície líquida do mesmo, provoca uma ignição e combustão transitória. Importante propriedade para a segurança de armazenamento.

Ponto de ignição: temperatura do combustível na qual a chama escorvadora provoca uma combustão continuada sobre a superfície do mesmo.

Temperatura de auto-ignição: temperatura mínima de uma mistura ar/combustível na qual a combustão é iniciada e se mantém, sem a presença de uma chama escorvadora.

Ponto de fluidez: temperatura mínima necessária para que o combustível se torne um fluido.

Viscosidade: importante propriedade que vai determinar as temperaturas de armazenamento, bombeamento econômico e pulverização (atomização) para combustão.

Outras propriedades de combustíveis líquidos são aplicáveis apenas a combustíveis automotivos (gasolina, óleo diesel), tais como a octanagem, o período de indução e a cetanagem, e não serão tratadas neste texto.

Todas as propriedades tem normas e métodos de medição e algumas podem variar em resultado conforme o método utilizado.

Derivados de Petróleo

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos que apresenta composição variável e dependente de fatores geológicos tais como localização da jazida, idade, profundidade, etc. Os principais elementos que constituem o petróleo são apresentados no quadro abaixo, com sua correspondente faixa de variação da composição:

Elemento	% em massa
Carbono	83 a 87
Hidrogênio	11 a 14
Enxôfre	0,05 a 8
Nitrogênio	0,1 a 1,7
Oxigênio	~0,5
Metais(Fe, Ni, V, etc.)	~0,3

Os principais constituintes orgânicos do petróleo são :

- **Alcanos** (ou parafinas), cadeias carbônicas retas, de fórmula geral C_nH_{2n+2} e seus isômeros.
- **Ciclanos** (ou naftênicos), de fórmula geral C_nH_{2n} , são compostos de anéis saturados, tais como o ciclo pentano e ciclo-hexano.
- **Aromáticos**, os quais contêm o anel benzênico, e de baixo peso molecular.
- **Compostos sulfurados**, presentes em todos os tipos de óleo cru, mas em geral, quanto maior a densidade do petróleo, maior o teor de enxôfre.
- **Compostos nitrogenados**, presentes nas frações mais pesadas, ocasionam problemas no processamento de petróleo por envenenamento de catalizadores de processo.
- **Compostos oxigenados**, também se concentram nas frações mais pesadas, e são responsáveis pela acidez, escurecimento e o forte odor dos derivados de petróleo.
- **Compostos metálicos**, são compostos organo-metálicos e também predominam nas frações mais pesadas.
- **Impurezas inorgânicas**, ficam em solução ou suspensão na água emulsionada ou no corpo do petróleo: sais minerais, argila, areia e obviamente a água.

Os derivados de petróleo são produtos do processamento do óleo cru, basicamente em dois tipos de processos:

- destilação atmosférica, onde grupos de frações são separadas por diferença de ponto de ebulição (ou pressão de vapor), numa coluna de destilação,
- destilação à vácuo do resíduo, onde é extraído no resíduo de fundo da coluna atmosférica mais frações leves. O resíduo de destilação à vácuo é utilizado para produção de asfalto ou complementação da produção de óleo combustível,
- craqueamento térmico ou catalítico, onde é possível transformar frações pesadas do óleo em frações mais leves, ajustando o perfil da produção com as necessidades de mercado consumidor.

Um esquema básico de refino é apresentado na figura 1.

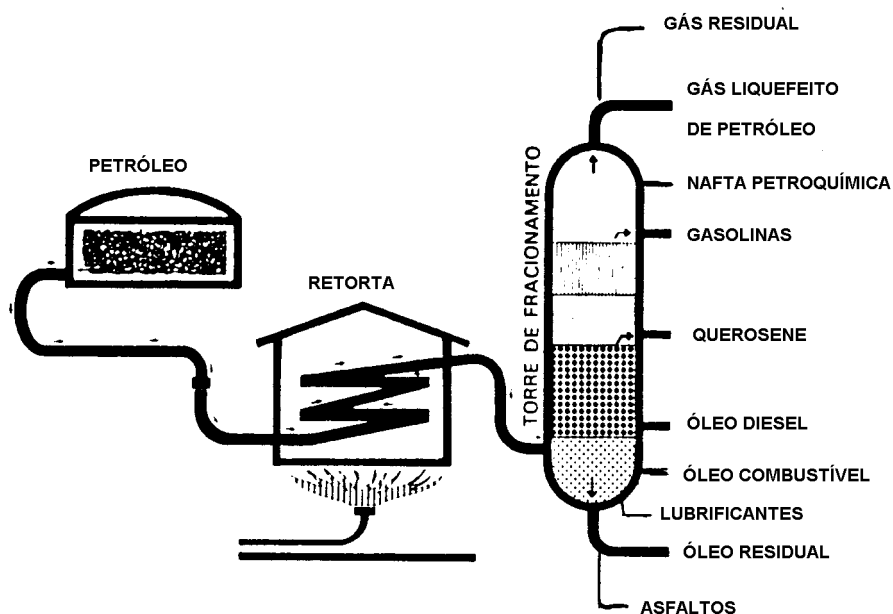


Figura 1. Esquema da destilação atmosférica de petróleo.

A qualidade e característica do petróleo determina a faixa de extração de cada componente principal, embora os processos adicionais como o craqueamento permitam uma pequena variação do ajuste. As principais frações produzidas, em ordem crescente de densidade são as seguintes:

- Gás residual
- Gás Liquefeito de Petróleo
- Nafta petroquímica
- Gasolina
- Querosene
- Óleo Diesel
- Óleo Combustível
- Lubrificantes
- Óleos residuais
- Asfaltos

Óleo Combustível

O óleo combustível é a fração mais importante para os sistemas de aquecimento industrial, devido a seu baixo preço. Apesar de no início da utilização do petróleo, frações mais leves tais como o diesel e o querosene terem sido utilizadas, atualmente, tais derivados são reservados a utilizações com maior exigência de qualidade de combustível, como os motores de combustão interna (ciclos Diesel e turbinas de aviação). A tendência atual é adequar o perfil de refino a maior produção de diesel e conseqüentemente, o óleo combustível utilizado

pela indústria tem sua densidade e viscosidades aumentadas, além do maior teor de enxofre.

