



Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

# PRH-37

## Engenharia Mecânica para o Uso Eficiente de Biocombustíveis



anp  
Agência Nacional  
de Petróleo,  
Gás Natural e  
Energia Biomassa



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



# ÓLEOS VEGETAIS E DE FRITURA TRANSESTERIFICADOS: INFLUÊNCIA DAS SUAS CARACTERÍSTICAS NO CONSUMO E EMISSÕES DE MOTOR DIESEL.



O PRH-37: "Engenharia Mecânica para o uso Eficiente de Biocombustíveis", visa fornecer ao aluno um conjunto de conhecimentos fundamentais necessários à formação de engenheiros mecânicos que desejem atuar como especialistas em **equipamentos** e sistemas para transporte, armazenamento e **uso de biocombustíveis**. Essencialmente os alunos formados desenvolverão ter capacidade para atuar nos seguintes temas voltados para o uso eficiente de biocombustíveis:

- Análise e projeto de sistemas de armazenamento e transporte;
- Análise de desempenho e durabilidade de máquinas térmicas;
- Análise de emissão e dispersão de poluentes;
- Otimização de sistemas de co-geração de energia;
- Modelagem e simulação computacional.

Desta forma, o PRH-37 visa aglutinar a recente demanda de conhecimento nas áreas de Biocombustíveis e Eficiência Energéticas, já existente na EM/UFRJ, associada à uma demanda mundial pelo melhor aproveitamento das fontes fósseis de energia e do recente **uso de biocombustíveis**, no sentido de uma **otimização dos equipamentos** atualmente existentes para seu uso e na **minimização dos efeitos ao meio ambiente**.



- Análise e projeto de sistemas de armazenamento e transporte;
- **Análise de desempenho** e durabilidade **de máquinas térmicas;**
- **Análise de emissão** e dispersão **de poluentes;**
- **Otimização de sistemas de co-geração de energia;**
- Modelagem e simulação computacional.



# ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS TÉRMICAS

Dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa 1.0.5

Arquivo Editar Exibir Ferramentas Ajuda

máquina

**máquina** *Datação:* sXV cf. FichIVPM

Acepções | Locuções

- **substantivo feminino**
- 1 engenho destinado a transformar uma forma de energia em outra e/ou utilizar essa transformação para produzir determinado efeito [Genericamente, classificam-se as máquinas em *simples*, as constituídas de uma só peça (são elas: a alavanca, a cunha, o eixo, o parafuso, o plano inclinado e a roda) e *compostas*, aquelas cuja operabilidade depende da ação combinada de duas ou mais partes (são elas: a vapor, de explosão, de combustão, pneumática, elétrica, eletrônica, nuclear).]
- 2 qualquer equipamento que empregue força mecânica, composto de peças interligadas, cada qual com uma função específica, e em que o trabalho humano é substituído pela ação do mecanismo

Gramática | Coletivos | Sinônimos/Variantes | Parônimos | **Etimologia** | Noção

lat. *machīna, ae* 'máquina, aparelho; guindaste, polé; andaime; aríete, máquina de guerra; armas, meios, esforços; expediente, artifício, invenção' < gr. *mákhana, ês* 'invenção engenhosa; máquina; máquina de guerra; máquina de teatro; qualquer meio engenhoso de conseguir um fim; meio, expediente, artifício; habilidade, talento de imaginar, de inventar'; f.hist. sXV *machina*, 1716 *maquina*



# ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS TÉRMICAS

Máquina térmica é um aparelho capaz de transformar a energia química contida em um combustível em energia térmica.

Máquina de combustão interna é um aparelho capaz de transformar a energia química contida em um combustível em energia mecânica - movimento.





# ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS TÉRMICAS



**Combustível**



**Combustão**

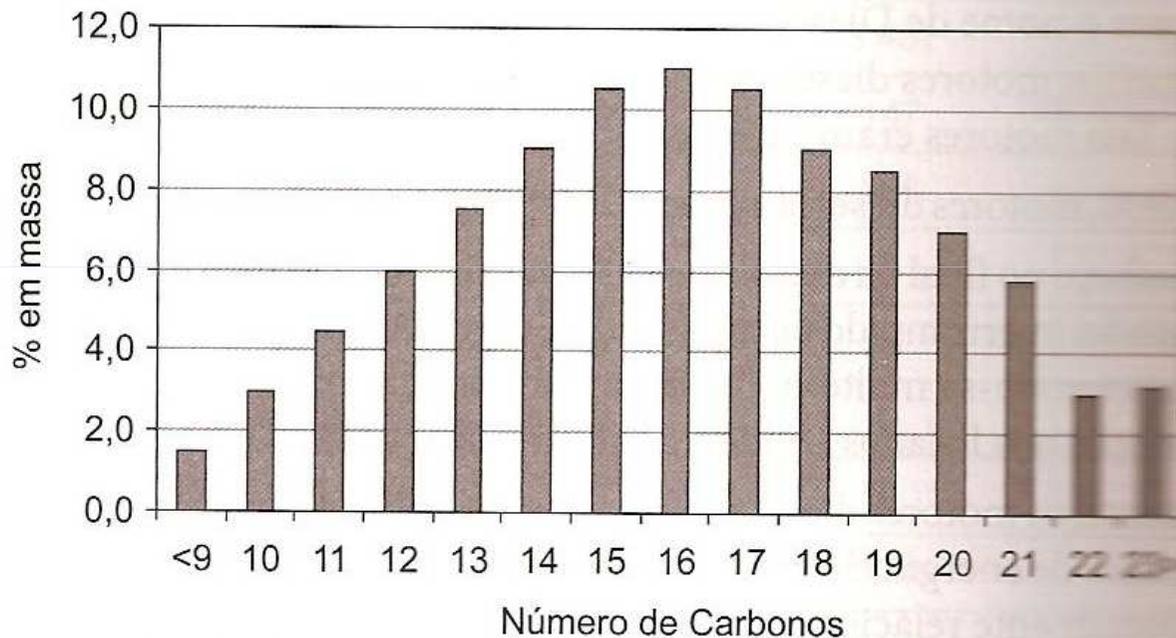


**ENERGIA**





## COMBUSTÍVEL DIESEL



Típica distribuição de frequência por número de carbonos do diesel nº 2

Nonano  
128,2 g/mol

Cetano  
226,44 g/mol

n-Tricosano  
324,63 g/mol



CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		TIPO A e B			ABNT	ASTM
		S50	S500	S1800 (2)		
Aspecto	-	Limpido e isento de impurezas			Visual (3)	
Cor	-	-4 vermelho			Visual (3)	
Cor ASTM, máx. (5)	-	3			14483	D1500 D6045
Teor de biodiesel (7)	% volume	-6			15568	-
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	-	-	-	D2622 D5453 D7039 D7212 (8) D7220 (8)
		-	500	1800	- 14533 -	D2622 D4294 D5453
Destilação					9619	D86
10% vol., recuperados	°C	Anotar				
50% vol., recuperados		245,0 a 310,0				
85% vol., recuperados, máx.		-	360	370		
90% vol., recuperados		360,0 (máx.)	Anotar	Anotar		
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	820 a 850 (9)	820 a 865q	820 a 880	7148	D1298
					14065	D4052



CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		TIPO A e B			ABNT	ASTM
		S50	S500	S1800 (2)		
Ponto de fulgor, mín.	°C	38			7974	D56 D93 D6371
Viscosidade a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 5,0			10441	D445
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	-10			14747	D6371
Número de cetano ou Número de cetano derivado (NCD), mín.	-	46	46	42	-	D613 D6890 D7170
Resíduo de carbono Ramsbottom	% massa	0,25			14318	D524
Cinzas, máx.	% massa	0,01			9842	D482
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx	-	1			14359	D130
Água (12) (13)	mg/kg	Anotar	-	-	-	D6304
Contaminação total (12) (14)	mg/kg	Anotar	-	-	-	-
Água e sedimentos, máx. (15)	% volume	0,05			-	D2709



CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		TIPO A e B			ABNT	ASTM
		S50	S500	S1800 (2)		
Estabilidade à oxidação (16)	mg/100mL	Anotar	-	-	-	D2274 (18) D5304
Índice de neutralização	mg KOH/g	Anotar	-	-	14248	D974
Lubricidade, máx.	µm		-19	-	-	
Condutividade elétrica, mín (20)	pS/m		25	-	-	D2624 D4308

[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2009/dezembro/ranp%2042%20-%202009.xml?f=templates\\$fn=document-frame.htm\\$3.0\\$q=\\$x=](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2009/dezembro/ranp%2042%20-%202009.xml?f=templates$fn=document-frame.htm$3.0$q=$x=)

Acessado em 05/11/2011



- (1) Poderão ser incluídas nesta especificação outras características, com seus respectivos limites, para óleo diesel obtido de processo diverso de refino e processamento de gás natural ou a partir de matéria prima distinta do petróleo.
- (2) A partir de 1º de janeiro de 2014, o óleo diesel S1800 deixará de ser comercializado como óleo diesel de uso rodoviário e será substituído integralmente pelo óleo diesel S500.
- (3) A visualização deverá ser realizada em proveta de vidro de 1L.
- (4) Usualmente de incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.
- (5) Limite requerido antes da adição do corante. O corante vermelho, segundo especificação constante da Tabela III deste Regulamento Técnico, deverá ser adicionado ao óleo diesel A S1800 no teor de 20 mg/L pelas Refinarias, Centrais de Matérias-Primas Petroquímicas e Importadores.
- (6) No percentual estabelecido pela legislação vigente. Será admitida variação de  $\pm 0,5\%$  volume. A determinação do teor de biodiesel no óleo diesel B deverá ser realizada segundo a norma EN 14078.
- (7) Aplicável apenas para o óleo diesel B.
- (8) Aplicável apenas para óleo diesel A.
- (9) Será admitida a faixa de 820 a 853 kg/m<sup>3</sup> para o óleo diesel B.
- (10) Limites conforme Tabela II.
- (11) Alternativamente, fica permitida a determinação do índice de cetano calculado pelo método NBR 14759 (ASTM D4737), para os óleos diesel A S500 e A S1800, quando o produto não contiver aditivo melhorador de cetano, com limite mínimo de 45. No caso de não-conformidade, o ensaio de número de cetano deverá ser realizado. O produtor e o importador deverão informar no Certificado da Qualidade nos casos em que for utilizado aditivo melhorador de cetano. Ressalta-se que o índice de cetano não traduz a qualidade de ignição do óleo diesel contendo biodiesel e/ou aditivo melhorador de cetano.
- (Nota)**(12) Aplicável na produção e na importação.
- (Nota)**(13) Poderá ser utilizado alternativamente o método EN ISO 12937.
- (14) Deverá ser determinada segundo o método EN 12662.
- (15) Aplicável na importação, antes da liberação do produto para comercialização.
- (16) Os resultados da estabilidade à oxidação e dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos poderão ser encaminhados ao distribuidor até 48 h após a comercialização do produto de modo a garantir o fluxo adequado do abastecimento.
- (17) Poderá ser determinado, alternativamente, pelo método EN 12916, aplicável ao óleo diesel B contendo até 5% de biodiesel. Os métodos ASTM D6591 e D5186 não se aplicam ao óleo diesel B.
- (18) O método ASTM D2274 se aplica apenas ao óleo diesel A.
- (19) Poderá ser determinada pelos métodos ISO 12156 ou ASTM D6079, sendo aplicáveis os limites de 460 $\mu$ m e 520 $\mu$ m, respectivamente. A medição da lubricidade poderá ser realizada após a adição do biodiesel, no teor estabelecido na legislação vigente.
- (20) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombeio do combustível pelo produtor e distribuidor. Para o distribuidor, o controle e o atendimento ao limite especificado serão compulsória a partir de 01.01.2010.

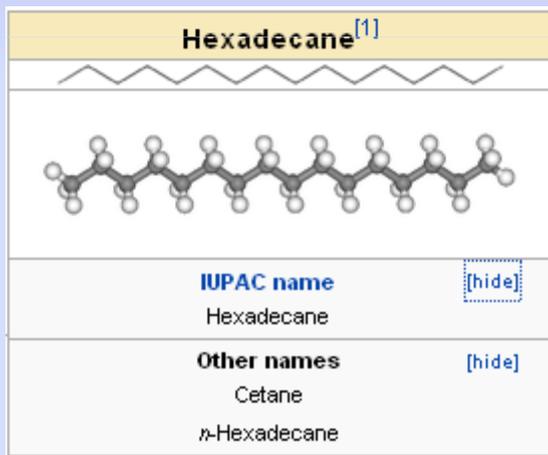


<b>ALCANOS</b>	<b>MASSA MOLAR</b>	<b>MASSA (%)</b>	<b>g/mol</b>
Nonano	128,2	1,50	1,92
Decano	142,29	3,00	4,27
Undecano	156,31	4,50	7,03
Dodecano	170,34	6,00	10,22
Tridecano	184,4	7,50	13,83
Tetradecano	198,4	9,00	17,86
Pentadecano	212,4	10,50	22,30
Hexadecano	226,4	11,00	24,90
Heptadecano	240,5	10,50	25,25
Octadecano	254,5	9,00	22,91
Nonadecano	268,5	8,50	22,82
Eicosano	282,6	7,00	19,78
Heneicosano	296,6	5,50	16,31
Docosano	310,6	3,00	9,32
Tricosano	324,6	3,50	11,36
	<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>230,09</b>



