

CAMILA DE JESUS ALMEIDA

**GÁS NATURAL NO PANORAMA BRASILEIRO E UM ESTUDO DE CASO NO SETOR
AUTOMOTIVO**

CAMILA DE JESUS ALMEIDA

**GÁS NATURAL NO PANORAMA BRASILEIRO E UM ESTUDO DE CASO NO SETOR
AUTOMOTIVO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Julien da Silva Barros Sampaio

A447g

Almeida, Camila de Jesus

Gás natural no panorama brasileiro e um estudo de caso no setor automotivo / Camila de Jesus Almeida – Guaratinguetá, 2015.

88 f : il.

Bibliografia: f. 82-88

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Julien da Silva Barros Sampaio

1. Gás natural 2. Ônibus 3. Transportes coletivos I. Título

CDU 662.767

O GÁS NATURAL NO PANORAMA BRASILEIRO E UM ESTUDO DE CASO NO
SETOR AUTOMOTIVO

CAMILA DE JESUS ALMEIDA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
UNESP-FEG


M.Sc. ANDRÉAS NASCIMENTO
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

DADOS CURRICULARES

CAMILA DE JESUS ALMEIDA

NASCIMENTO	31.12.1990 – GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	José Raimundo Almeida Regina Célia de Jesus Almeida
2006/2008	Curso Técnico em Eletromecânica na ETEC “Prof. Alfredo de Barros Santos.”
2010/2015	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que é a razão de toda a minha vida pelo dom da vida,

aos meus pais José e Regina, que sempre foram meus maiores motivadores a nunca desistir e estiveram presente durante toda minha trajetória na busca por este sonho,

ao meu amigo e namorado Christoph por toda paciência e dedicação durante este período chamado “TG” e todos outros momentos bons ou ruins,

ao Andreas, que foi um grande crítico de todas as tabelas e palavras escritas nesse trabalho, dedicou seu tempo e atenção para o aperfeiçoamento desta redação,

ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Sampaio, pela confiança a mim depositada durante estes anos que trabalhamos juntos e pela força de vontade em ver seus alunos se desenvolvendo pessoal e profissionalmente,

ao Helmut Günther e ao time EvoBus Mannheim, que me apresentaram o universo dos ônibus e me auxiliaram em um enorme crescimento pessoal,

à Sonia Regina, que sempre foi mais que a secretária do departamento para mim, uma amiga e conselheira durante as lutas acadêmicas,

à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor de Petróleo e Gás PRH-ANP/MCTI n° 48 (PRH48) apoiou financeiramente este trabalho,

e aos meus professores e colegas do curso de Engenharia Elétrica, sem os quais não teria crescido tanto nestes últimos 6 anos, a cada um destes deixo o meu sincero agradecimento.

ALMEIDA, C. J. **Gás natural no panorama brasileiro e um estudo de caso no setor automotivo**. 2015. 88 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Neste trabalho são abordados os principais aspectos do gás natural aplicados ao transporte público e os impactos ambientais, econômicos e técnicos neste setor. São detalhados também aspectos importantes que devem ser considerados ao se comparar o gás natural com outros combustíveis, principalmente o diesel. Dessa forma são explicitados os tipos de motores de combustão existentes (ciclo Otto e Diesel) e o tipo de combustão mais utilizada em cada tipo de veículo. Além disso, apresentam-se as principais normas para o controle das emissões (Euro, US e Proconve) trazendo uma breve explicação dos testes utilizados para sua implementação com a homologação de motores, sendo enfatizado neste trabalho os veículos pesados. É mostrado também o impacto econômico decorrente da utilização de gás natural nas frotas de ônibus urbanos, apresentando um caso real (de Berlim) e uma estimativa baseada neste para a realidade de uma cidade brasileira, apresentando a potencialidade do gás natural para o uso veicular no Brasil, tanto em termos financeiros quanto em decorrência da menor emissão de poluentes.

PALAVRAS-CHAVE: Gás natural. Ônibus urbano. Transporte público.

ALMEIDA, C. J. **Natural gas in the Brazilian scene and a case study in the automotive sector.** 2015. 88 p. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The intended purpose of this paper is to present the main aspects of natural gas applied to the public transportation as well as the environmental, economical and technical impacts in this sector. Also it is given specific information to be considered when comparing natural gas to other fuels, specially the diesel. At this point is presented the types of internal combustion engines (Otto and Diesel cycle) and which type is used in each vehicle. Moreover, it is presented the main standards pollutant emission (Euro, US and Proconve) with a brief explanation of the tests made in order to approve the engines. This paper is focused on heavy duty vehicles. Also in this paper is exposed the economic impact due to the natural gas use in the public transportation fleet. In addition is presented a real case (of Berlin) and an estimative to a Brazilian city, presenting the potential of natural gas as vehicular fuel in Brazil, as well as financial and environmental aspects of the substitution.