A especificação básica para os óleos combustíveis são a viscosidade, o ponto de fluidez e o teor de enxôfre.

A viscosidade é determinada em aparelhos que se baseiam no tempo de escoamento de um dado volume de óleo a uma temperatura constante. Os tipos de viscosímetros mais utilizados são:

- Saybolt, com dois tipos: SSU Segundos Saybolt Universal e SSF, Segundos Saybolt Furol
- Engler
- Redwood

A conversão em viscosidade cinemática, dada em centipoises está apresentada na tabela 1.

As temperaturas utilizadas são as seguintes:

	20 °C (68 F)	37,8 °C (100 F)	50 °C (122 F)	98,9 °C (210 F)	100 °C (212 F)
SSU		X		X	
SSF			X	X	
Engler	X		X		
Redwood		X			

Os óleos combustíveis apresentam várias faixas de viscosidades conforme sua classificação. Para se conhecer a viscosidade de um óleo em qualquer temperatura, é necessário conhecer-se pelo menos a viscosidade em duas temperaturas, e com o auxílio do gráfico da figura 2, traça-se uma reta que reproduz o comportamento da viscosidade em relação a temperatura para derivados de petróleo.

As especificações atuais brasileiras para os óleos combustíveis são apresentados na tabela 2, sendo que análises de laboratório são apresentadas nas tabelas 3 e 4. Uma tabela de equivalencia de denominações também esta anexo.

Antiga	A(BPF)	D(BTE)	E	F	GD	HD	GK	HK	GM	HM
Atual	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B

Antiga	GN	HN	GP	HP	-	-	-	-	OC4
Atual	6A	6B	7A	7B	8A	8B	9A	9B	C

Equivalência de Viscosidade (a mesma temperatura)

Saybolt Universal	Redwood Nº 1	Engler	Cinemática	Saybolt Furol	Redwood Nº 2
32	30.8	1.14	2.00	—	—
35	32.2	1.18	2.69	—	—
37	34.1	1.25	3.30	—	—
40	36.2	1.32	4.28	—	—
43	39.0	1.42	5.20	—	—
45	40.6	1.46	5.84	—	—
48	42.9	1.54	6.70	—	—
51	45.4	1.62	7.60	—	—
52	46.2	1.65	7.90	—	—
56	49.6	1.76	9.10	—	—
58	51.3	1.81	9.70	—	—
61	53.7	1.89	10.50	—	—
65	57.9	2.00	11.75	—	—
66	58.1	2.02	11.90	—	—
79	69.7	2.37	15.40	—	—
80	71.0	2.42	15.72	—	—
85	75.1	2.55	16.98	—	—
90	79.6	2.68	18.2	—	—
100	88.4	2.95	20.6	—	—
110	97.1	3.21	23.0	—	—
120	105.9	3.49	25.3	—	—
130	114.8	3.77	27.5	—	—
227	200	6.5	48.7	26	—
284	250	8.1	60.8	31	—
340	300	9.7	73.0	37	—
398	350	11.3	85.2	42	35
455	400	13.0	97.3	48	40
512	450	14.6	109.5	53	45
569	500	16.2	121.7	59	50
626	550	17.8	133.8	65	55
683	600	19.4	146.0	71	60
796	700	22.7	170.3	82	70
910	800	25.9	194.6	93	80
1.024	900	29.2	219.0	105	90
1.145	1.000	32.5	247.0	118	100
1.251	1.100	35.6	267.6	128	110
1.365	1.200	39.0	292.0	139	120
1.470	1.300	43.9	316.3	150	130
1.593	1.400	45	340.6	162	140
1.696	1.500	49	365.0	172	150
2.275	2.000	65	486.6	231	199
2.826	2.500	80	608.6	285	250
3.413	3.000	97	730.0	347	299
3.982	3.500	113	851.6	405	349
4.522	4.000	128	973.2	460	400
5.087	4.500	140	1.094.9	500	450
5.653	5.000	158	1.216.5	560	500

Tabela 1 - Equivalência entre viscosidades.

