

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Combustão Diesel-Gás

Dentro da câmara de combustão de um motor operado no modo diesel-gás, ocorre um modelo de queima diferente do Diesel ou Otto convencional. Na admissão se tem uma mistura pobre de ar-gás natural, sendo esta homogênea somente na etapa de compressão. No final da compressão ocorre a injeção de um menor volume de óleo Diesel, comparado ao modo Diesel normal.

Como o diesel atua arrefecendo o bico injetor, isto pode refletir na diminuição do tempo de vida útil dos injetores. Uma das características atribuídas à combustão Diesel-gás está relacionada à queima das gotas de óleo, que se iniciam nas vizinhanças e não em frentes de chama.

Em baixas cargas temos a problemática da queima incompleta do gás natural, pelo fato de haver baixa pressão e temperatura dentro do cilindro e o gás necessita de um maior ponto ignição para entrar em combustão.

Em altas cargas se tem o problema da detonação ou fenômeno de ignição espontânea pois, diferente do que ocorre em baixas cargas, o sistema está submetido à altas pressões e temperaturas na câmara. Isto implica em uma combustão extremamente rápida no início da detonação, no momento em que é injetado a última parte da carga de gás no cilindro. Como consequência, e levando em conta que as velocidades de propagação de chama em condições de detonação são muito elevadas, ocorre uma violenta onda de choque, que se propaga comprimindo a mistura gasosa elevando a sua temperatura à temperatura de chama.

### 2.2. Definições de Potências em Geradores

Fabricantes de geradores elétricos usualmente adotam normas internacionais para a classificação da potência de seus produtos. Assim, Scania, Mercedes, MWM, Volvo e outras de origem européia, adotam as normas DIN 6270 e 6271 para as definições de potências dos motores que fabricam, enquanto as de origem americana, tais como Caterpillar, Cummins, General Motors e outras, adotam as normas ISO8528, 3046, AS2789 e SAE BS5514. As normas brasileiras que tratam dos motores são: MB-

749 (NBR 06396) (motores alternativos de combustão interna não veiculares) e NB-130 (NBR 05477) (desempenho de motores de combustão interna, alternativos, de ignição por compressão). De acordo com a nomenclatura brasileira (NBR 06396) temos as seguintes definições:

### **2.2.1. Potência Efetiva Contínua não Limitada**

Correspondente a norma DIN 6270-A onde, a maior potência efetiva é garantida pelo fabricante, é fornecida sob regime de velocidade, e pode ser aplicada durante 24 horas diárias sem sofrer desgaste anormal ou perda de desempenho. Com o ajuste desta potência no motor é possível a ocorrência de uma sobrecarga. Esta é a regulagem recomendada para motores de grupos geradores. sobrecarga

Caso ocorra uma sobrecarga (em geral 10% da potência efetiva contínua), a quantidade de injeção do combustível é bloqueada na bomba injetora do motor Diesel, e a regulagem de velocidade continua disponível, tal como requerido, por exemplo, em caso de aplicação súbita em plena carga elétrica.

### **2.2.2 Potência Efetiva Contínua Limitada**

Correspondente a norma DIN 6270-B onde, a maior potência efetiva é garantida pelo fabricante, é fornecida sob regime de velocidade angular, especificado conforme sua aplicação, continuamente, durante um tempo limitado, ou intermitentemente, sob indicação do fabricante, sem sofrer desgaste anormal ou perda de desempenho. O ajuste da potência no motor não permite uma sobrecarga. Como esta potência, em plena carga, não possui reserva suficiente para o processo de regulagem de velocidade, a princípio não deveria ser utilizada em grupos geradores. Caso contrário, grandes quedas de velocidade que, em uma condição extrema, a velocidade normal não mais possa ser alcançada, devem ser previstos para uma situação de aplicação súbita da carga no limite de potência, por exemplo, devido a altas correntes de partida de motores elétricos.

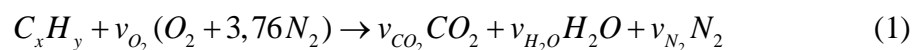
As potências acima definidas serão consideradas potências úteis se todos os dispositivos auxiliares necessários à operação do motor (por exemplo: bomba injetora, ventilador e bomba d'água) estiverem sendo acionados pelo próprio motor.

A norma brasileira NBR 06396 não somente estabelece os conceitos de potência e consumo de motores de combustão interna, mas indica também como a potência e o consumo de combustíveis devem ser convertidos para condições atmosféricas particulares. As normas DIN e ABNT tomam como padrão as mesmas condições atmosféricas, isto é, uma pressão barométrica de 76 mm Hg (equivalente a uma altitude de cerca de 270 m acima do nível do mar), temperatura ambiente de 20°C e umidade relativa do ar de 60%.