# COMBUSTÍVEL DIESEL

Cetano:  $C_{16}H_{34}$



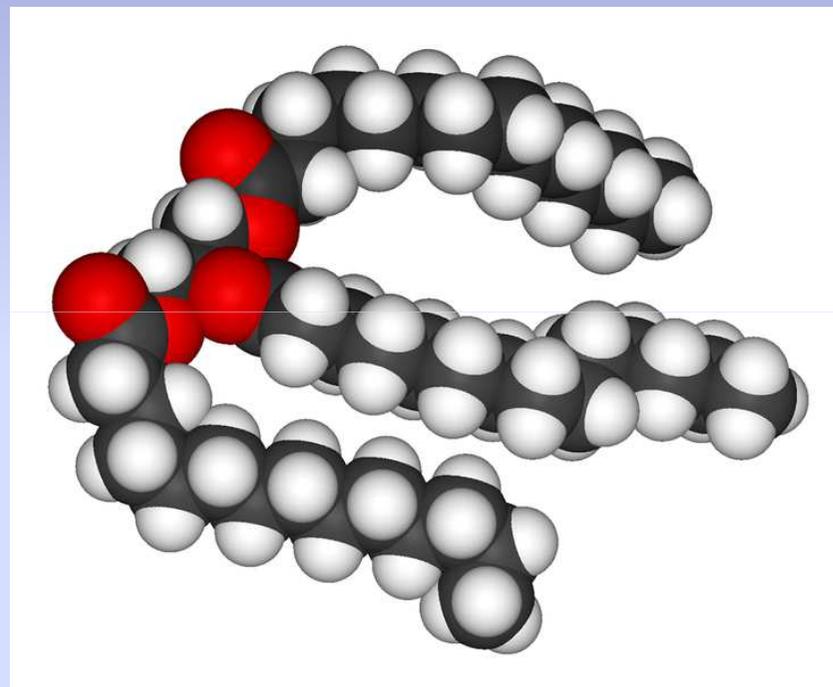
Identifiers	
CAS number	544-76-3 ✓
PubChem	11006
ChemSpider	10540
EC number	208-878-9
SMILES	<a href="#">[hide]</a> CCCCCCCCCCCCCCCC
InChI	<a href="#">[hide]</a> InChI=1/C16H34 /c1-3-5-7-9-11-13-15-16-14-12-10-8-6-4-2 /h3-16H2,1-2H3
InChI key	<a href="#">[hide]</a> DCAYPVUWAIABOU-UHFFFAOYAR

Properties	
Molecular formula	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
Molar mass	226.44 g/mol
Melting point	18 °C, 291 K, 64 °F
Boiling point	287 °C, 560 K, 549 °F
Solubility in water	Insoluble
Hazards	
Flash point	135 °C
Autoignition temperature	201 °C
✓ (what is this?) (verify) Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25 °C, 100 kPa)	
<a href="#">Infobox references</a>	



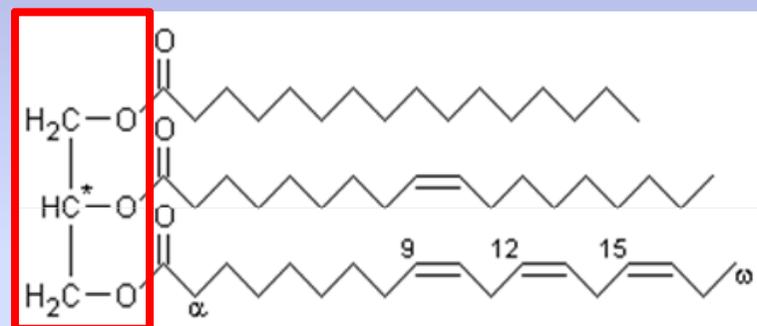
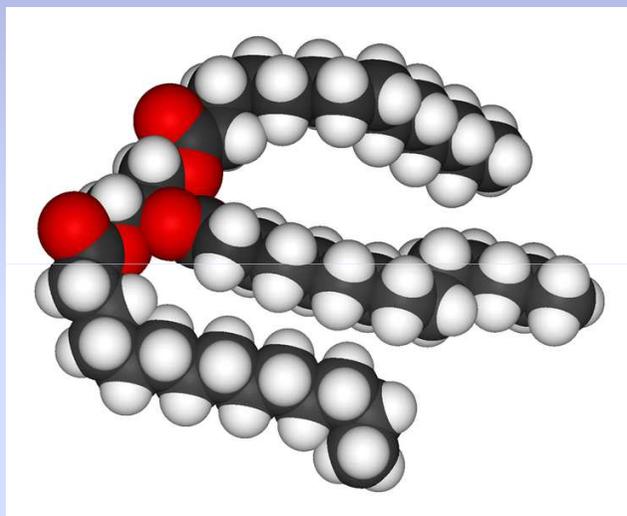
## COMPOSIÇÃO DOS ÓLEOS VEGETAIS

- Ácidos graxos livres
- Glicerol
- Mono, di e triglicerídeos
- Fosfolipídios
- Lipoproteínas
- Glicolipídios
- Cera
- Terpenos ( $C_{10}H_{16}O_3$  e  $C_{8}H_{12}O_4$ )
- Outros compostos





Os óleos vegetais e as gorduras de origem animal são triglicerídeos, isto é, ésteres neutros de glicerol e ácidos graxos de cadeia longa.



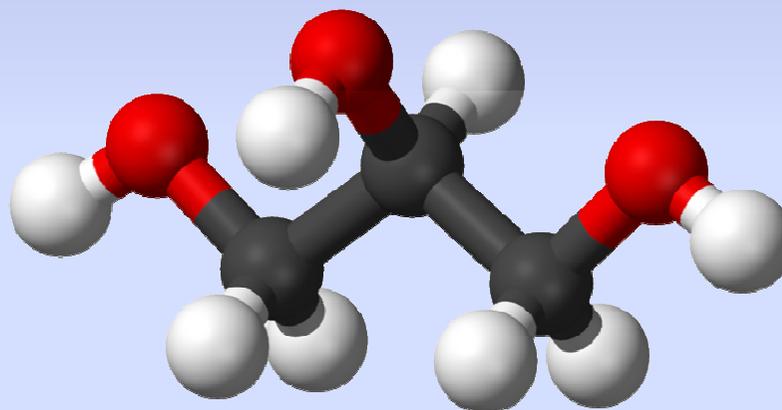
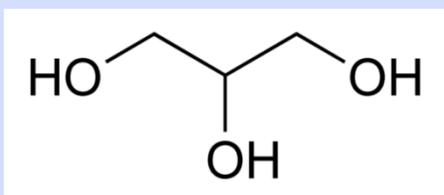
Esquerda: Glicerol ou Glicerina

Direita: Ácido Palmítico, Ácido Oléico e Ácido Linolênico.

O processo de transesterificação  
separa os ésteres da glicerina



## Glicerina é um subproduto com aplicações no campo da farmácia e outras indústrias





## COMPOSIÇÃO DOS ÓLEOS VEGETAIS

ÁCIDOS GRAXOS	Massa Molar (g/mol)	Soja	Mamona	Pinhão Manso	Dendê	Babaçu
Cáprico	172,26					6,30
Caprílico	144,21					6,80
Esteárico	284,48	2,40	1,00	5,10	4,50	3,40
Laúrico	200,32					41,00
Linoléico	280,45	51,20	5,00	38,10	10,90	2,50
Linolênico	278,43	8,50	1,00	0,20		
Mirístico	228,37				1,10	16,20
Oleico	282,46	23,50	6,00	41,10	43,50	14,20
Palmítico	256,42	11,00	1,00	14,30	39,70	9,40
Palmitoléico	254,41			1,30	0,30	
Ricinoléico	298,46		85,00			
Outros		3,40				0,20
	TOTAL	100%	99%	100%	100%	100%

Fonte: CETEC-MG



## COMPOSIÇÃO DOS ÓLEOS VEGETAIS

ÁCIDOS GRAXOS	Soja	Mamona	Pinhão Manso	Dendê	Babaçu
Cáprico					10,85
Caprílico					9,81
Estearico	6,83	2,84	14,51	12,80	9,67
Laúrico					82,13
Linoléico	143,59	14,02	106,85	30,57	7,01
Linolênico	23,67	2,78	0,56		
Mirístico				2,51	37,00
Oleico	66,38	16,95	116,09	122,87	40,11
Palmítico	28,21	2,56	36,67	101,80	24,10
Palmitoléico			3,31	0,76	
Ricinoléico		253,69			
Outros	0,00				0,00
<b>TOTAL (g/mol)</b>	<b>268,67</b>	<b>292,85</b>	<b>277,98</b>	<b>271,31</b>	<b>220,68</b>



## MASSA MOLAR

**DIESEL – 230,09 g/mol**

**MAMONA – 292,85 g/mol**

**SOJA – 268,67 g/mol**



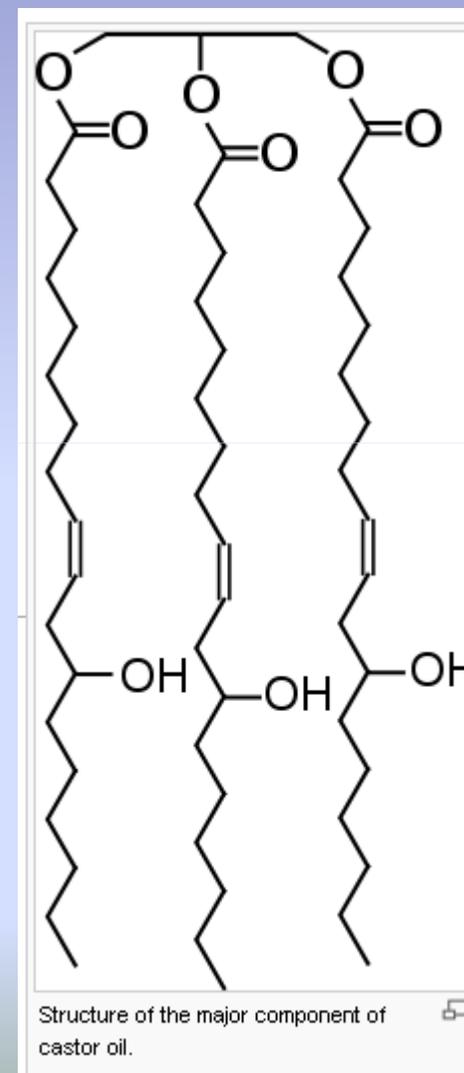
## Ricinoléico

## ÓLEO VEGETAL

## Óleo de Mamona

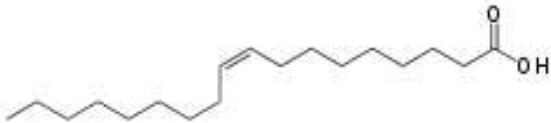
Ricinoleic acid	
<b>IUPAC name</b>	[hide] (9Z,12R)-12-Hydroxyoctadec-9-enoic acid
<b>Other names</b>	[hide] R12-Hydroxy-9- <i>c/s</i> -octadecenoic acid
Identifiers	
CAS number	141-22-0 ✓
PubChem	643684
ChemSpider	558800
UNII	I2D0F69854 ✓
SMILES	[show]
InChI	[show]
InChI key	[show]
Properties	
Molecular formula	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>3</sub>
Molar mass	298.461 g/mol
✓ (what is this?) (verify) Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25 °C, 100 kPa)	

MAMONA g/mol			
Ricinoléico	85,00%	298,46	253,69



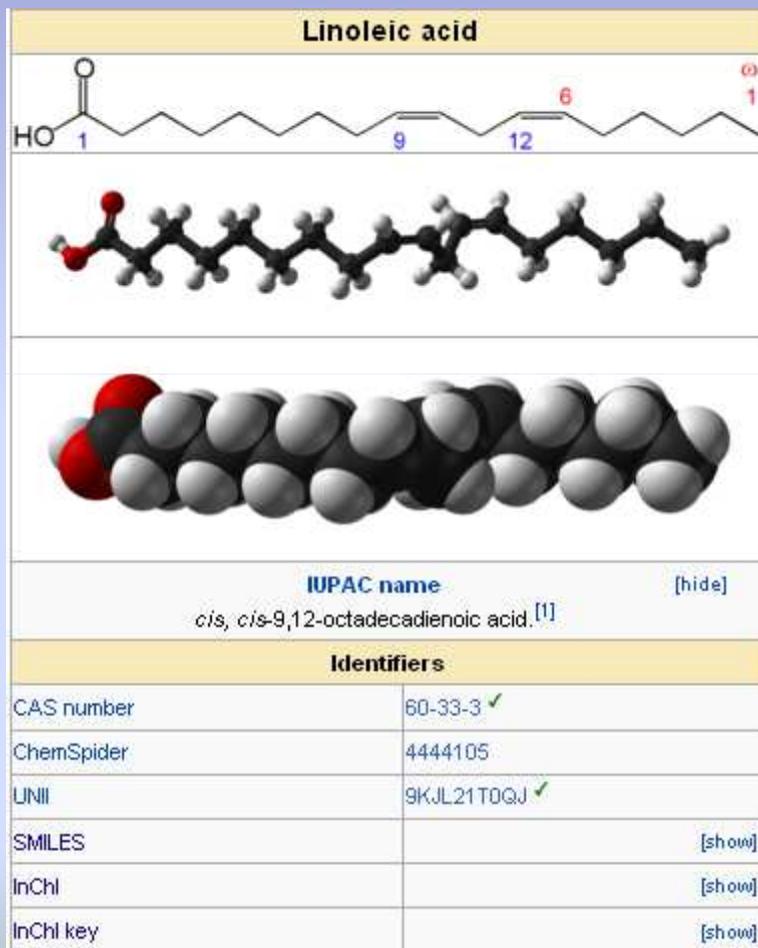


# ÓLEO VEGETAL

Oleic acid		Oleic acid	
		<b>Properties</b>	
		Molecular formula	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>
<b>IUPAC name</b> <a href="#">[hide]</a>		Molar mass	282.4614 g/mol
(9Z)-Octadec-9-enoic acid		Appearance	Pale yellow or brownish yellow oily liquid with lard-like odor
<b>Other names</b> <a href="#">[hide]</a>		Density	0.895 g/mL
(9Z)-Octadecenoic acid		Melting point	13-14 °C (286 K)
(Z)-Octadec-9-enoic acid		Boiling point	360 °C (633 K) (760mm Hg) <sup>[1]</sup>
<i>cis</i> -9-Octadecenoic acid		Solubility in water	Insoluble
<i>cis</i> -Δ <sup>9</sup> -Octadecenoic acid		Solubility in methanol	Soluble
Oleic acid		<b>Hazards</b>	
18:1 <i>cis</i> -9		MSDS	JT Baker <a href="#">↗</a>
<b>Identifiers</b>		✓ (what is this?) (verify)	
CAS number	112-80-1 ✓	Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25 °C, 100 kPa)	
SMILES	<a href="#">[show]</a>	Infobox references	



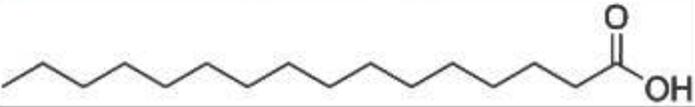
# ÓLEO VEGETAL



Linoleic acid	
Properties	
Molecular formula	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
Molar mass	280.45 g mol <sup>-1</sup>
Density	0.9 g/cm <sup>3</sup>
Melting point	-5 °C
Boiling point	365°C at 760 Torr
Solubility in methanol	methanol 3.22 M <sup>[2]</sup>
Vapor pressure	16 Torr at 229°C
✓ (what is this?) (verify)	
Except where noted otherwise, data are given for materials in their <b>standard state</b> (at 25 °C, 100 kPa)	
<span>Infobox references</span>	