GRÁFICO ASTM VISCOSIDADE X TEMPERATURA

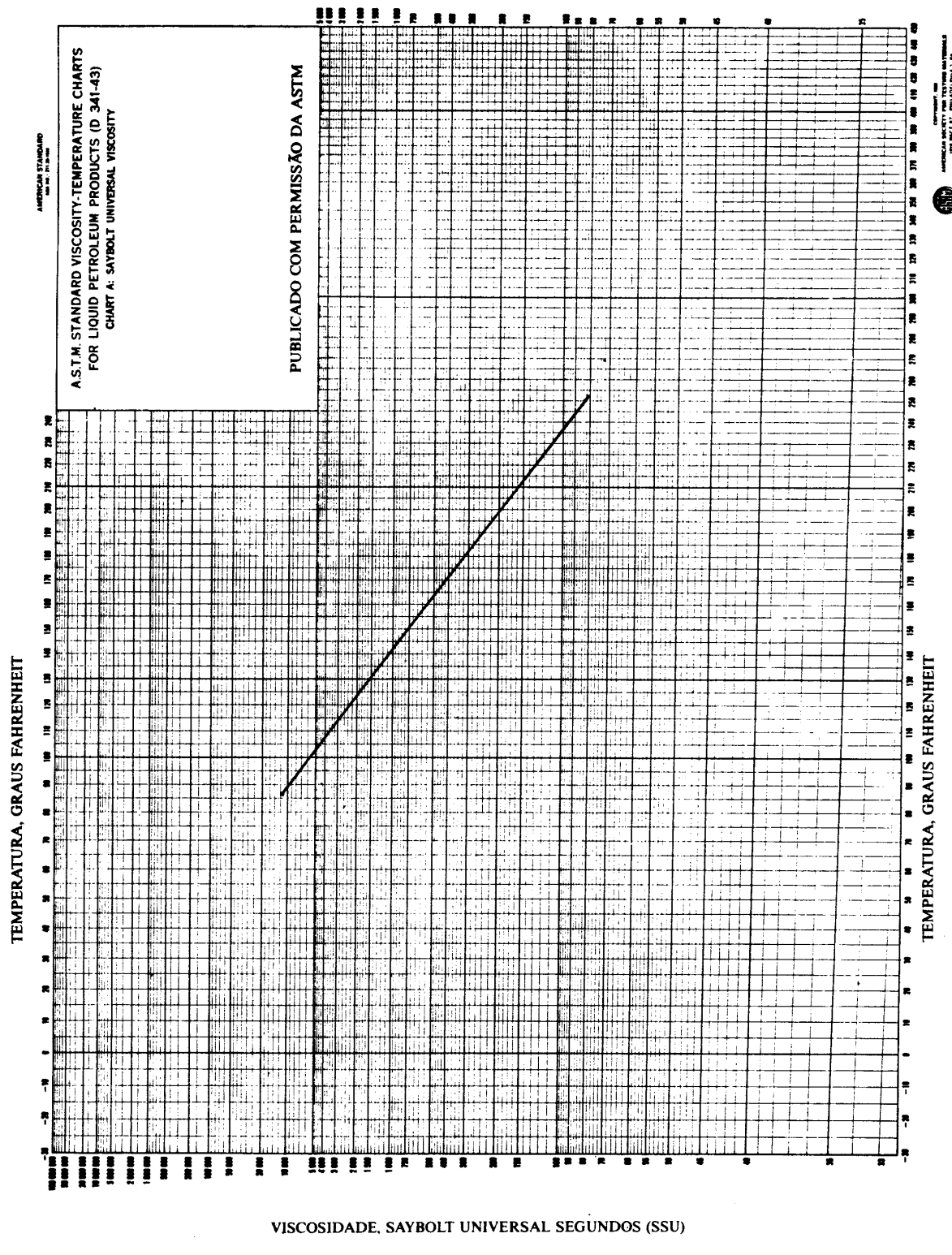


Figura 2. Gráfico para determinação da curva viscosidade x temperatura para derivados de petróleo.

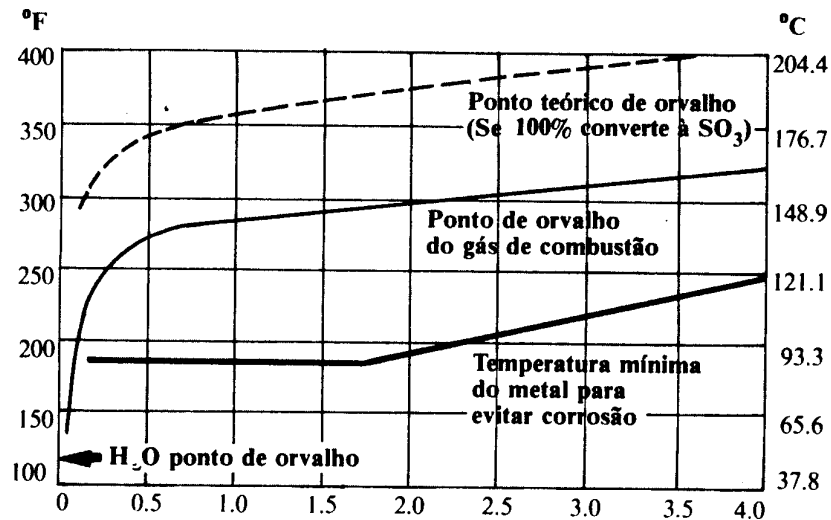


Figura 3. Gráfico típico de ponto de orvalho em função do teor de enxofre no combustível.

Tabela 2. Especificações do CNP para óleos combustíveis.

Óleo Combustível	Ponto de fulgor em °C	Ponto de fluidez superior °C	Cinzas, % em peso	Teor de enxofre % em peso	Viscosidade (2)			
					Água e Sedimentos % em peso	Cinemática a 60°C, cSt ou (Saybolt, Furol a 65°C, s)	Cinemática a 37,8°C, cSt ou Saybolt Universal 37,8°C, s	
	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo	Máximo
TipoA (B.P.F.)	66	(4)	-	5,0	2,00 (3)	390 (185)	31,9 (150)	-
TipoB (A.P.F.)	66	-	-	5,0	2,00 (3)	390 (185)	31,9 (150)	-
TipoC (óleo nº 4)	66	(5)	0,10	-	0,50 (6)	-	2,11 (33,0)	26,0 (124)
TipoD (B.T.E.)	66	-	-	1,0	2,00 (3)	390 (185)	31,9 (150)	-
Tipo E	66	-	-	5,5	2,00 (3)	600 (285)	31,9 (150)	-
Tipo F	66	-	-	1,0	2,00 (3)	600 (285)	31,9 (150)	-

- 1) - Em vigor a partir de 02/02/82, através do Regulamento Técnico CNP 09/82.
 - 2) - Para óleos combustíveis cuja diferença entre a temperatura de referência de viscosidade e o ponto de fluidez seja menor que 20°C, os valores da viscosidade deverão ser obtidos em temperaturas mais altas, reportando-se às temperaturas por extrapolação.
 - 3) - A quantidade de água e sedimento exceder 1,00%, deverá ser feita a dedução da cifra total na quantidade de óleo combustível.
 - 4) - O ponto de fluidez superior deverá ser, no máximo, igual ao indicado na tabela anexa.
 - 5) - O ponto de fluidez superior deverá ser, no máximo, igual ao indicado na tabela anexa de 6°C.
 - 6) - O resultado de água e sedimentos para o óleo combustível tipo "C" é expresso em % por volume.
- OBS.: A partir de 02/02/82, através da Resolução nº 02/82, o Conselho Nacional de Petróleo autorizou em caráter experimental, mediante acordo com o comprador a utilização do Óleo Combustível Ultra-Viscoso". Entende-se por Ultra-Viscoso um óleo combustível com viscosidade cinemática acima de 600 cSt a 65°C (285 SSF a 65°C), sendo que as demais características atendem as especificações constantes da Resolução 1/82 que estabelece o Regulamento.