Há, entretanto, uma diferença fundamental, entre as normas DIN e ABNT, que é necessário ressaltar: a definição dos acessórios que devem ser acionados pelo motor (e cujo consumo de potência não deve ser calculado como potência efetiva do motor) difere de uma norma para a outra. A norma ABNT é mais rigorosa e prevê que, por exemplo, as potências de acionamento da bomba centrífuga e do ventilador deverão ser descontadas ao definir a potência de um motor industrial, normalmente equipado com estes acessórios. As normas americanas estabelecem as condições atmosféricas padrão de acordo com a ISO3046 em 29,61 in Hg de pressão barométrica, equivalente a uma altitude de 300 ft acima do nível do mar e adotam o mesmo conceito de sobrecarga de 10%, como nas normas DIN. Para os motores Diesel estacionários destinados para aplicação em grupos geradores, estabelecem regimes de operação considerando fatores de carga e definem três regimes de trabalho: *Stand-by*, *Prime Power* e *Continuous*. O regime *Stand-by* é o que definimos como emergência e é estabelecido sobre a potência efetiva contínua limitada; o regime *Prime Power* é o que chamamos de contínuo e é estabelecido sobre a potência efetiva contínua não limitada e o *Continuous* é um regime definido como sendo uma potência em que o motor pode operar 24 horas por dia com carga constante.

### 2.3. Combustão Perfeita

Uma reação estequiométrica é definida quando os únicos produtos da combustão são o dióxido de carbono e água. A equação geral para uma combustão completa e estequiométrica é dada por (Wyllen 1995):



Onde o balanço fornecido é:

$$\begin{aligned}
 C : v_{CO_2} &= x \\
 H : 2v_{H_2O} &= y \\
 N_2 : v_{N_2} &= 3,76v_{O_2} \\
 O_2 : v_{O_2} &= v_{CO_2} + (v_{H_2O} / 2) = x + (y / 4)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

## 2.4. Propriedades do Óleo Diesel

A classificação do Diesel pode ser dividida em grupos e se representar com um hidrocarboneto específico (Taylor, 1976):

Diesel leve  $C_{12}H_{26}$

Diesel médio  $C_{13}H_{28}$

Diesel Pesado  $C_{14}H_{30}$

O óleo diesel é obtido a partir de um processo de destilação fracionada do óleo cru, sendo assim uma mistura complexa e com elevado número de hidrocarbonetos pesados. A mistura, usualmente, é aproximada ao dodecano ( $C_{12}H_{26}$ ), por ter propriedades semelhantes, e classificada assim como óleo leve. A queima deste resulta em (Taylor, 1976):



Depois, a relação ar/Diesel estequiométrica em base molar é:

$$(A / C_D)_{molar} = \frac{(18,5 + 69,56)}{1} = 88,06 \text{ kmol de ar/Kmol de gás}
 \tag{4}$$

No final a relação estequiométrica, em base mássica, é:

$$(A/C_D)_e = (A/C_D)_{molar} \left( \frac{M_{ar}}{M_D} \right) = 88,06 \frac{28,97}{(12 \times 12) + (26 \times 1,008)} \quad (5)$$

$$(A/C_D)_e = 14,99 \frac{Kg_{ar}}{Kg_D} \quad (6)$$

A qualidade do diesel pode ser medida pelo seu número de cetano (NC) ou calculado pelo índice de cetano (IC). O número de cetano é obtido através de um ensaio padronizado do combustível em um motor monocilíndrico, onde se compara o seu atraso de ignição em relação a um combustível padrão com um número de cetano conhecido.

O combustível padrão é uma mistura equivalente de n-hexadecano ou cetano (NC=100) e alfa-metilnaftaleno (NC=0). Por isso um combustível com NC=45, tem a mesma qualidade de ignição que uma mistura dos padrões acima contendo 45% de cetano. O heptalmetilnonano com NC=15 foi adotado como o limite inferior da escala, em substituição ao alfa-metilnaftaleno do procedimento original, por ser um produto mais estável. O índice de cetano é calculado através das correlações baseadas em propriedades físicas do combustível rotineiramente determinada.

Esse índice está em função do ponto de destilação médio e da massa específica, apresentando boa correlação com o número de cetano. O número de cetano adequado para motores Diesel, em geral situa-se na faixa de 40 a 60.

Valores inferiores a 40 podem causar fumaça na descarga com aumento de consumo, perda de potência e aumento de ruído (batida). Por outro lado, se o diesel proporciona que o motor arranque com facilidade e opere satisfatoriamente, tanto em marcha lenta quanto na total, não se obtiveram ganhos significativos com o aumento do número de cetano, podendo até piorar o desempenho para valores muito altos (Obert, 1971)

## 2.5. Propriedades do Gás Natural

O Gás natural é um fluido homogêneo que, no estado bruto é encontrado na natureza, composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>), além de apresentar proporções de Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), Propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) e hidrocarbonetos mais pesados e outras impurezas. As

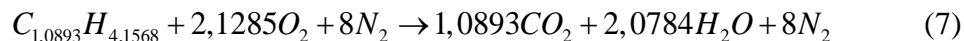
propriedades físico-químicas do gás natural dependem de sua composição, que varia segundo o tipo de reserva extraída.