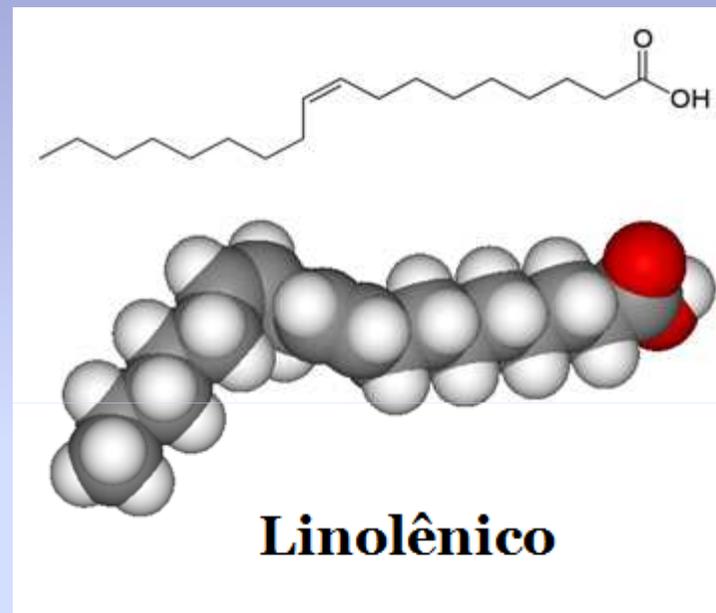
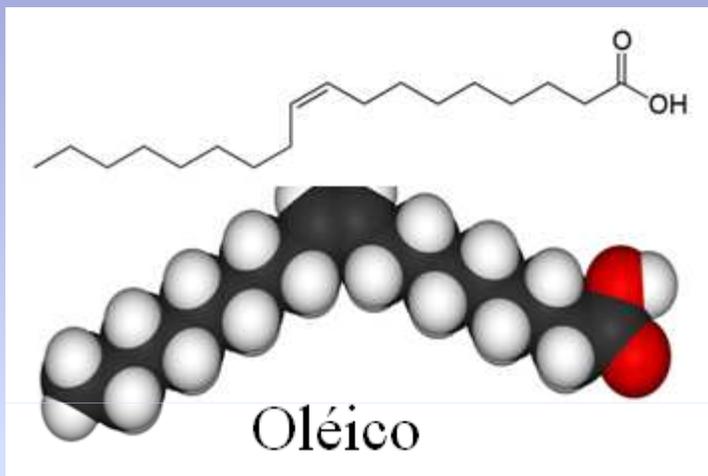
# ÓLEO VEGETAL

Palmitic acid <sup>[1]</sup>	
	
	
<b>IUPAC name</b>	<a href="#">[hide]</a>
hexadecanoic acid	
<b>Other names</b>	<a href="#">[hide]</a>
C16:0 (Lipid numbers)	
Identifiers	
CAS number	57-10-3 ✓
PubChem	985
IUPHAR ligand	1055
SMILES	<a href="#">[show]</a>

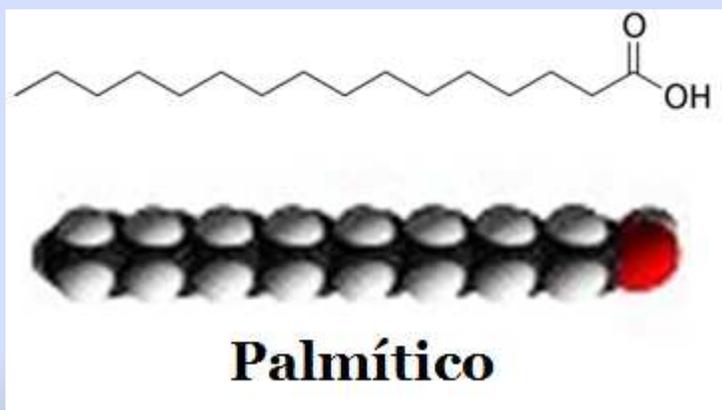
Palmitic acid <sup>[1]</sup>	
Properties	
Molecular formula	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
Molar mass	256.42 g/mol
Appearance	White crystals
Density	0.853 g/cm <sup>3</sup> at 62 °C
Melting point	62.9 °C <sup>[2]</sup>
Boiling point	351-352 °C <sup>[3]</sup> 215 °C at 15 mmHg
Solubility in water	Insoluble
✓ (what is this?) (verify)	
Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25 °C, 100 kPa)	



# ÓLEO VEGETAL



## SOJA



SOJA (g/mol)			
Linoléico	51,20%	280,45	143,5904
Óleico	23,50%	282,42	66,3687
Palmítico	11,00%	256,42	28,2062
	85,70%		238,1653



## ÓLEO VEGETAL

MAMONA – 253,7 g/mol

85% óleo

SOJA – 238,17 g/mol



CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	METODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20° C	kg/m³	850-900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 EN ISSO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	Mm²/s	3,0-6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de Água, máx. (2)	mg/kg	500	-	6304	EN ISSO 12937
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24	-	-	EN ISSO 12662
Ponto de fulgor, min. (3)	°C	100	14598	93	EN ISSO 3679
Teor de éster, mín % massa 96,5 l	% massa	96,5	15764	-	EN 14103
Resíduo de carbono (4)	% massa	0,05	15586	4530	-
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	- '-	5453	- EN ISSO 20846 EM ISSO 20884
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5	15554 15555 15553 15556	-	EN 14108 EN 14109 EN 14538



CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	METODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5	1553 1556	-	EN 14538
Fósforo, máx.	mg/kg	10	15553	4951	EN 14107
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx.	-	1	14359	130	EN ISSO 2160
Número de Cetano (5)	-	Anotar	-	613 6890 (6)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	19 (7)	14717	6371	EN ISO 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	1444	664	EN ISO 14104 (8)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15341 15771	6584 (8)	EN ISO 14105 (8) EN ISO 14106 (8)
Glicerol total, máx.	% massa	0,25	15344	6584 980	EN ISO 14105 (8)
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar	15342 15344	6584 (8)	EN ISO 14105 (8)
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,2	15343	-	EM 14110
Índice de Iodo (5)	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.(2)	h	6	-	-	EN 14111 (8)



CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	850-900	7148	1298	EN ISO
			14065	4052	3675 EN ISSO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	Mm <sup>2</sup> /s	3,0-6,0			EN ISO
			10441	445	3104
Ponto de fulgor, mín. (3)	°C	100	14598	93	EN ISSO
					3679
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	- '-	5453	- EN ISSO 20846 EM ISSO 20884
Número de Cetano (5)	-	Anotar	-	613 6890 (6)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	19 (7)	14717	6371	EN ISO 116

[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates\\$fn=document-frame.htm\\$3.0\\$g=\\$x=\\$nc=7834](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates$fn=document-frame.htm$3.0$g=$x=$nc=7834)

Acessado em 05/11/2011



Nota:

- (1) Límpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio.
- (2) O limite indicado deve ser atendido na certificação do biodiesel pelo produtor ou importador.
- (3) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.
- (4) O resíduo deve ser avaliado em 100% da amostra.
- (5) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados pelo produtor de biodiesel à ANP, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas.
- (6) Poderá ser utilizado como método alternativo o método ASTM D6890 para número de cetano.
- (7) O limite máximo de 19°C é válido para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Bahia, devendo ser anotado para as demais regiões. O biodiesel poderá ser entregue com temperaturas superiores ao limite supramencionado, caso haja acordo entre as partes envolvidas. Os métodos de análise indicados não podem ser empregados para biodiesel oriundo apenas de mamona.
- (8) Os métodos referenciados demandam validação para as matérias-primas não previstas no método e rota de produção etílica."



CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	
		BIODIESEL	DIESEL S50
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	850-900	820-850 (880- S1800)
Viscosidade Cinemática a 40°C	Mm <sup>2</sup> /s	3,0-6,0	2,0 – 5,0
Ponto de fulgor, mín.(3)	°C	100,0	38
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	50
Número de Cetano (5)	-	Anotar	46
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	19 (7)	-10



# ÓLEO TRANSESTERIFICADOS

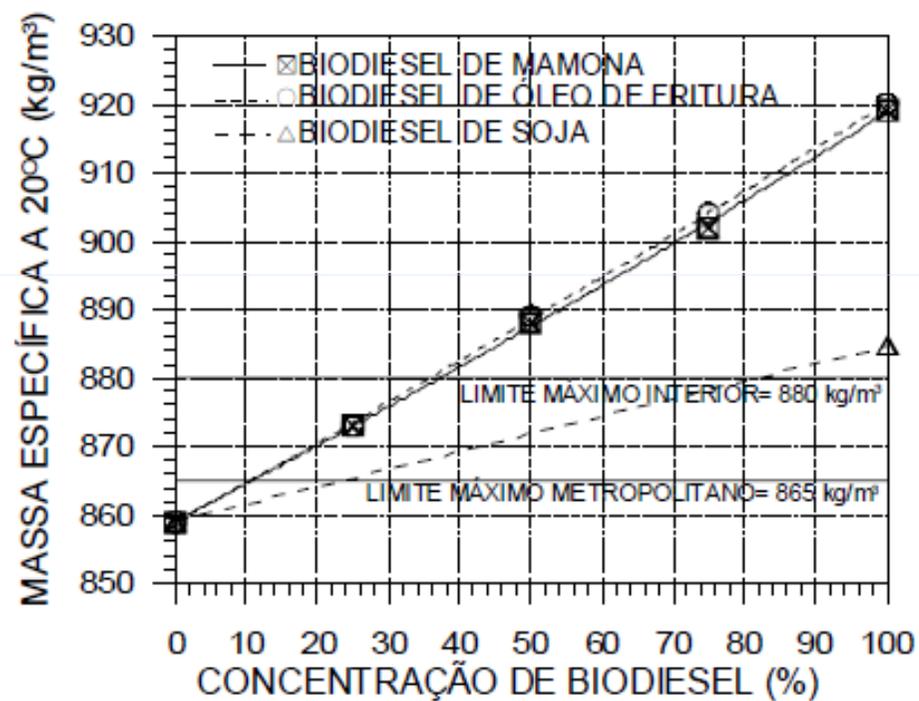
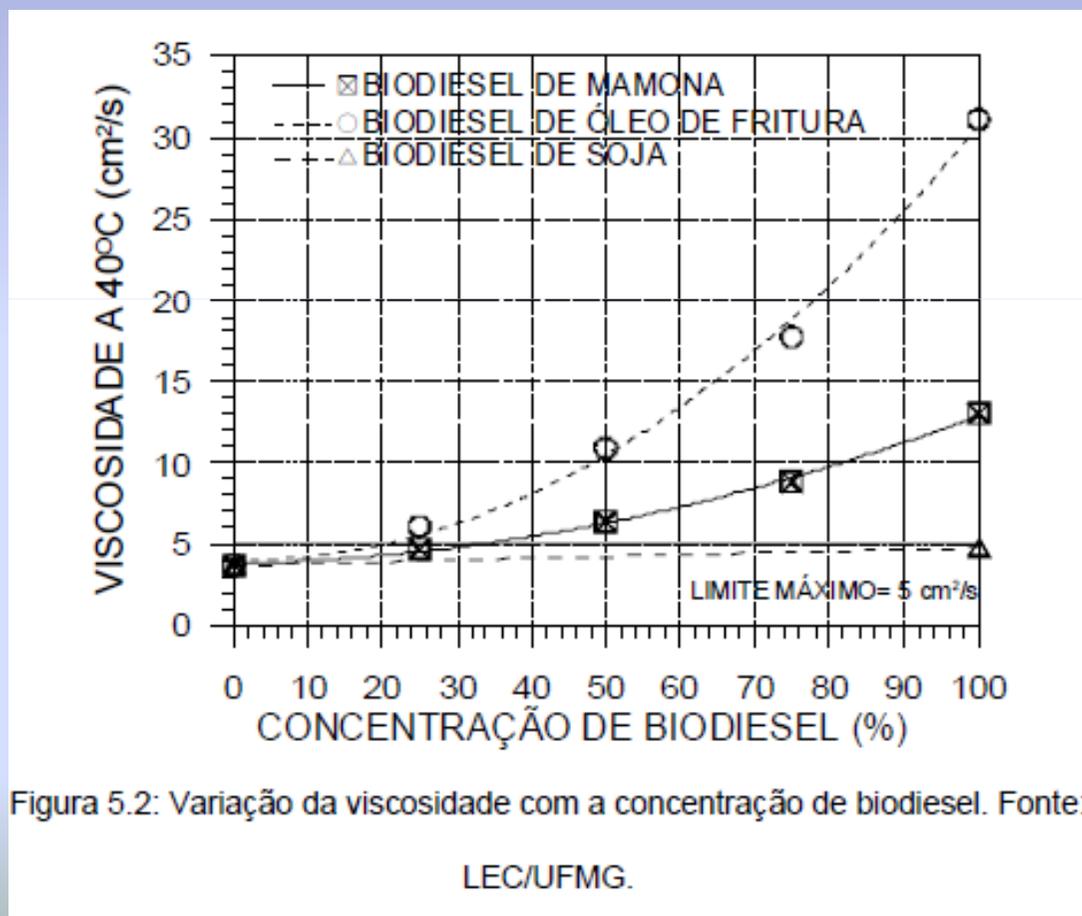


Figura 5.1: Variação da massa específica com a concentração de biodiesel. Fonte:

LEC/UFMG.