TIPOS	Ponto de Fulgor, °C	Ponto de fluidez superior, °C	Teor de enxofre, % peso	Água e sedimento % volume (1)	V I S C O S I D A D E			Cinza s
					Saybolt Furol a 50°C, s	Cinemática, cSt		
						37,8°C	60 °C	
	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	-	Máximo	Mínimo
1A	66	(2)	5,0	2,0	(600)	-	620	-
1B	66	-	1,0	2,0	(600)	-	620	-
2A	66	-	5,5	2,0	(900)	-	960	-
2B	66	-	1,0	2,0	(900)	-	2.300	-
3A	66	-	5,5	2,0	(2400)	-	2.300	-
3B	66	-	1,0	2,0	(2400)	-	-	-
4A	66	-	5,5	2,0	10.000	-	-	-
4B	66	-	1,0	2,0	10.000	-	-	-
5A	66	-	5,5	2,0	30.000	-	-	-
5B	66	-	1,0	2,0	30.000	-	-	-
6A	66	-	5,5	2,0	80.000	-	-	-
6B	66	-	1,0	2,0	80.000	-	-	-
7A	66	-	5,5	2,0	300.000	-	-	-
7B	66	-	1,0	2,0	300.000	-	-	-
8A	66	-	5,5	2,0	1.000.000	-	-	-
8B	66	-	1,0	2,0	1.000.000	-	-	-
9A	66	-	5,5	2,0	(sem limite) -	-	-	-
9B	66	-	1,0	2,0	(sem limite) -	-	-	-
C	66	(3)	-	0,5	-	2,1, a 26,0	-	0,10

1 - A quantidade de água por destilação, mais a do sedimento por extração, não deverá exceder 2,0% (percentagem em vol.).

Uma dedução na quantidade deverá ser feita para toda a água e sedimento em excesso de 1,0%.

2 - O ponto de fluidez superior deverá ser, no máximo, igual ao indicado na tabela anexa.

3 - O ponto de fluidez superior deverá ser, no máximo, igual ao indicado na tabela anexa, diminuído de 6°C.

O teor de enxôfre é uma característica importantíssima para especificação e utilização de óleos combustíveis. Como explicado, o enxôfre ocasiona a formação de SO₂ e SO₃, o qual em reação com a água dos produtos de combustão dever formar ácido sulfúrico. A formação e condensação de ácido sulfúrico depende do teor de SO₂, e conseqüentemente do teor de enxôfre no óleo, e da pressão parcial do vapor de água nos gases de combustão. Um gráfico típico do ponto de orvalho de ácido em função do teor de enxôfre no óleo é apresentado na figura 3.

Nem sempre está disponível dados sobre a análise elementar dos óleos combustíveis, e mesmo o poder calorífico. No caso em que não existe uma análise laboratorial, os gráficos das figuras 4, 5 e 6 auxiliam no estabelecimento da composição química elementar, fornecendo dados estimativos a partir de propriedades facilmente mensuráveis, como a densidade. O teor de enxôfre, por ser de importância fundamental na especificação dos óleos, normalmente é fornecido. Os gráficos e tabelas fornecem dados com exatidão suficiente para os cálculos de combustão industrial.

Tabela 3. Análise de óleo combustível tipo 1 B.

ENSAIOS	RESOLUÇÃO CNP	MÉDIA TRIMESTRAL				OBS.
		1º	2º	3º	4º	
Água e sedimentos. % peso	2,0 (max)	0,10	0,10	0,10	0,10	
Água por destilação. % volume	-	0,1	0,1	0,1	0,1	
Densidade relativa. 20/4 C	-	1,0122	0,9932	0,0100	1,0035	
Enxofre. % peso	5,5 (max)	0,96	0,75	0,7 max)	0,78	
Ponto de fluidez superior. C	-	6	6	3	9	
Ponto de fulgor. C	66 (min)	76	74	68	66	
Viscosidade SSF a 50 C	600 (max)	600	600	600	600	
cSt a 60 C	620 (max)	-	-	-	-	
Poder calorífico inferior. kcal/kg	-	9880	9880	9880	9880	
Poder calorífico superior. kcal/kg	-	10470	10470	10470	10470	
*Dados obtidos por extrapol. Ensaio a 65 C						

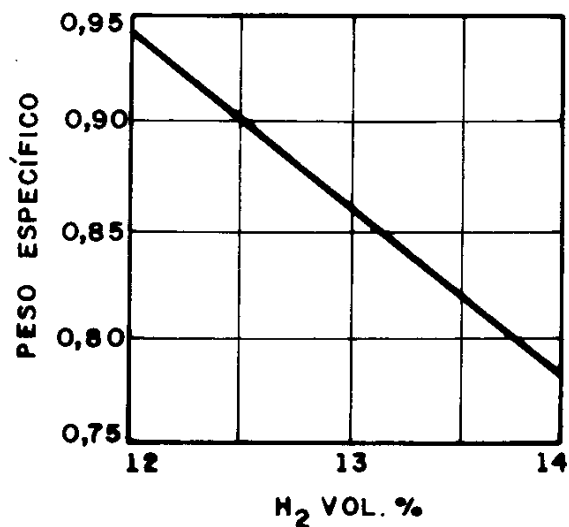


Figura 4. Relação entre peso específico do óleo combustível e seu teor de hidrogênio.

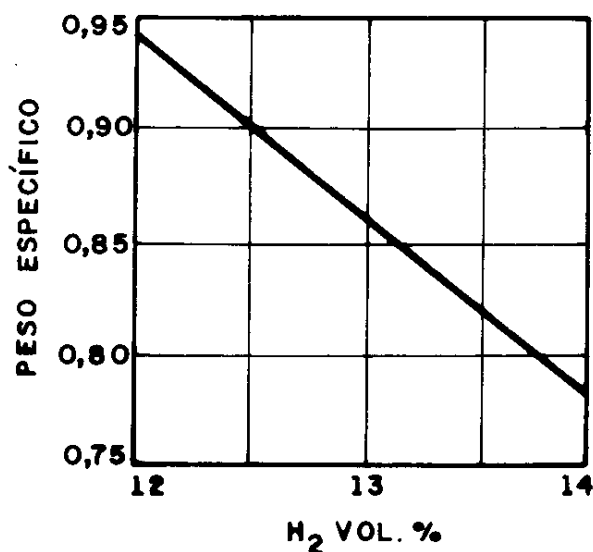


Figura 4. Relação entre peso específico do óleo combustível e seu teor de hidrogênio.