Tabela 2 - Composição do gás natural fornecida pela Companhia Distribuidora de Gás do Estado do Rio de Janeiro. : (CEG, 2004)

Componente	% Volume	% de Massa
CH <sub>4</sub>	90,17	81,93
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7,46	12,71
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,27	3,19
CO <sub>2</sub>	0,41	1,03
N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> + IC <sub>4</sub> + NC <sub>4</sub> + IC <sub>5</sub> + NC <sub>5</sub> + C <sub>6</sub> + C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,7	1,16

Com essa composição se chega à seguinte representação geral do hidrocarboneto do gás natural ( $C_{1,0893}H_{4,1568}$ ).

O processo de combustão pode ser determinado pela seguinte equação



A relação ar/Diesel estequiométrica em base molar é:

$$(A/C_g)_{molar} = \frac{(2,1285 + 8)}{1} = 10,1285 \text{ Kmol de ar/Kmol de gás} \quad (8)$$

No final a relação estequiométrica em base mássica é feita da seguinte maneira:

$$(A/C_g)_e = (A/C_g)_{molar} \left( \frac{M_{ar}}{M_{gas}} \right) = 10,1285 \frac{28,97}{(1,0893 \times 12) + (4,1568 \times 1,008)} \quad (9)$$

$$(A/C_g)_e = 16,99 \frac{Kg_{ar}}{Kg_{gás}} \quad (10)$$

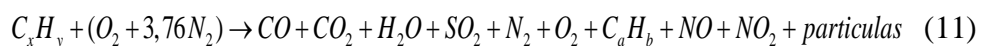
Tabela 3 - Comparação entre algumas características físico-químicas do Óleo Diesel e o Gás Natural (Taylor, 1976; Jóvaj, 1973; Obert, 1973; Obert, 1971; CEG, 2004)

Propriedades	Gás Natural	Diesel
Fórmula química do hidrocarboneto principal	CH <sub>4</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
Massa molecular (g/mol)	17,65	170
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> ), 20°C e 1 atm	0,7357	830
Razão ar/combustível estequiométrica (Kg/Kg)	17,03/1	14,99/1
Temperatura de auto ignição (°C)	632	254
Poder Calorífico Superior (KJ/Kg)	53.970	45.590
Poder Calorífico Inferior (KJ/Kg)	48.750	42.600
Limite de inflamabilidade no ar (%)	5-14	0,7-0,5
Número de octanas	130	20
Número de cetanas	-	44-50
Expansão molecular	1,003	1,0618
Calor de combustão de 0,025m <sup>3</sup> de mistura estequiométrica a 1 atm e 15,6 °C (Kcal/KJ)	771	773,5
Velocidade da chama (cm/s)	39	33-47
Viscosidade a 37,8 °C (cST)	-	2-0,4

## 2.6. Combustão Real

A queima real de qualquer combustível não representa a combustão com sua composição estequiométrica, o fenômeno de combustão tem uma natureza muito complexa onde as velocidades das reações, as condições de transferência de calor e a massa, diferem da zona de chama.

Geralmente a combustão real ocorre com excesso ou insuficiência de ar, para a reação de uma combustão real apresentamos a seguinte equação não balanceada (Andrade, J. e Teixeira, P.;2003).



## 2.7. Formação de Poluentes em Motores Diesel-Gás

### **Formação de NOx**

São formados por óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), sendo o (NO) o maior produzido, a formação destes poluentes são favorecidos por altas concentrações de oxigênio e altas temperaturas. No caso do bicomcombustível é possível diminuir as emissões de NO com um aumento da taxa de substituição, já que a mistura de ar e gás natural admitida na câmara de combustão diminui a temperatura dentro do cilindro antes da combustão. Além disso, a presença do gás natural diminui a concentração de oxigênio, que também ajuda na redução de NO.

### **Formação de CO**

Resultados empíricos demonstram aumentos de emissões de CO em motores Diesel gás, em comparação ao diesel puro. Acredita-se que isto ocorra como consequência da queima incompleta do combustível gasoso. Motores operando em carga elevada podem eventualmente ter reduções nas emissões de CO.

### **Formação de HC**

A formação de HC num motor Diesel gás é alta quando comparada com a de um motor Diesel normal. Em baixas cargas as emissões de HC aumentam conforme aumenta a taxa de substituição Diesel-gás. Acredita-se que isto seja consequência da queima incompleta de gás natural. Em altas cargas ocorre o mesmo.

### **Formação de Material Particulado**

É formado principalmente por fuligem e aglomerados de carbono entre outros. No caso de motores diesel gás o material particulado é reduzido com um aumento na taxa de substituição. Reduzindo a quantidade de derivado líquido queimado também se reduz a fonte principal de particulados (gotículas de diesel com queima incompleta).