# ÓLEO TRANSESTERIFICADOS





# ÓLEO TRANSESTERIFICADOS

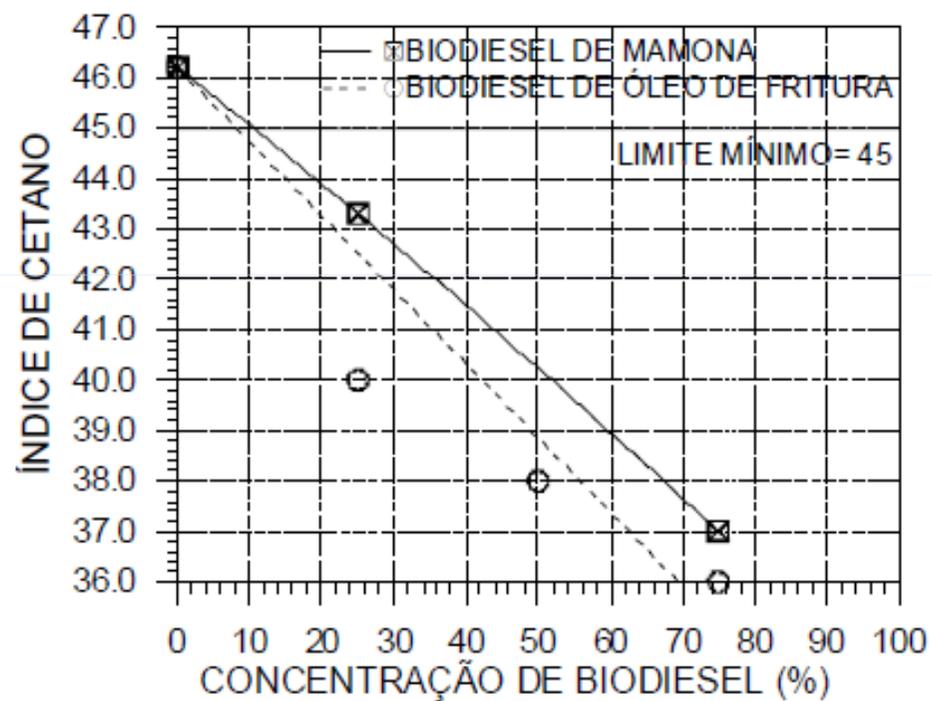


Figura 5.3: Variação do índice de cetano com a concentração de biodiesel. Fonte:

LEC/UFG.



# ÓLEO TRANSESTERIFICADOS

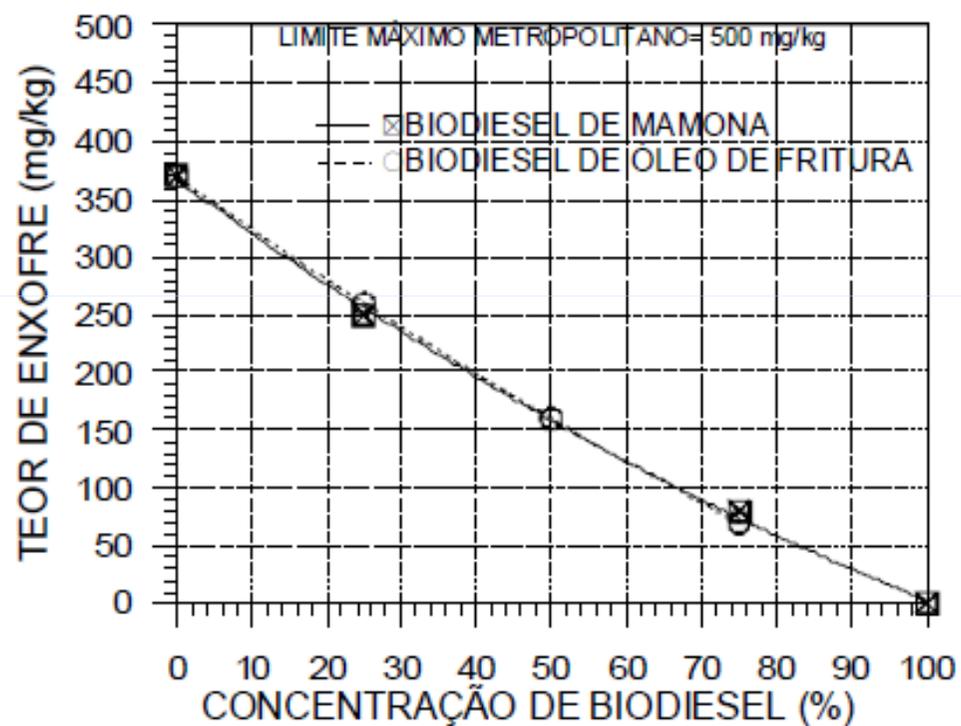
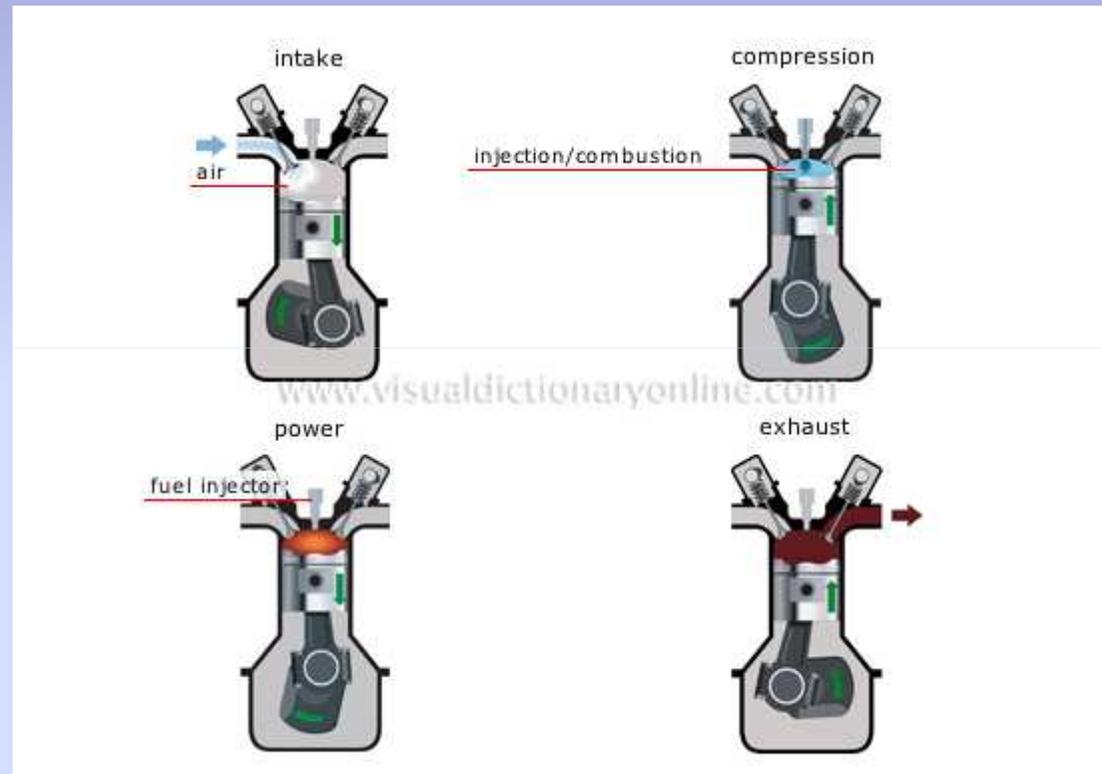
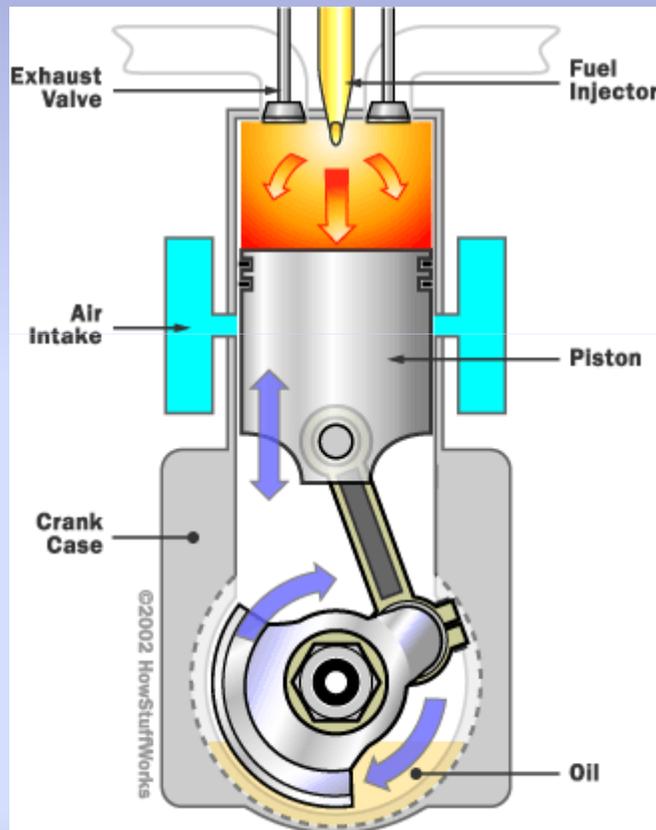


Figura 5.6: Variação do teor de enxofre com a concentração de biodiesel. Fonte: LMT/COPPE/UFRJ.

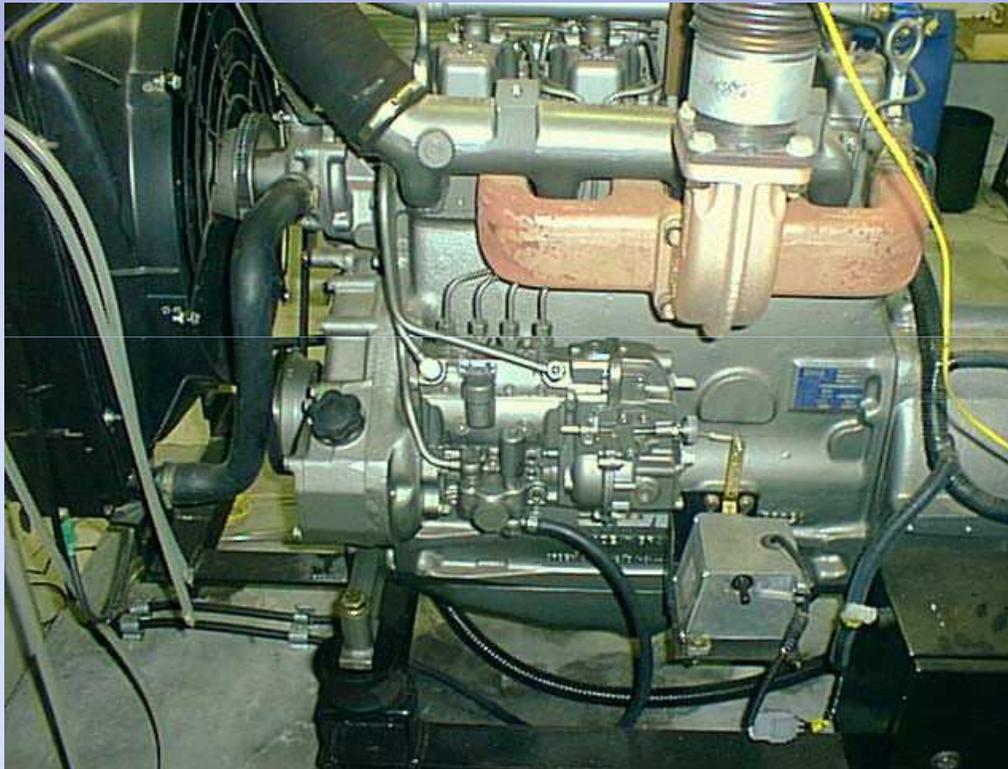


# Máquina de combustão interna por compressão MOTOR DIESEL





## Máquina de combustão interna por compressão MOTOR DIESEL



**BOMBA INJETORA  
(VOLUMÉTRICA)**



**INJETOR**



## Máquina de combustão interna por compressão MOTOR DIESEL

<b>Desempenho do Motor</b>	<b>Características do Combustível</b>
<b>Partida</b>	<b>Número de Cetano - maior</b>
<b>Ruído</b>	
<b>Atrito (Lubricidade )</b>	<b>Viscosidade Cinemática - maior</b>
<b>Potência</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Viscosidade Cinemática - menor</li><li>•Poder Calorífico - maior</li><li>•Estabilidade química</li></ul>
<b>Consumo</b>	
<b>Operação em baixa Temperatura</b>	<b>Teor menor de ceras e de Parafina</b>
<b>Emissões de NOx e Particulados</b>	<b>Viscosidade Cinemática - menor</b>

$$T = Fd$$



## Máquina de combustão interna por compressão MOTOR DIESEL

### Torque

O torque (N.m) é dado pelo produto da força (N) produzida pelo motor para vencer a carga resistiva imposta pelo dinamômetro, mantendo a velocidade de rotação do eixo, e a distância (m) do ponto de aplicação desta força à linha de centro do eixo:

$$T = Fd$$

### Potência

Potência de frenagem (W) é a potência disponível no eixo de um motor de combustão interna. É dada pelo produto do torque de frenagem e a velocidade de rotação do eixo do motor:

$$P_b = T\omega$$

$$\frac{T}{BMEP} = \frac{F d m_F n_R T}{dt N_{cil} V_d} = \frac{dV_F n_R P_b}{dt N_{cil} V_d \omega}$$



## Máquina de combustão interna por compressão MOTOR DIESEL

### Pressão Média Efetiva

A pressão média efetiva relaciona o trabalho desenvolvido por ciclo e o volume deslocado pelos cilindros do motor; é calculada considerando no torque de frenagem ou na potência disponível no eixo de motor:

$$BMEP = \frac{n_R T}{N_c V_d} = \frac{n_R P_b}{N_c V_d \omega}$$

BMPE – pressão média efetiva de frenagem (Pa)

$\eta_R$  – número de revoluções por ciclo

$N_{cil}$  – número de cilindros

$V_d$  – volume deslocado por um cilindro (m<sup>3</sup>)

### Consumo Específico de Combustível

Medida mais representativa do desempenho do motor; relaciona a quantidade de combustível consumido por unidade de potência produzida pelo motor:

$$SFC = \frac{\dot{m}_F}{P_b}$$

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = \frac{dW_F}{dE_F} = \frac{dV_F n_R T}{m_F Q_L}$$

•Eficiência Mecânica



Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

relaciona a potência disponível no eixo do motor e a a e a potência indicada:

## Máquina de combustão interna por compressão MOTOR DIESEL

### Eficiência de Conversão do Combustível

A eficiência de conversão do combustível relaciona o trabalho produzido pelo motor por ciclo e a energia disponibilizada pelo combustível, representada pela sua entalpia de reação ou calor de combustão:

$$\eta_F = \frac{P_i}{\dot{m}_F Q_L}$$

### Eficiência Mecânica

Eficiência mecânica relaciona a potência disponível no eixo do motor e a a e a potência indicada:

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = \frac{\eta_t}{\eta_F}$$

$\eta_F$  – eficiência de conversão do combustível (adimensional)

$Q_{LHV}$  – poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

$P_i$  – potência indicada do motor (W)

$\dot{m}_F$  – escoamento de massa de combustível para o motor (kg/s)

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = \frac{F d m_F n_R T}{P_i} = \frac{d \nabla_F n_R P_b}{P_i}$$

•Eficiência Mecânica

relaciona a potência disponível no eixo do motor e a a potência indicada:



Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

## Máquina de combustão interna por compressão MOTOR DIESEL

### Eficiência Volumétrica

A eficiência volumétrica relaciona a massa de ar real admitida por ciclo do motor e a massa que ocuparia o volume deslocado em um estado padrão de referência:

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,0} N_c V_d}$$

### Eficiência Térmica

A eficiência térmica do ciclo relaciona a potência disponível no eixo do motor e a energia liberada na combustão:

$$\eta_t = \frac{P_b}{\dot{m}_F Q_L}$$

$m_a$  – massa de ar admitido por ciclo (kg)

$\rho_{a,0}$  – escoamento de massa de combustível para o motor (kg/s)



# O PROCESSO DE COMBUSTÃO

## Principais componentes do ar seco.

COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO (ppm/Volume)	MASSA MOLECULAR (kg/kmol)	FRAÇÃO MOLAR	RAZÃO MOLAR
Nitrogênio	780.900	28,012	0,7905	1,000
Oxigênio	209.500	31,998	0,2095	3,773
Argônio	9.300	38,948		-
Dióxido de Carbono	300	40,009		-
AR	1.000.000	28,962	1,0000	4,377

Fonte: Heywood, 1988



## O PROCESSO DE COMBUSTÃO

A razão ar/combustível

É a razão entre a massa de ar e a massa de combustível admitida pelo motor por ciclo.