Tabela 4. Análises típicas de derivados de petróleo.

ANÁLISES TÍPICAS	Querosene	Diesel	OC-4	BPF	BTE	E	F
Densidade 20/4°C	0,801	0,829	0,892	0,978	0,946	0,998	0,958
Ponto de Fulgor, °C	41	-	80	90	88	95	97
Viscosidade CIN 20°C, cSt	2,0	2,99	-	-	-	-	-
Viscosidade SSU 100°F	32	36	39,4	15420	15230	23060	22000
Viscosidade SSF 122°F	-	-	-	520	502	790	775
Viscosidade SSF a 65°C	-	-	-	173	170	280	278
Ponto de Névoa, °C	-	2	-	-	-	-	-
Ponto de Fluidez, °C	-	-	0	12	14	12	12,5
Índice de Cetano	-	56	-	-	-	-	-
Enxofre % Peso	0,06	0,92	1,5	4,0	0,85	4,1	0,76
Poder Calorífico Superior	46420 kJ/kg 110940 kcal/kg	45832 kJ/kg 10954 kcal/kg	44857 kJ/kg 10721 kcal/kg	43270 kJ/kg 10327 kcal/kg	43501 kJ/kg 10397 kcal/kg	43103 kJ/kg 10397 kcal/kg	43865 kJ/kg 10484 kcal/kg
Poder Calorífico Inferior	43406 kJ/kg 10374 kcal/kg	42944 kJ/kg 10263 kcal/kg	40867 kJ/kg 9.976 kcal/kg	41186 kJ/kg 9844 kcal/kg	40935 kJ/kg 9784 kcal/kg	40935 kJ/kg 9784 kcal/kg	41388 kJ/kg 9892 kcal/kg

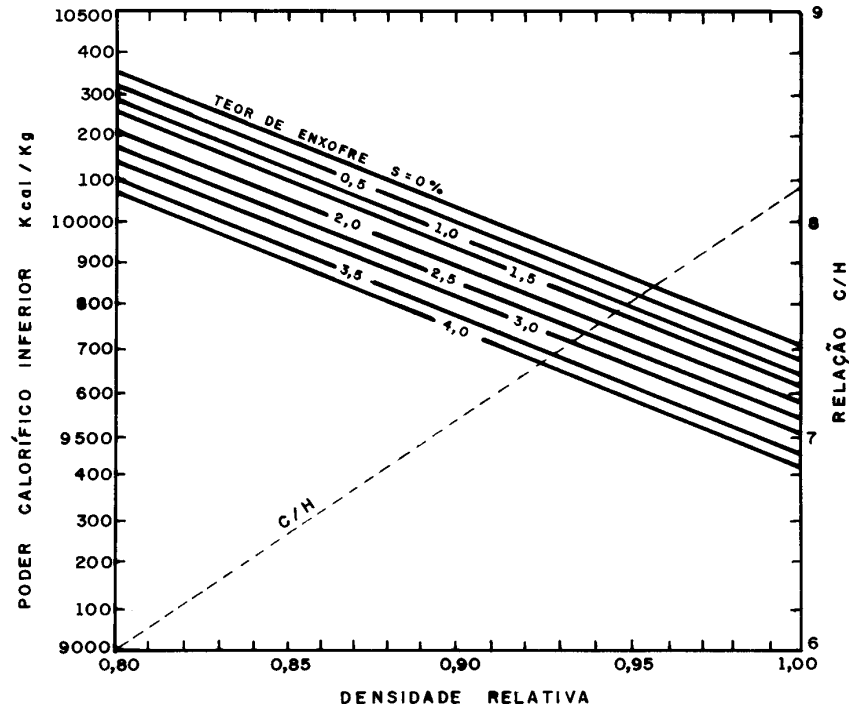


Figura 5. Relação entre Poder Calorífico, densidade relativa, teor de enxofre e carbono/hidrogênio para óleos combustíveis.

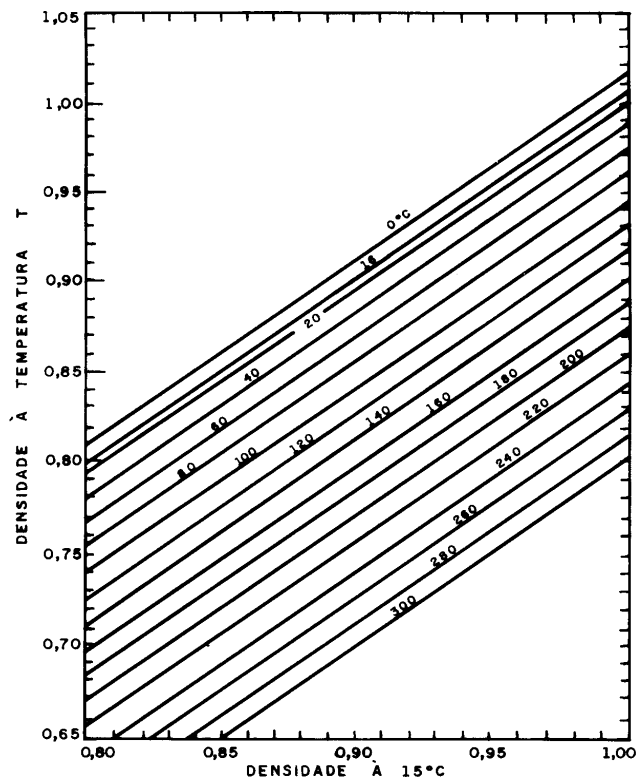


Figura 6. Relação entre a densidade de um óleo combustível à temperatura T e sua densidade à 15 °C.

Outros derivados, além dos óleos combustíveis, apresentam, aplicações específicas e algumas propriedades típicas estão disponíveis na tabela 4, e do álcool combustível na tabela 5.