KEY-WORDS: Natural gas. Urban bus. Public transportation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Reservatório de gás natural: (a) associado; (b) não-associado.....	19
Figura 2.2 – Fluxograma do processamento primário de fluidos	24
Figura 2.3 – Esquema de funcionamento de uma UPGN.....	24
Figura 2.4 – Oferta de energia mundial por fonte primária para o ano de 2012	26
Figura 2.5 – Geração de energia elétrica por fonte primária nos anos de 1973 e 2012....	27
Figura 2.6 – Reservas provadas de gás natural, segundo regiões geográficas (trilhões de m ³).....	27
Figura 2.7 – Produção de gás natural, segundo regiões geográficas (bilhões de m ³).....	28
Figura 2.8 – Consumo de gás natural, segundo regiões geográficas (bilhões de m ³).....	29
Figura 2.9 – Reservas provadas de gás natural, segundo unidades da federação.....	30
Figura 2.10 – Evolução da produção de gás natural em terra e mar (2004 - 2013).....	31
Figura 2.11 – Evolução do balanço de gás natural no Brasil (2004 - 2013)	32
Figura 2.12 – Movimento de rotação do eixo Cardan proveniente de um MCI.....	34
Figura 2.13 – O ciclo termodinâmico ideal em motores de ciclo Otto.....	35
Figura 2.14 – Funcionamento de um motor a quatro tempos do ciclo Otto	36
Figura 2.15 – O ciclo termodinâmico ideal em motores de ciclo Diesel.....	38
Figura 2.16 – Funcionamento de um motor a quatro tempos do ciclo Diesel.....	39
Figura 2.17 – Variação dos parâmetros de um ônibus a gás em função de λ	41
Figura 3.1 – Total anual mundial de emissão dos GEE no período de 1970 a 2010.....	44
Figura 3.2 – Emissão de CO ₂ do setor de transportes em 2013 comparado à 1990	45
Figura 3.3 – Chassi modelo <i>O500 UDA</i> fabricado pela Mercedes-Benz	50
Figura 3.4 – Ônibus <i>Millenium BRT</i> superarticulado fabricado pela Caio Induscar.....	50
Figura 3.5 – Linha do tempo dos padrões de controle de emissões nos veículos pesados em alguns países	52
Figura 3.6 – Caracterização dos modos para ensaio do ciclo ESC..	57
Figura 3.7 – Caracterização dos patamares para ensaio do ciclo ELR.....	58
Figura 3.8 – Velocidade do veículo para diferentes trechos, ciclo de testes ETC.....	59
Figura 3.9 – Velocidade do motor em função do tempo no ciclo de teste ETC.....	59
Figura 3.10 – Torque do motor em função do tempo no ciclo de teste ETC	60
Figura 3.11 – Teste FTP considerando o torque e a velocidade do motor	62
Figura 3.12 – Zona do teste NTE considerando o torque e a velocidade do motor	64