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \left(\frac{F}{A}\right)^{-1} = \frac{m_a}{m_F} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_F}$$

Razão estequiométrica

é a relação entre a massa de ar e massa de combustível que proporciona uma reação de combustão completa, ou seja, resulta unicamente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor d'água (H<sub>2</sub>O) e nitrogênio (N<sub>2</sub>) como produtos da combustão.





## O PROCESSO DE COMBUSTÃO

Razão de equivalência da mistura

É a relação entre a razão ar/combustível admitida pelo motor e a razão ar/combustível estequiométrica para o mesmo combustível.

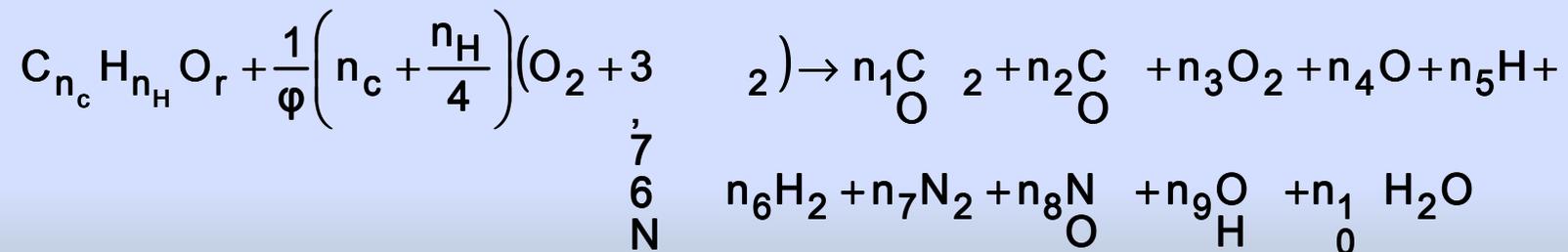
$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_s}$$



# O PROCESSO DE COMBUSTÃO

## FORMAÇÃO E EMISSÕES DE POLUENTES

- Depende, fundamentalmente, da proporção entre o combustível e o ar que alimentam o motor, bem como, da integralidade da combustão.
- Os motores a combustão interna com ignição por compressão operam com uma razão combustível/ar extremamente pobre.
- A queima do combustível é quase completa – cerca de 98% de eficiência.
- A equação da combustão, considerados os dez elementos mais significativos em concentração:





# O PROCESSO DE COMBUSTÃO

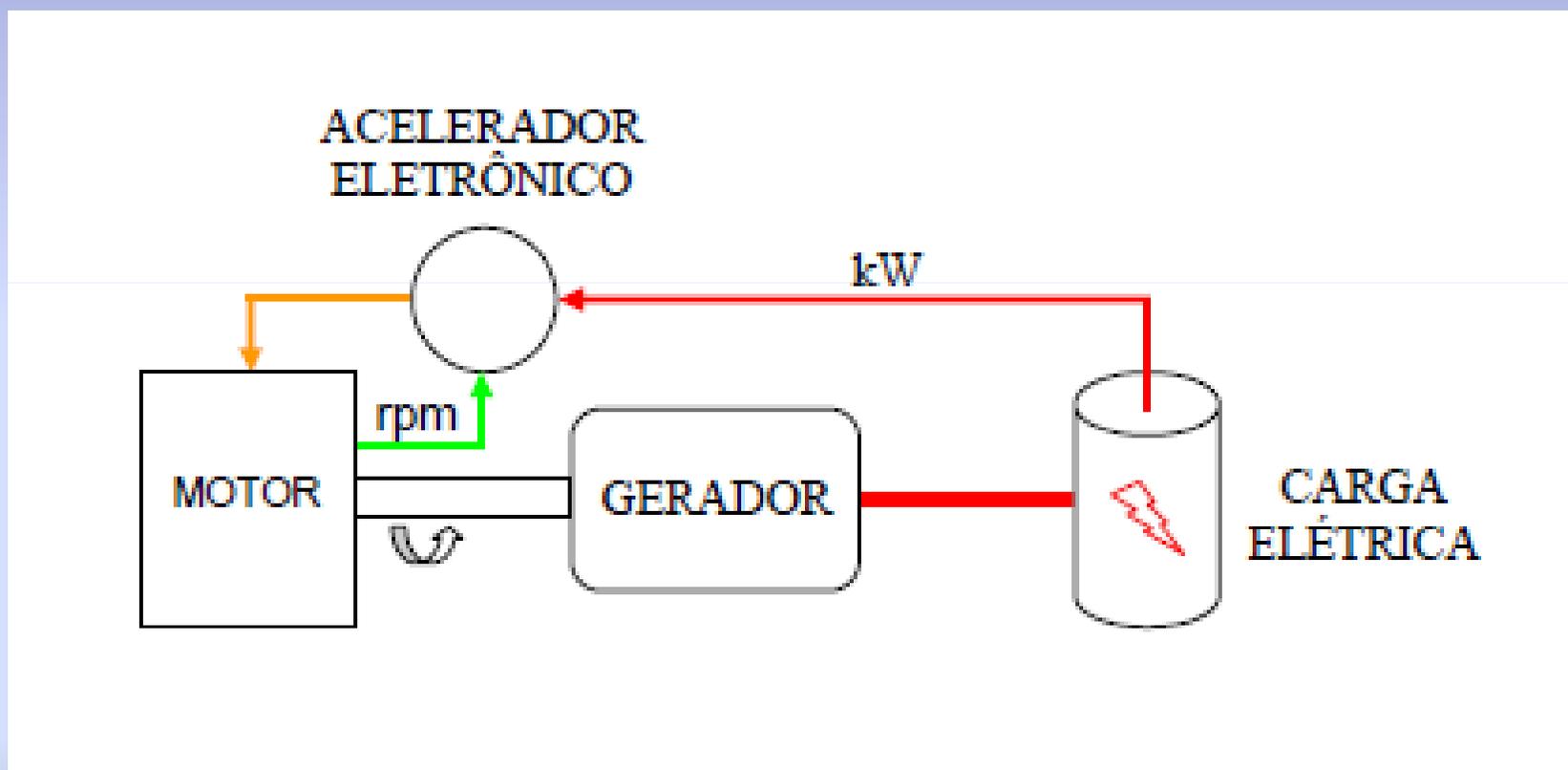
## FORMAÇÃO E EMISSÕES DE POLUENTES

- ❑ Hidrocarbonetos Não Queimados (causas)
  1. O combustível misturado entre o início da sua injeção e o início da combustão é mais pobre que o limite de mistura pobre adequado para o motor.
  2. Mistura do combustível com o ar insuficiente, devido à baixa velocidade do combustível ao sair dos furos do bico injetor.
  
- ❑ Óxidos de Nitrogênio
  1. A taxa de formação dos óxidos de nitrogênio depende da temperatura atingida pelos gases durante a combustão, normalmente acima de  $1600^{\circ}\text{C}$ , e do tempo de permanência dos gases à alta temperatura.
  2. Nos motores de combustão interna com ignição por compressão o dióxido de nitrogênio pode atingir valores entre 10 e 30% do total de óxidos de nitrogênio presentes nos gases da exaustão.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR





# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

Tabela 4.1: Dados do motor de combustão interna.

PARÂMETRO	TIPO OU VALOR
Tipo de construção	Diesel – 4 tempos em linha
Tipo de injeção	Direta
Diâmetro x curso	102 x 120 mm
Cilindrada unitária	0,980 litros
Número de cilindros	4
Cilindrada total	3,922 litros
Aspiração	Natural

Tabela 4.2: Dados do gerador.

PARÂMETRO	VALOR
Nº de Pólos	4
Tensão	220 volts
Nº de Fases	3
Potência Contínua (kVA)	55
Frequência (Hz)	60

$$n = \frac{120 f}{n_p}$$



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### Conversão Eletromecânica de Energia

O princípio da conservação de energia, juntamente com as leis de campos elétricos e magnéticos, de circuitos elétricos e a segunda lei de Newton, é um meio adequado para determinar as relações que caracterizam a conversão eletromecânica de energia (Fitzgerald, 1975).

$$\left[ \frac{E}{n} \frac{dE}{dt} \right] = \left[ \frac{S}{a} \frac{dE}{dt} \right] + \left[ \frac{E}{n} \frac{A}{r} \right] + \left[ \frac{E}{n} \frac{C}{V} \right]$$

*Energy conversion* = *Mechanical energy* + *Electromagnetic energy* + *Electrical energy*

Novembro 2011 PRH-37 UFRJ Professor Osmano Valente



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### Conversão Eletromecânica de Energia

Os geradores elétricos são máquinas rotativas constituídas de uma parte fixa – estator – e uma parte móvel – rotor. Um grupo de bobinas, denominado armadura, interligadas de modo que as tensões nelas induzidas contribuam positivamente para o resultado final, são enroladas em um núcleo de ferro visando minimizar as perdas de energia devido ao fluxo magnético. O circuito magnético é completado pelo ferro de outra parte da máquina onde se localizam as bobinas de excitação, também chamadas bobinas de campo

$$V(t) = V_{\max} \sin \omega t$$

$$f = \left( \frac{n_p}{2} \right) \left( \frac{n}{60} \right)$$



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### Índice de Cetano

Um método de determinação do IC é regulamentado pela norma ASTM D4737 (ASTM International, 2004) e utiliza três pontos da curva de destilação. A equação para cálculo utilizando três pontos é mostrada a seguir (Owen and Coley, 1995). Esta equação mostra-se inadequada para determinação do IC de combustíveis tratados com aditivos para aumentar o número de cetano.

$$IC = 45,2 + 0,0892(T_{10} - 215) + 0,131(T_{50} - 260) + 0,0523(T_{90} - 310) + 0,901(T_{50} - 260) - 0,420(T_{90} - 310) + 0,0049(T_{10} - 215)^2 + 0,0049(T_{90} - 215)^2 + 0,70B + 60B^2$$

$$B = e^{-3,5(\rho - 0,85)}$$



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR





# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR





# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR





# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

SIGLA	COMPOSIÇÃO
B0	Óleo diesel mineral puro
B5M	Mistura de 5% de biodiesel de mamona e 95% de óleo diesel mineral
B5S	Mistura de 5% de biodiesel de soja e 95% de óleo diesel mineral
B20M	Mistura de 20% de biodiesel de mamona e 80% de óleo diesel mineral
B20S	Mistura de 20% de biodiesel de soja e 80% de óleo diesel mineral
B35M	Mistura de 35% de biodiesel de mamona e 65% de óleo diesel mineral
B35S	Mistura de 35% de biodiesel de soja e 65% de óleo diesel mineral
B50S	Mistura de 50% de biodiesel de soja e 50% de óleo diesel mineral
B85S	Mistura de 85% de biodiesel de soja e 15% de óleo diesel mineral



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

CARGA ELÉTRICA (kW)	TEMPO DE TESTE (min)
0	30
10	20
20	15
30	10
37,5	5



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

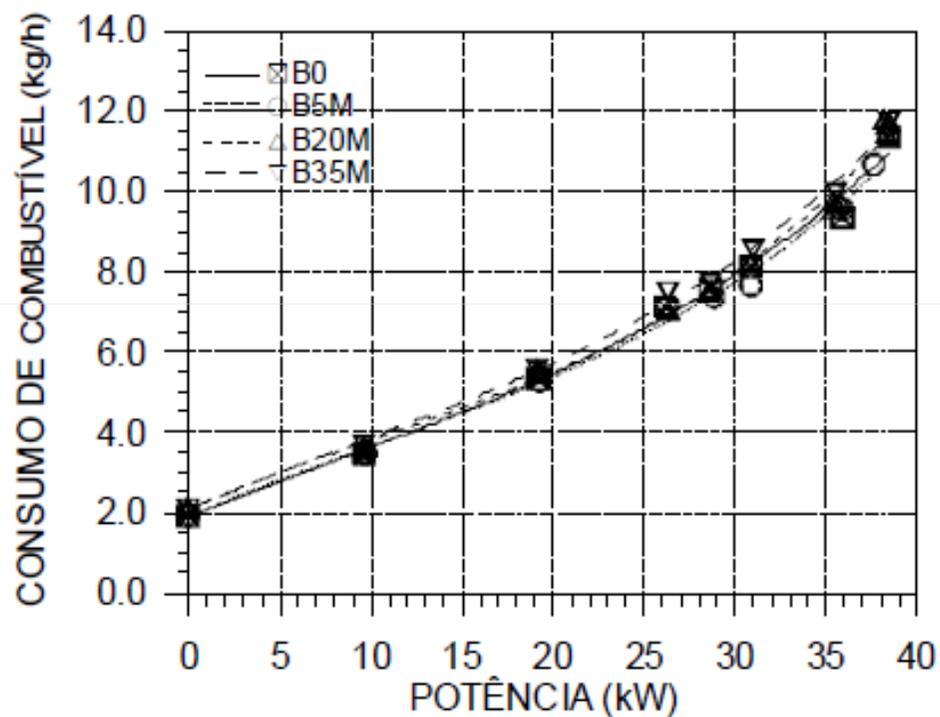


Figura 5.7: Variação da massa de combustível consumida com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de mamona.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