Tabela 5. Características Técnicas do Álcool Etílico

No quadro apresentam-se as características do álcool etílico hidratado e anidro, comparando-o com a gasolina e álcool metílico.

Propriedade	Gasolina	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Metanol Anidro
Fórmula química	(CH) _x	C ₂ H ₅ OH	C ₂ H ₅ OH 19H ₂ O	CH ₃ OH
Peso molecular	144	46	-	32
Densidade a 20°C	0,73	0,79	0,81	0,79
Relação estequiométrica ar / combustível	15,2/1	9,0/1	8,3/1	6,45/1
% Carbono em peso	84,0	52,0	-	37,5
% Hidrogênio em peso	16,0	13,0	-	12,5
% Oxigênio em peso	-	35	-	50
Início temp. Ebulição °C	40,0	78,3	78,2	65
Término temp. de ebulição °C	250	78,3	78,2	65
Calor latente de vaporização kcal/kg	90	216	237	270
Temp. de auto-ignição °C	367	550	580	570
Poder calorífico inferior kcal/kg	10 500	6 400	5 952	4 600
Calor de combustão da mistura quimicamente correta kcal/litro	0,860	0,815	0,815	0,760
Índice de octano método Research	73	106	110	110
Índice de octano método motor	73	89	92	90
Índice de octano calculado	73	158	162	160
Fator de acréscimo do número de moléculas durante a combustão	1,055	1,063	1,077	1,061
Efeito de superalimentação	1,68%	7%	9%	14%
Graus GL (%Volume)	-	99,5	95	99,5
Graus INPM (%peso)	-	99,2	93,5	99,2

(extraído de "Os Motores de Combustão Interna" - Paulo Penido Filho, lemi, Belo Horizonte 1983).

2.2 - COMBUSTÍVEIS GASOSOS

Os combustíveis gasosos tem aumentado sua aplicabilidade na industria nacional, respondendo a demanda por fontes de energia mais limpas e eficientes. A limitação de seu crescimento está na disponibilidade e distância dos centros consumidores pela sua maior dificuldade de transportes.

Gás Liquefeito de Petróleo é importante combustível, tanto de aplicação industrial como doméstica. Gás Natural tem sido explorado recentemente, porém, deve ser transportado por gasodutos, o que dificulta sua maior utilização, dada a necessidade de investimento em infraestrutura. Outros gases, tais como, os gases manufaturados de nafta são produzidos e distribuídos localmente por rede de tubulações, além de gases residuais de refinaria, que tem aproveitamento restrito as proximidades desta.

Propriedade de combustíveis gasosos:

Algumas propriedades importantes necessitam ser conhecidas para os combustíveis gasosos. A composição química pode ser facilmente determinada através da análise laboratorial, em cromatógrafos químicos. O poder calorífico é normalmente dado em termos de energia/volume, relativa a determinada condição de Temperatura e Pressão. Em alguns casos pode ser fornecido em termos de energia/massa.

Densidade relativa: é a densidade do gás relativa ao ar nas mesmas condições de temperatura e pressão.

Número de Wobbe: é uma relação entre poder calorífico e densidade relativa dada pela equação:

$$W = \frac{PCi}{\sqrt{d_r}}$$

A importância do número de Wobbe está ligada a intercambiabilidade de gases para uma mesma aplicação ou queimador. Observe que a relação de Poder Calorífico e a raiz quadrada da densidade relativa tem a ver com a quantidade de energia (por volume) que é possível passar por determinado orifício com a queda de pressão correspondente. Em outras palavras, no que se refere a potencia de um dado queimador, gases com o mesmo número de Wobbe vão apresentar o mesmo desempenho energético.

Velocidade de chama: é a velocidade de uma frente de chama de uma mistura ar/combustível, efetuada sob determinadas condições. O conhecimento de parâmetros de velocidade de chama é útil também para a intercambiabilidade dos gases, no sentido de se garantir a estabilidade de combustão em queimadores. Dois fenômenos podem ocorrer em queimadores de gás:

- o descolamento da chama, quando a velocidade da mistura não queimada é maior que a velocidade de chama, e

- o retorno de chama, quando a velocidade de chama é maior que a velocidade da mistura ar/combustível.

Ambos podem trazer consequências desastrosas aos equipamentos e um queimador de gás deve ser projetado para determinadas faixas de velocidades de chama para se garantir a estabilidade.

Diversos métodos existem para a medição de velocidade de chama, porém nenhum destes reproduz com exatidão uma situação operacional. A velocidade de chama varia com a temperatura da mistura, a relação ar/combustível e com o padrão de fluxo, se laminar ou turbulento. As medidas de velocidade de chama em laboratório são feitas quase sempre nos regimes laminares, mas a maioria dos equipamentos industriais operam com combustão turbulenta. De qualquer maneira, o conhecimento da velocidade de chama em laboratório dá uma medida qualitativa do combustível. A fim de se utilizar este conceito o índice de Weaver, dá uma medida da velocidade de chama em relação ao hidrogênio, adotado como gás padrão. O índice de Weaver é definido como:

$$S = \frac{V_{gas}}{V_{H_2}}$$

Uma mistura de gases tem seu índice de Weaver calculada da seguinte forma:

$$S = \frac{aF_a + bF_b + L + iF_i}{A + 5z - 18,8Q + 1}$$

onde: F_i : coeficiente de velocidade chama
 a, b, \dots, i : frações molares dos constituintes
 A : relação ar/combustível volumétrica e estequiométrica da mistura
 z : fração molar dos inertes no combustível
 Q : fração molar do oxigênio no combustível

A tabela abaixo apresenta o coeficiente para alguns gases:

Gás	F
H ₂	338
CO	61
CH ₄	148
C ₂ H ₆	301
C ₃ H ₈	398
C ₄ H ₁₀	513
C ₂ H ₄	454
C ₈ H ₆	674

Gás Liquefeito de Petróleo

A aplicação industrial de GLP tem sido feita em processos em que a limpeza é fundamental, tais como em fornos alimentícios, metalurgia e cerâmica fina. O GLP é uma mistura de frações leves de petróleo na faixa de 3 e 4 carbonos na cadeia. Para efeitos práticos de combustão pode ser considerado como uma mistura em partes iguais de propano e butano. Um resultado médio de diversas análises é dado na tabela a seguir:

composição em massa	%
etano	1,0
propano	30,6
propeno	20,7
butano	32,9
buteno	14,7

PCS (kcal/Nm ³)	22600
PCI (kcal/Nm ³)	21050
densidade (kg/Nm ³)	2060
massa molecular média	48,79

Gás Natural

A exploração do gás natural pode ser feita através da produção do " gás associado" a um poço de petróleo, com frações de gás leves que justifiquem seu aproveitamento, ou em bacias produtoras de gás natural. Sempre há produção de gases associados a exploração do petróleo. Quando a produção de gás é pequena, ou o centro consumidor está muito distante, o gás é queimado localmente em chamas abertas na atmosfera (flare).