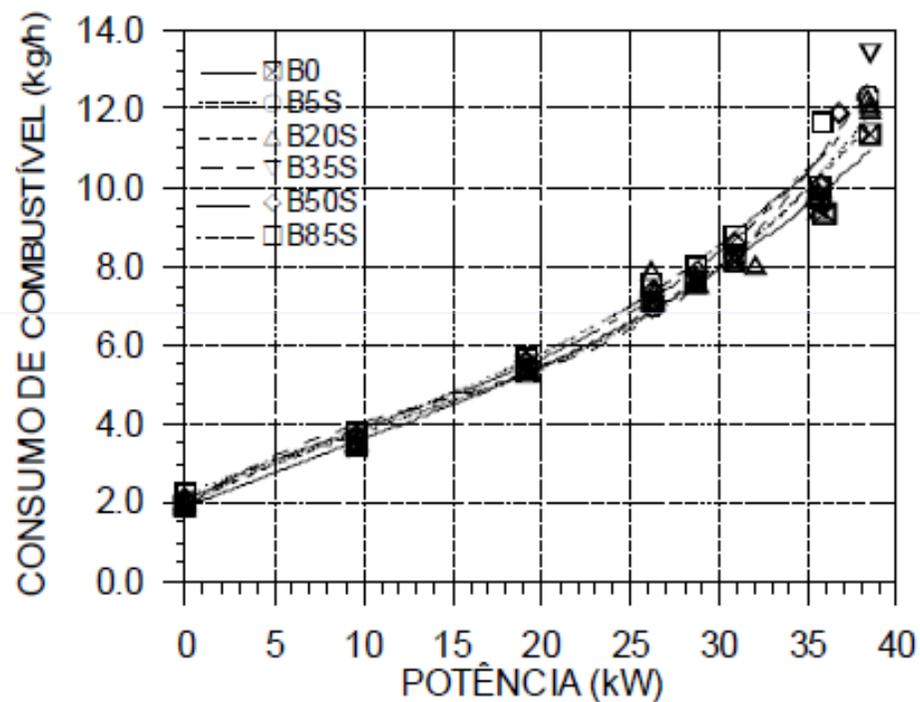


Figura 5.8: Variação da massa de combustível consumida com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de soja.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

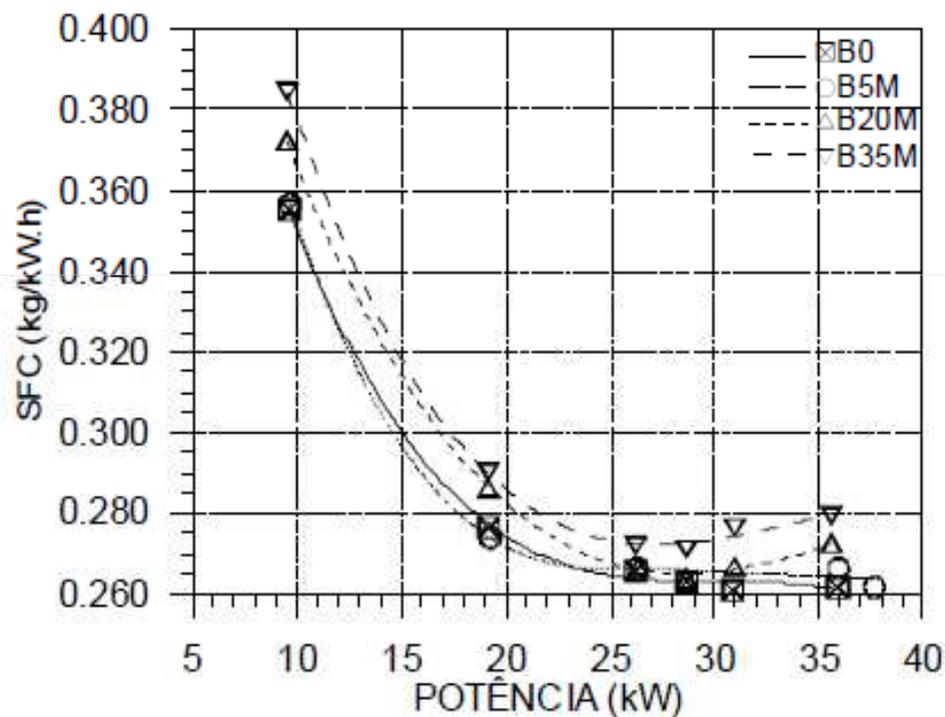


Figura 5.11: Variação do consumo específico de combustível com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de mamona.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

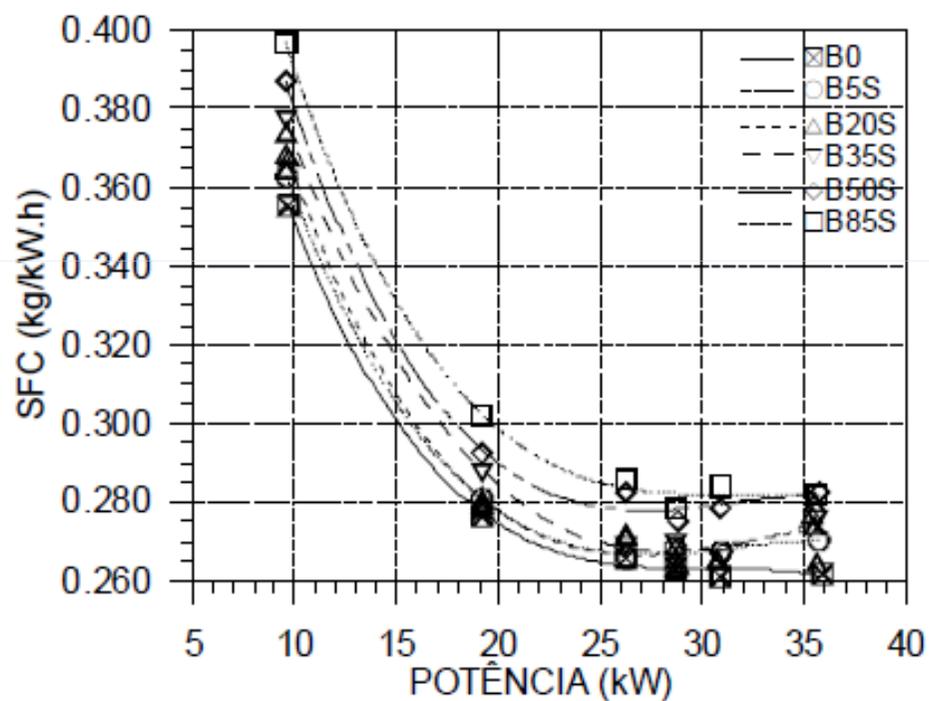


Figura 5.12: Variação do consumo específico de combustível com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de soja.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

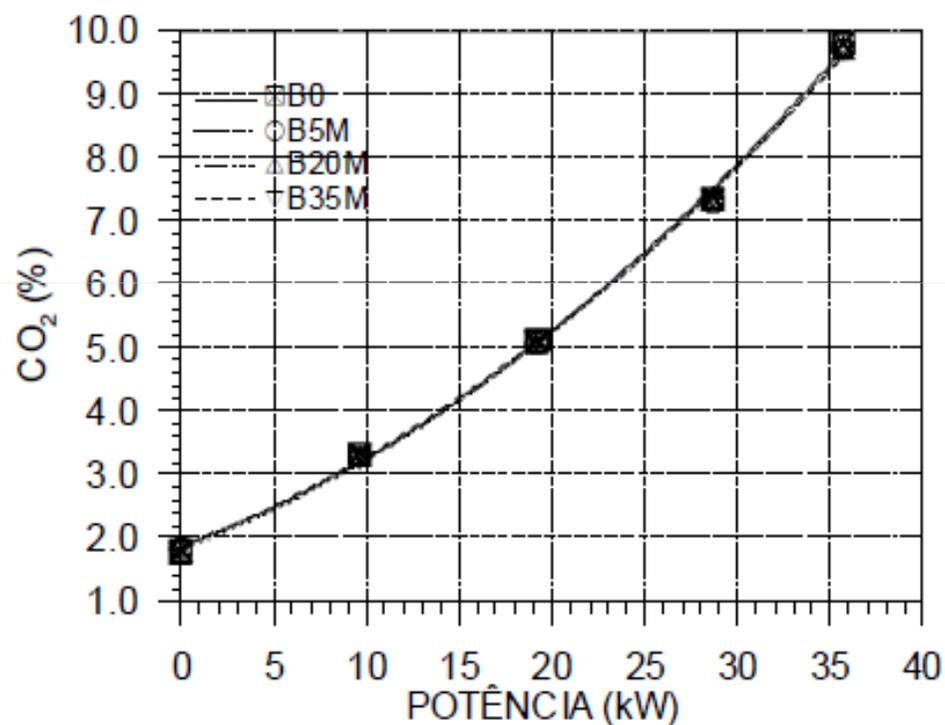


Figura 5.13: Variação da concentração de dióxido de carbono na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de mamona.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

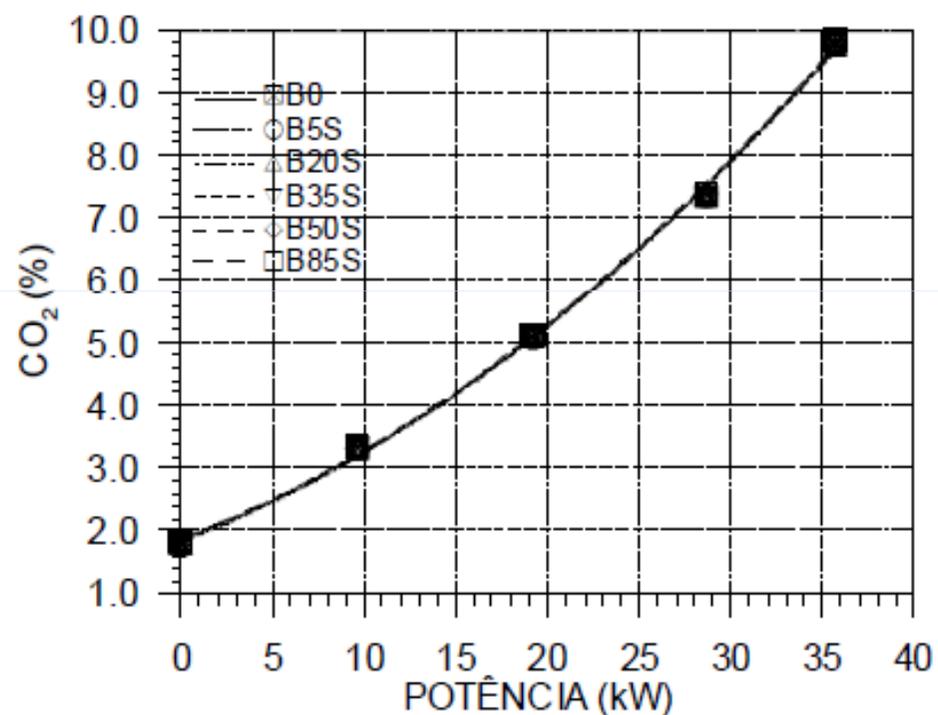


Figura 5.14: Variação da concentração de dióxido de carbono na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de soja.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

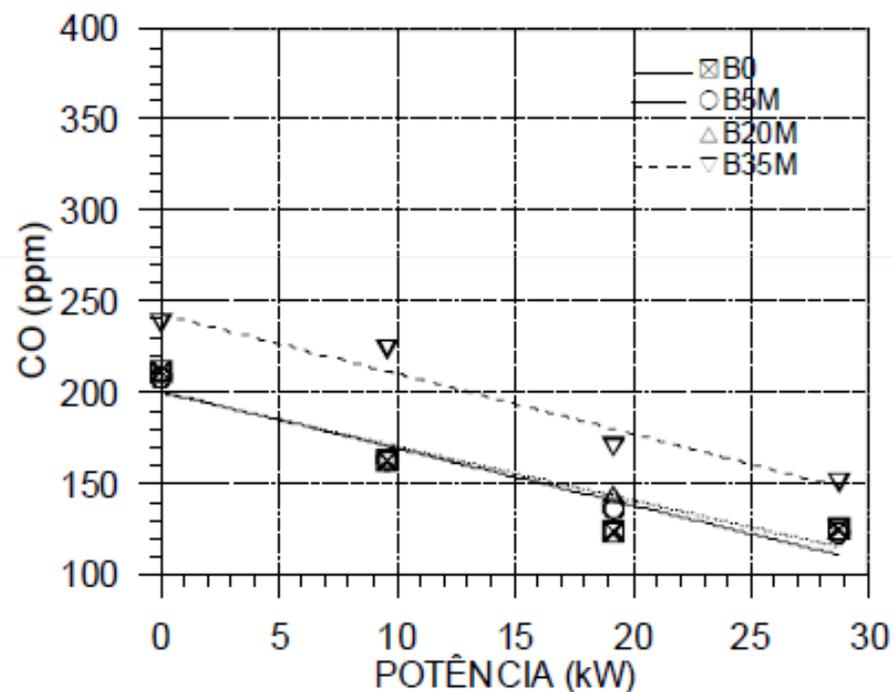


Figura 5.15: Variação da concentração de monóxido de carbono na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de mamona.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

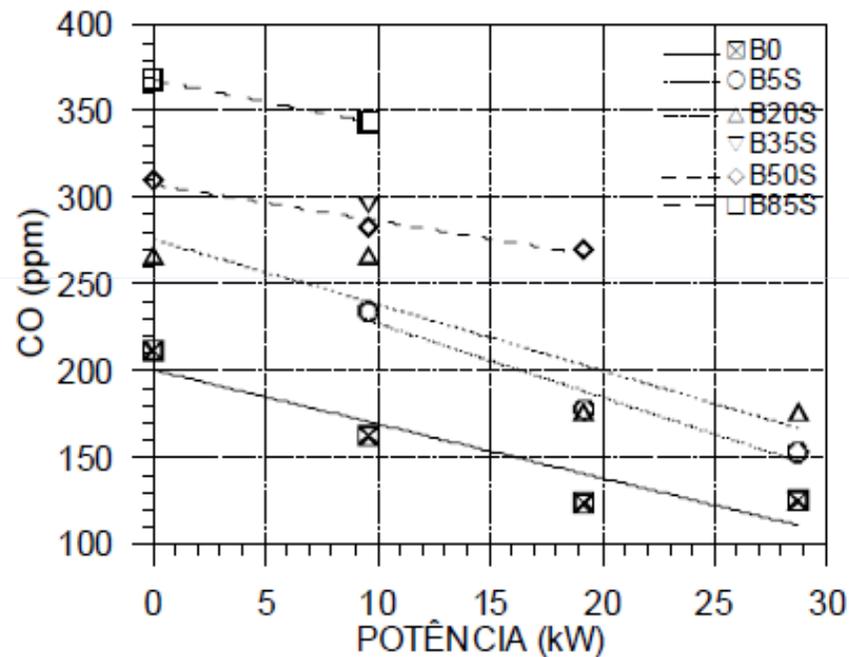


Figura 5.16: Variação da concentração de monóxido de carbono na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de soja.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

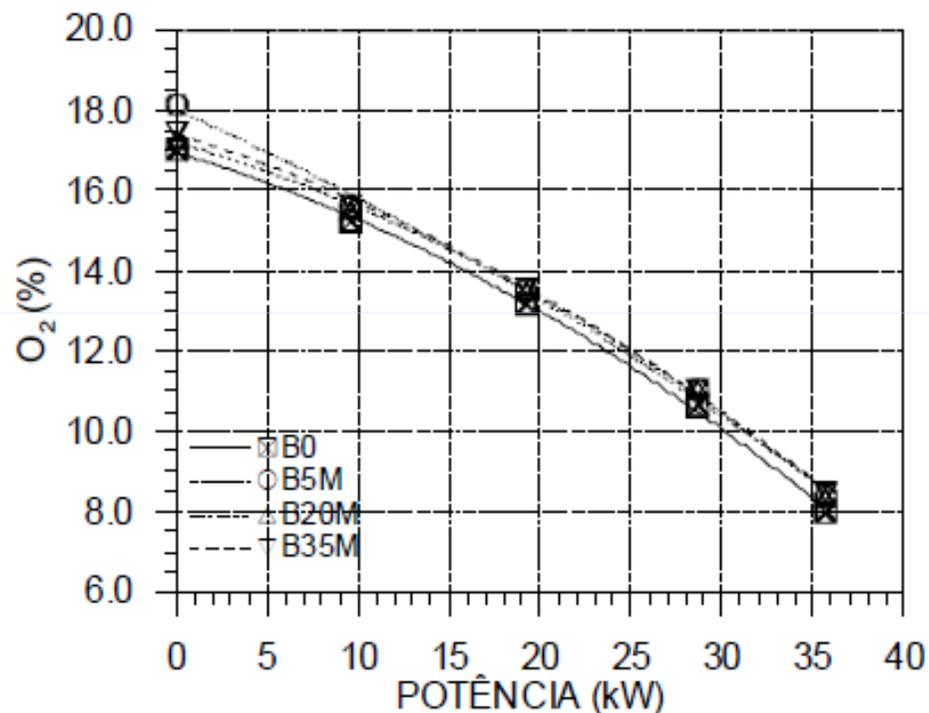


Figura 5.17: Variação da concentração de oxigênio na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de mamona.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

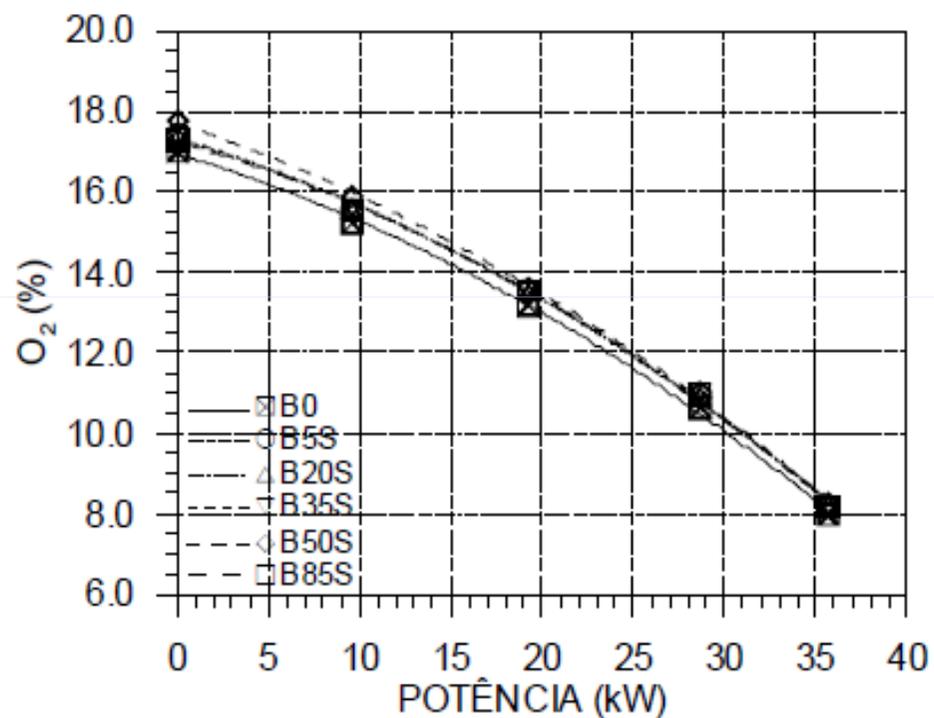


Figura 5.18: Variação da concentração de oxigênio na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de soja.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

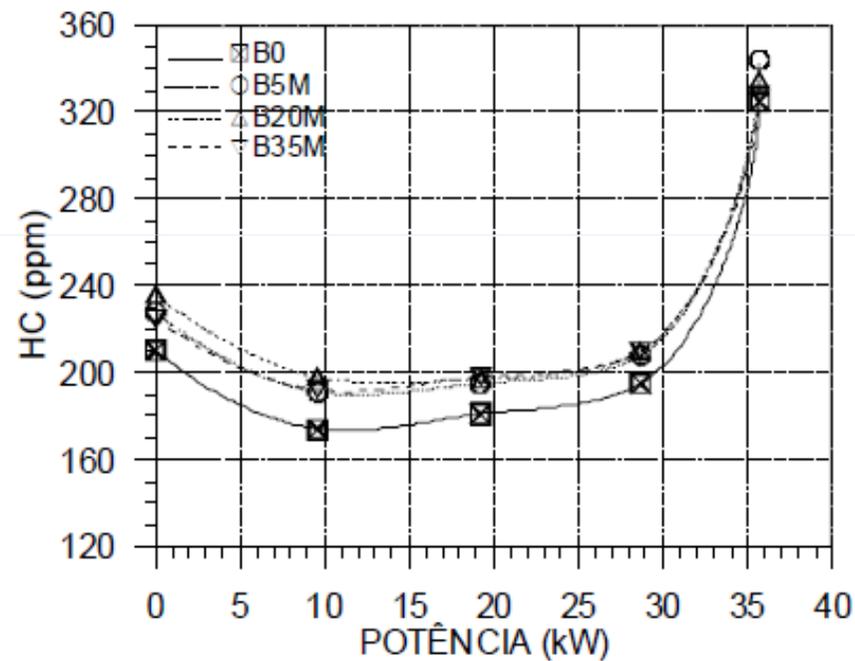


Figura 5.19: Variação da concentração de hidrocarbonetos totais na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de mamona.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

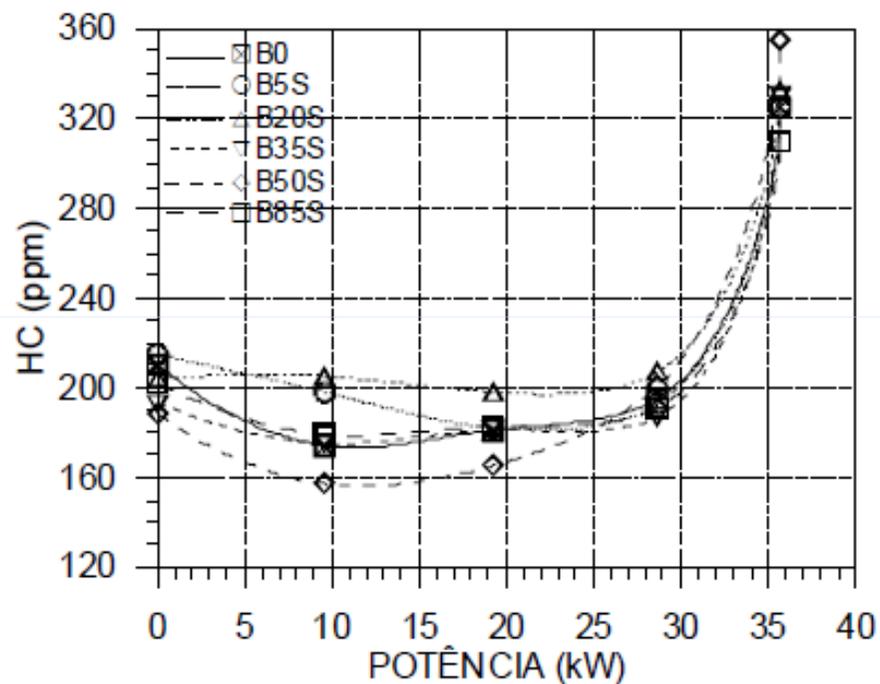


Figura 5.20: Variação da concentração de hidrocarbonetos totais na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de soja.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

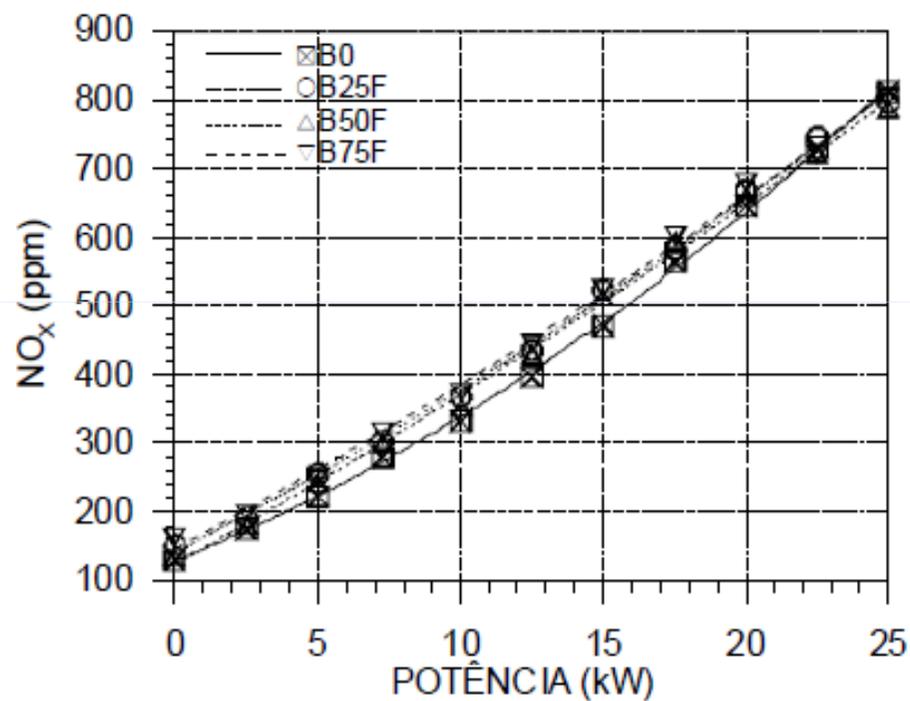


Figura 5.21: Variação da concentração de óxidos de nitrogênio na exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de óleo de fritura.



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

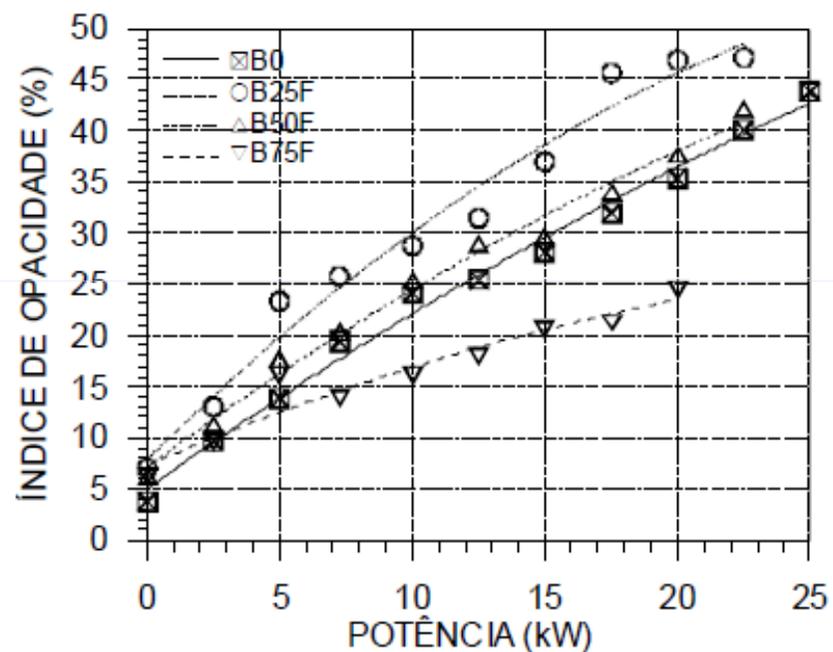


Figura 5.22: Variação da opacidade do gás de exaustão com a carga aplicada ao motor operando com biodiesel de óleo de fritura.

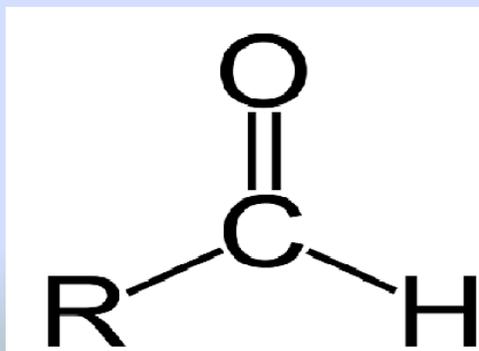


## CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

### GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS

- Aldeídos são compostos orgânicos cuja fórmula é  $C_nH_{2n}O$ .
- Seu nome vem de "álcool desidrogenado", que é um método possível de preparação. Na natureza são produzidos na fermentação de açúcares.
- O composto mais simples da série é o metanal ou formaldeído (HCHO)
- Formaldeído é usado como **conservante** e **bactericida**.