Gás natural é basicamente metano, com algumas parcelas leves de etano e propano. Sua composição pode variar de local a local. Algumas composições de gás natural em diversas bacias mundiais são apresentados na tabela 6.

Gases manufaturados

Gases são fabricados a partir de diversos combustíveis como carvão mineral, nafta e lenha. A composição varia principalmente em relação ao processo de fabricação e síntese e em relação a matéria prima. As tabelas 7, 8 e 9, a seguir, apresentam alguns dados sobre gases manufaturados de carvão, lenha e nafta petroquímica.

Tabela 6. Gás Natural

Localidade	Campo	Componentes % volume										PCS MJ/Nm ³ (seco)	Densidade
		M	E	P _r	B	P _e	H _x	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ S		
Argentina	Comodoro Rivadavia	95	4	-	-	-	-	-	-	-	1	38,50	0,576
Canadá (Alberto)	Turner Vallei	87,02	9,15	2,78	0,35	-	-	0,24	-	0,45	-	41,89	0,635
Chile (Terra do Sol)	Charnascilla	90,03	5,00	2,13	1,05	0,48	0,31	-	-	-	-	45,05	0,647
Arábia Saldita	Air Dar	27,80	26,10	18,40	8,20	2,60	1,70	9,80	-	5,20	H ₂ S	63,87	0,755
Rússia	Suretou	93,20	0,70	0,60	0,60	0,50	-	-	-	-	4,40	39,62	0,605
Venezuela	Santa Rosa	76,70	9,79	6,69	3,26	0,94	0,72	1,90	-	-	-	48,62	0,768
Venezuela	La Pica	90,20	6,40	-	-	-	-	0,10	0,30	3,00	-	39,62	0,601

Observação: M = Metano
 E = Etano
 P_r = Propano
 B = Butano
 P_e = Pentano
 H_x = Hexano

Tabela 7 - Gases manufacturados de carvão.

	gás de baixa temperatura	gás de retorta horizontal	gás de retorta cont. vert.	gás de retorta cont. vert. com vapor	gás de forno de carvão coque
Composição, % vol.					
O ₂	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
CO ₂	4	2	3	4	2
C ₄ H ₁₀	5,5	3,5	3	2	2,6
CO	4	8	9	18	7,4
H ₂	30	52	53,6	49,4	54
CH ₂	52	30	25	20	28
N ₂	4	4	6	6,2	5,6
Composição assumida					
CnHm	C ₄ H ₈	C _{2,5} H ₅	C _{2,5} H ₅	C ₁ H ₅	C _{2,5} H ₂
CH ₄	C _{1,25}	CH ₄	CH ₄	CH ₄	CH ₄
Densidade relativa ao ar	0,62	0,40	0,43	0,48	0,38
Ar teórico, vol/vol	8,235	4,904	4,708	4,060	4,572
Gases produtos teóricos					
CO ₂ vol/vol	0,950	0,490	0,490	0,500	0,439
H ₂ O vol/vol	1,690	1,210	1,156	0,974	1,165
N ₂ vol/vol	6,545	3,917	3,779	3,269	3,667
Total úmido	9,185	5,617	5,425	4,743	5,271
Total seco	7,495	4,407	4,269	3,769	4,106
Gases produtos teóricos % volume					
CO ₂	10,3	8,7	9,0	10,5	8,3
H ₂ O	18,4	21,5	21,3	20,3	21,1
N ₂	71,3	69,8	69,7	69,0	69,6
Ponto de orvalho, °C dos gases de exaustão	59	62	62	61	63
Poder calorífico superior BTU/ft ³	889,0	559,8	540,0	471,1	525,1
inferior BTU/ft ³	804,5	499,3	482,2	420,2	466,9
30 in Hg 60°F saturado					

Tabela 8 -Composição típica de gás de lenha com umidade de 15 a 22%.

composição	% volume
CO	18
H ₂	15
CH ₄	1
H ₂ O	12
CO ₂	10
N ₂	44
PCI (kcal/Nm ³)	~1000

Tabela 9 -Composição típica de gás de lenha com umidade de 15 a 22%.

composição	% volume
CO	18
H ₂	15
CH ₄	1
H ₂ O	12
CO ₂	10
N ₂	44
PCI (kcal/Nm ³)	~1000

2.3 - COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Os principais combustíveis sólidos são a lenha e o carvão mineral. Este tem importância grande na produção de energia térmica e elétrica na Europa, mas no Brasil está restrito a região Sul, próximos aos centros produtores. A lenha tem grande importância no Brasil, dada ao seu potencial de utilização.

Algumas propriedades devem ser conhecidas nos combustíveis sólidos:

Análise imediata:

São determinados alguns parâmetros relacionado com a utilização do combustível:

- Carbono fixo
- Material volátil
- Cinzas
- Umidade
- Enxôfre total

A matéria volátil é a parte do combustível que se separa em forma gasosa durante o aquecimento do mesmo. É composto de hidrocarbonetos eventualmente presentes na estrutura sólida e outros gases, que são formados num processo de pirólise, tais como o hidrogênio, monóxido de carbono e metano. O teor de voláteis tem influência no comprimento de chama, no acendimento e no volume necessário da fornalha.

O carbono fixo é o resíduo combustível deixado após a liberação do material volátil. Compõe-se principalmente de carbono, embora possa conter outros elementos não liberados durante a volatilização.

As cinzas englobam, todos os minerais incombustíveis e é composta basicamente de óxidos, tais como a alumina, óxido de cálcio, óxido de magnésio, etc.

A umidade presente no combustível sólido é importante para determinação de seu poder calorífico inferior.

Carvão Mineral

O carvão mineral brasileiro é utilizado principalmente na produção de energia termoelétrica e na indústria cimenteira. Devido ao seu alto teor de cinzas e enxôfre, não é muito utilizado industrialmente, a não ser nas localidades próximas a minas produtoras. As principais propriedades de carvões brasileiros são apresentados na tabela 10.

Tabela 10. Propriedades dos carvões nacionais.

Procedência	C %	S %	H ₂ %	N ₂ %	O ₂ %	Cinzas %	Umidade %	Mat. Voláteis %	PCS kcal/kg
Butiá	42,88	1,35	-	-	-	13,59	11,51	32,02	-
Jacuí	49,82	0,85	-	-	-	21,18	9,58	19,42	-
Tubarão	40,79	1,10	-	-	-	28,21	1,90	29,10	-
Crisciuma	46,90	1,63	-	-	-	23,64	1,50	27,96	-
RGS	46,0	12,99	4,05	0,29	9,27	27,4	11	-	4750
Paraná	56,6	2,0	3,11	0,80	17,73	25,76	15	-	6340
Sta. Catarina	51,8	3,6	3,34	0,52	7,58	33,09	10	-	6310
Cabo Frio (a)	20,5	-	-	-	-	-	15,8	42,0	2895
Cabo Frio (b)	17,6	-	-	-	-	-	13,2	49,5	3470
Rezende	12,6	-	-	-	-	-	12,0	33,2	2520

Obs.: Os quadros em branco representam propriedades não avaliadas.

Lenha

É um combustível amplamente utilizado no Brasil, tanto em aplicações domésticas como em aplicações industriais para geração de vapor, principalmente em pequenas unidades produtoras. É caracterizada por baixo teor de cinzas, ausência total de enxofre e umidade variável, a qual depende do tempo e método de armazenagem. A lenha quando cortada possui por volta de 50% de umidade. Estocada ao ar livre, em toras empilhadas, atinge a umidade de equilíbrio dentro de 3 a 6 meses, a qual, dependendo da umidade relativa do ar é por volta de 15 a 25%. A análise elementar da lenha varia pouco com o tipo de árvore, e isto é uma regra geral para todo material celulósico. Algumas propriedades são apresentadas nas tabelas a seguir. O poder calorífico inferior vai depender muito do teor de umidade. A variação do PCS quanto ao tipo de madeira também não é muito grande.

Composição média da lenha seca:

Elemento	C	H	O	N	cinzas
% massa	50,2	6,1	43,4	0,2	0,2

Poder Calorífico Superior: 4.400 kcal/kg

% água	50	35	10
PCI (kcal/kg)	1990	2770	4070

Bagaço de cana

O bagaço da cana-de-açúcar é o combustível das usinas de açúcar e álcool e utilizado localmente, logo após a moagem da cana. As modernas usinas não consomem todo o bagaço produzido e o excedente pode ser fornecido a terceiros, "in natura" ou seco e enfardado. O bagaço é queimado diretamente com 50% de umidade, como vem da colheita. A composição elementar é muito semelhante a lenha e suas propriedades podem ser tomadas como similares, exceto é claro, quanto a sua forma física.

Outros combustíveis sólidos vegetais, geralmente resíduos de produção agro-industriais são utilizados ocasionalmente, e lista de alguns com propriedades típicas é apresentado na tabela 11.

Tabela 11. Propriedades de diversos combustíveis sólidos vegetais.

Composição elementar média para cálculos.

biomassa	Componente % base seca (b.s.)						Cinzas
	C	H	O	N	S	Cl	
casca de arroz	41,0	4,3	35,9	0,5			18,3
borra de café	57,9	7,1	29,9	2,4			2,7
bagaco de cana	44,8	5,4	39,5	0,4		0,1	9,8
serragem	48,9	5,8	43,3	0,3	0,1		1,6

. Análise imediata, base seca.

Biomassa	%Voláteis	%Cinzas	%C fixo
Bagaco de cana	73,8	11,3	15,0
Casca de arroz	82,0	3,0	15,0
Borra de café	65,5	17,9	16,7
Serragem	69,3	13,4	17,3
Serragem	81,6	1,1	17,3

Análise elementar.

Biomassa	% C	% O	% H	% N	% S	% Cl	% Res.	obs.
Casca de arroz	41,0	35,9	4,3	0,4	0,0	0,1	18,3	base seca
	38,5	39,8	5,7	0,5	0,0		15,5	
	39,3	37,1	4,9	0,5	0,1	0,2	18,0	
Borra de café	59,5	30,7	7,3	2,5				base seca sem cinzas
	56,2	34,1	7,1	2,4	0,2			
Bagaco cana	44,8	39,6	5,3	0,4		0,1	9,8	base seca
Serragem	48,3	45,1	5,9	0,2		0,1	0,4	base seca

. Poder calorífico (MJ/Kg, base seca).

Biomassa	PCS	PCI	desvio
Casca de arroz	16,1	15,3	
	15,7		
	15,6	13,0	0,2
Bagaco de cana	17,3	16,2	
	19,1	17,9	
	16,7	14,4	0,3
Borra de café	26,9	25,2	
	24,3		
	21,8	19,1	0,5
Serragem	18,0	14,3	0,7

(*) Análise feita no Laboratório de Combustíveis do DETF - FEM - UNICAMP.

Análise imediata (*).

Biomassa	Carbono fixo % b.s.	voláteis % b.s.	cinzas % b.s.	umidade % b.u
Casca de arroz	12,0	72,2	15,8	10,0
Bagaco de cana	9,2	86,4	4,4	6,4
Borra de café	13,9	83,5	2,6	5,7
Serragem	15,2	84,2	0,6	12,9

(*) Análise feita no Laboratório de Combustíveis do DETF - FEM - UNICAMP.