## **CO-GERAÇÃO DE ENERGIA**

### **GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR**

### **OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS**

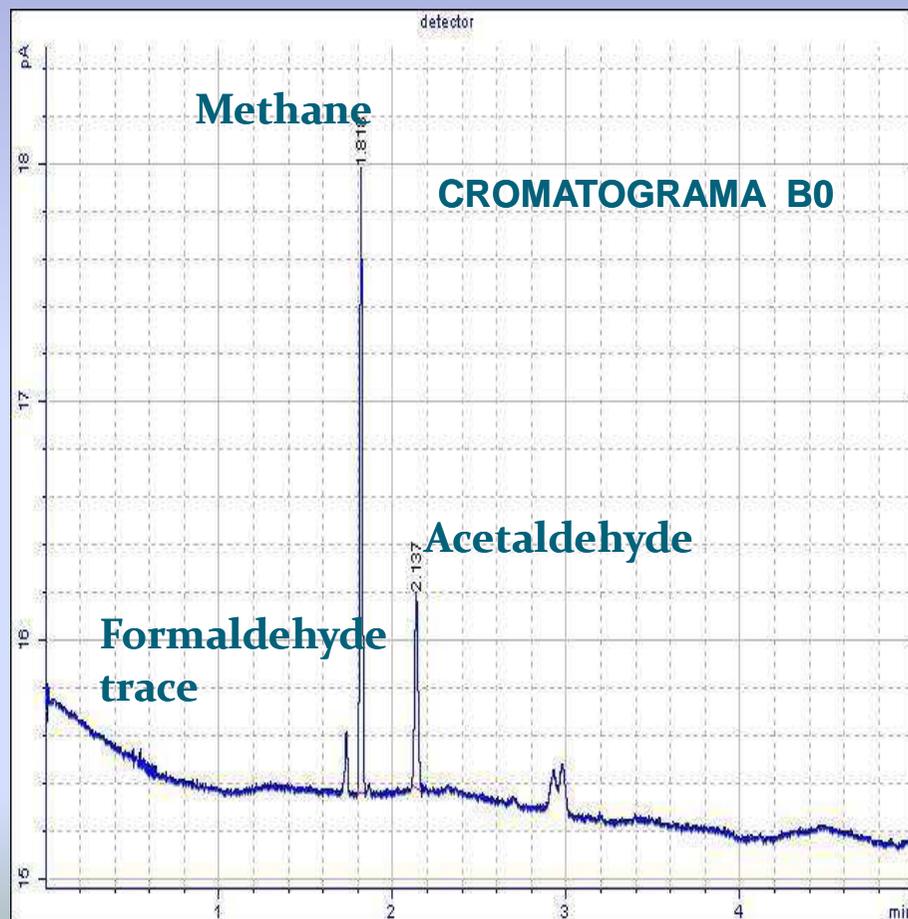
- No Brasil, a legislação só limita as emissões de formaldeído ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) e acetaldeído ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ) de veículos equipados com motores de ignição centelha.
- O método padrão para medir a aldeídos escape é Cromatografia Líquida de Alto Desempenho (HPLC).
- O método Cromatografia Gasosa (GC) foi usado como uma alternativa para investigar presença de aldeídos e seus níveis nos gases de exaustão de um motor diesel estacionário alimentado com petrodiesel e diversas concentrações biodiesel de óleo de mamona



# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS

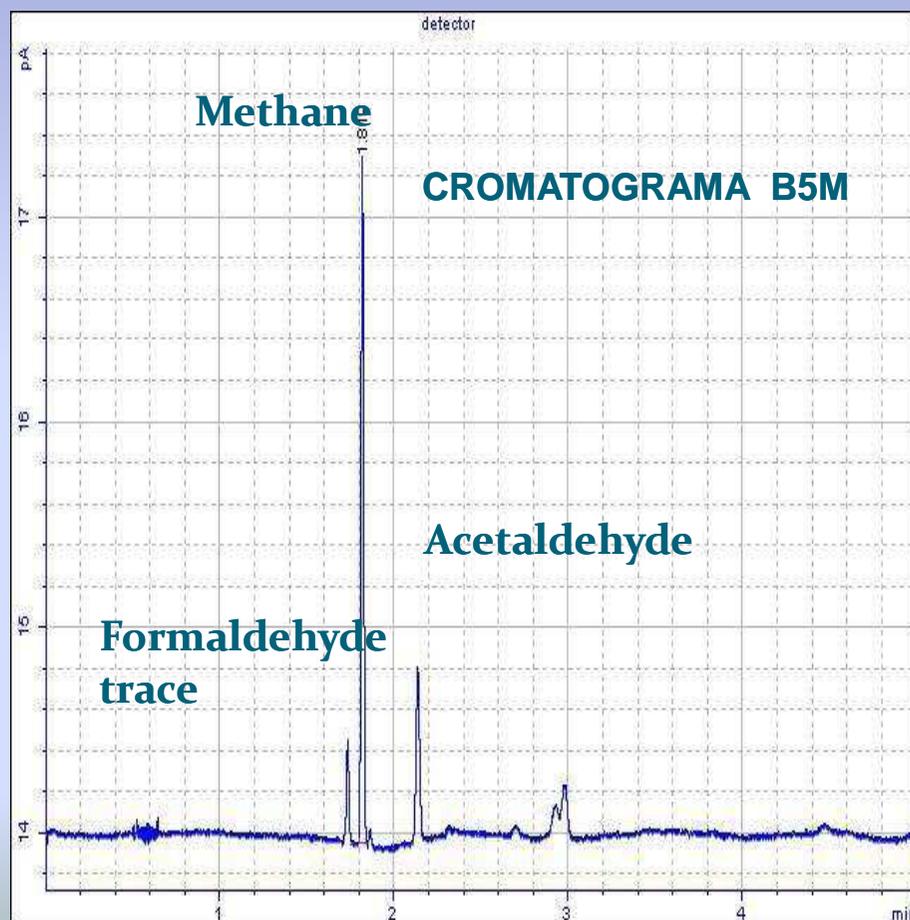




# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS

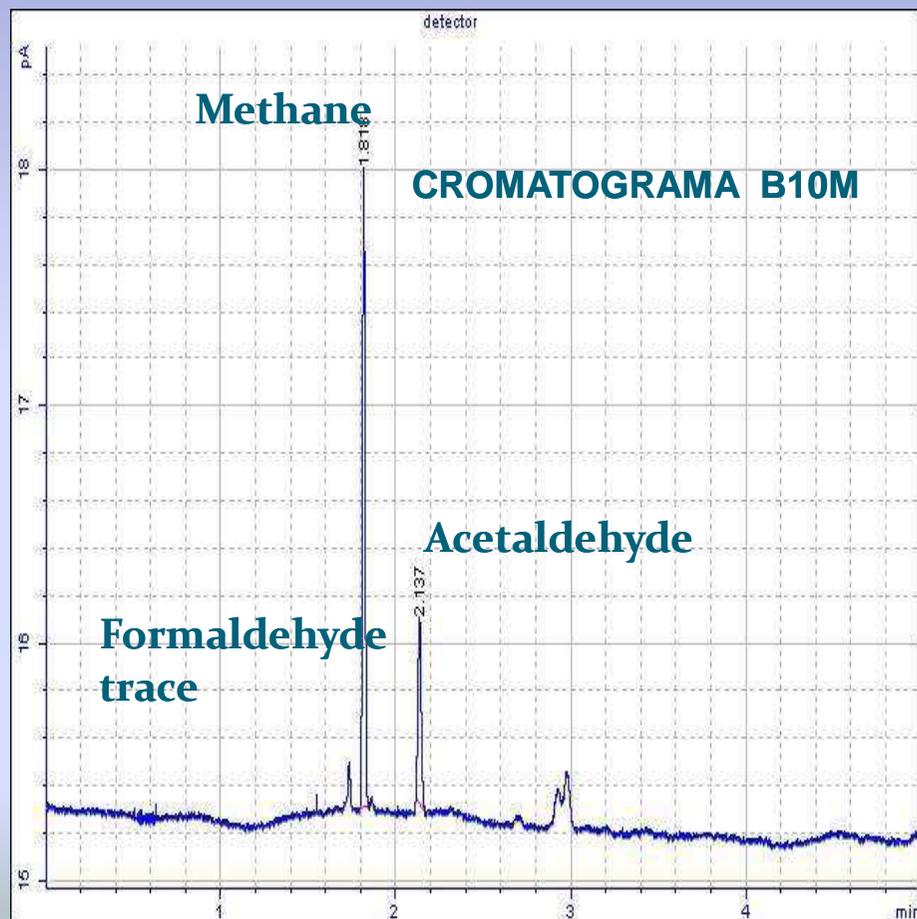




# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS

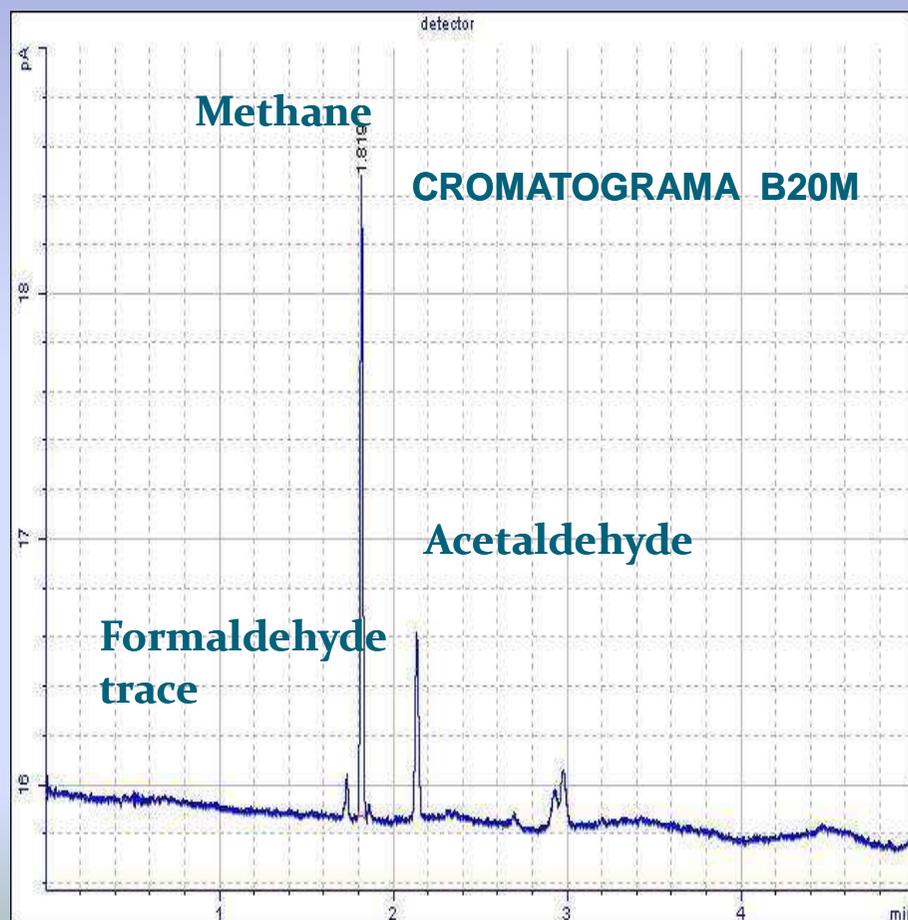




# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS

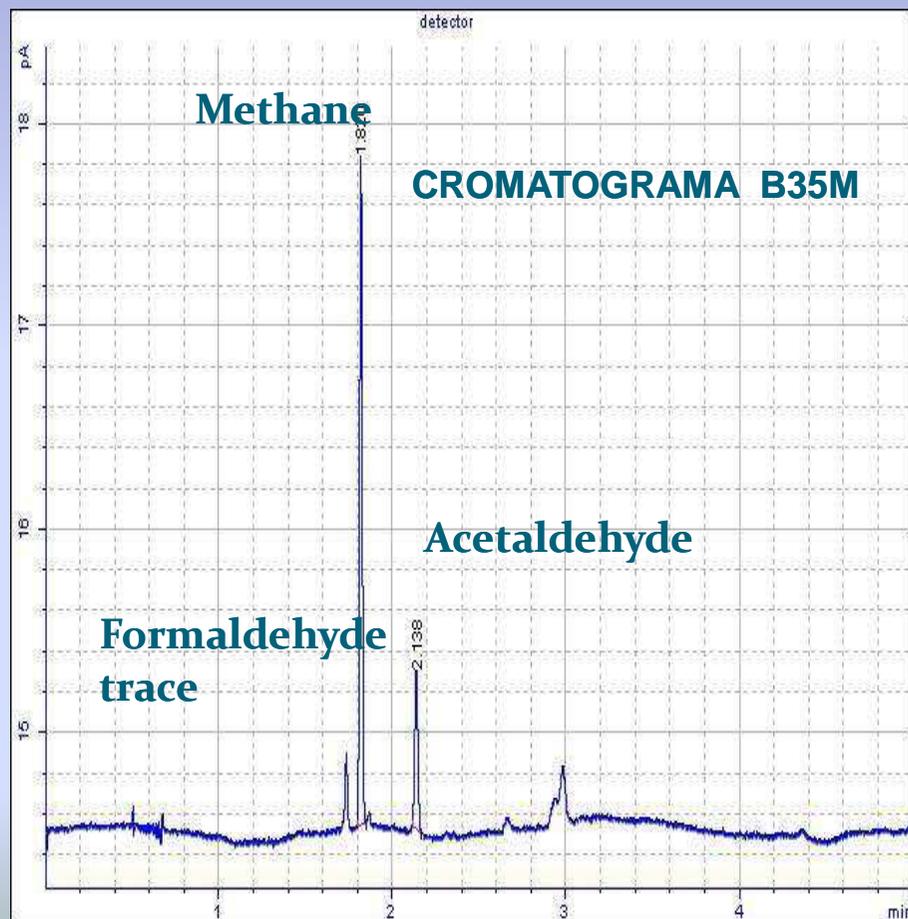




# CO-GERAÇÃO DE ENERGIA

## GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR

### OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS





**CO-GERAÇÃO DE ENERGIA**  
GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR  
OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS

<b>FUEL</b>	<b>CONCENTRATION (ppm)</b>
<b>B0</b>	<b>84.87</b>
<b>B10M</b>	<b>84.46</b>
<b>B35M</b>	<b>81.45</b>



## **CO-GERAÇÃO DE ENERGIA**

### **GRUPO MOTOR DIESEL E GERADOR**

### **OUTROS POLUENTES NÃO REGULAMENTADOS**

- Aldeídos foram detectados somente com do motor com carga máxima 37,5kW.
- Cromatografia gasosa é uma ferramenta útil para a medição de aldeídos na exaustão de motores, mas requer amostra maiores para realizar medição adequada.
- Apenas traços de formaldeído foram detectados para todos os combustíveis testados.
- Acetaldeído é o aldeído com maior concentração presente na exaustão do motor diesel.
- Não há uma diferença significativa entre a concentração de acetaldeído produzido por óleo diesel e misturas diesel-biodiesel de mamona.
- Há ligeira redução na concentração de acetaldeído com a concentração de biodiesel na mistura.
- A concentração de aldeídos na exaustão do motor diesel foi muito baixa para todos os combustíveis.