Figura 3.13 – Equivalência entre as normas de emissões europeias e brasileiras	65
Figura 3.14 – Diminuição da emissão de poluentes com a evolução do Proconve	66
Figura 4.1 – Ônibus movido a GNC da empresa HARU do tipo NEOPLAN N4521.....	72
Figura 4.2 – Ônibus movido a diesel da empresa HARU do tipo NG 313	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química do gás natural bruto encontrado em alguns países....	20
Tabela 2.2 – Especificações do gás natural comercial do Brasil.....	21
Tabela 3.1 – Redução da emissão de poluentes com a substituição da gasolina por gás natural	46
Tabela 3.2 – Vantagem econômica do uso de GNV em veículos leves	47
Tabela 3.3 – Norma europeia de emissões para veículos pesados diesel detalhados em g/kWh.....	54
Tabela 3.4 – Norma europeia de emissões para veículos pesados a diesel e a gás detalhados em g/kWh.....	55
Tabela 3.5 – Valores-limite de emissão para veículos pesados nos EUA em g/bhp-hr ..	61
Tabela 3.6 – EPA padrão das emissões para o ano modelo de 2004 detalhado em g/bhp-hr	61
Tabela 3.7 – Limites de emissão para a norma P-7 expressos em g/kWh	65
Tabela 4.1 – Características da frota de veículos monitoradas e analisadas no caso alemão.....	72
Tabela 4.2 – Custos de consumo de combustível para os ônibus da frota da HARU.	74
Tabela 4.3 – Custos operacionais dos ônibus GNC e Diesel da empresa HARU	75
Tabela 4.4 – Características da frota de veículos analisadas no estudo brasileiro.	76
Tabela 4.5 – Custos de consumo de combustível para os ônibus do caso brasileiro.....	77
Tabela 4.6 – Custos operacionais dos ônibus GNC e Diesel do caso brasileiro	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
BVG	<i>Berliner Verkehrsbetriebe</i>
CAA	<i>Clean Air Act</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CFC	Clorofluorcarbonos
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CRT	<i>Continuously Regenerating Trap</i>
DMC	Modo Cíclico Discreto
ELR	<i>European Load Response</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ESC	<i>European Stationary Cycle</i>
ETC	<i>European Transient Cycle</i>
EUA	Estados Unidos da América
FABUS	Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus
FAFEN	Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
GASBOL	Gasoduto Bolívia-Brasil
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEIPOT	Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
HC	Hidrocarbonetos

HCNM	Hidrocarbonetos Não-Metânicos
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KBA	<i>Kraftfahrt-Bundesamt</i>
LAFY	<i>Los Angeles Free Way</i>
LANF	<i>Los Angeles Non Free Way</i>
LGN	Líquido de Gás Natural
MBB	Mercedes-Benz do Brasil
MCI	Motor a Combustão Interna
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material Particulado
NO _x	Óxido de Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
NTE	<i>Not-to-Exceed</i>
NYNF	<i>New York Non Free Way</i>
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PCS	Poder Calorífico Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
RMC	Modo Cíclico de duas Rampas
SET	<i>Supplemental Emissions Test</i>
UE	União Europeia
ULSD	<i>Ultra Low Sulfur Diesel</i>
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural
VEA	Veículos Ecológicos Avançados
WHSC	<i>World Harmonized Stationary Cycle</i>
WHTC	<i>World Harmonized Transient Cycle</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA.....	14
1.1.1 Justificativa	14
1.1.2 Aplicação no setor de petróleo e gás natural	15
1.2 USO DE GÁS NATURAL E SEUS DESAFIOS	16
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.4 REVISÃO BIB ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2 BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 O GÁS NATURAL	18
2.1.1 Cadeia produtiva do gás natural	22
2.1.2 O gás natural no cenário mundial	26
2.1.3 O gás natural no cenário brasileiro	29
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE MOTORES	32
2.2.1 Motores de combustão interna	33
2.2.1.1 Ciclo Otto	34
2.2.1.2 Ciclo Diesel	37
2.2.1.3 Motor estequiométrico	39
2.2.1.4 Motor de mistura pobre	41
3 ASPECTOS CONCEITUAIS	43
3.1 SETOR DE TRANSPORTES E MEIO AMBIENTE	43
3.2 ÔNIBUS MOVIDOS A GNV	47
3.3 MANUFATURA DE ÔNIBUS NO BRASIL.....	49
3.4 NORMAS PARA O CONTROLE DE EMISSÕES EM VEÍCULOS PESADOS.....	51
3.4.1 Norma europeia	52
3.4.2 Norma norte-americana	60
3.4.3 Norma brasileira	64
3.4.4 Comparativo entre as normas de emissão brasileira e norte-americana	66
3.5 COMPARAÇÃO ENTRE O GNV E OUTROS COMBUSTÍVEIS	67
3.5.1 Características técnicas dos veículos GNV	67
3.5.2 Características ambientais dos veículos GNV	69
4 ESTUDO DO IMPACTO ECONÔMICO DA SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL NO TRANSPORTE PÚBLICO	71

4.1 INTRODUÇÃO.....	71
4.2 CASO DE BERLIM.....	71
4.2.1 Frota analisada	71
4.2.2 Custos de abastecimento	73
4.2.3 Custo total	74
4.3 CASO ANÁLOGO BRASILEIRO	75
4.3.1 Frota analisada	75
4.3.2 Custos de abastecimento	77
4.3.3 Custo total	77
4.3.4 Aspecto ambiental	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
6 CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

1.1.1 Justificativa

Atualmente a grande preocupação da sociedade moderna é de que haja um uso racional e sustentável da energia de forma a não comprometer a capacidade de sobrevivência das gerações futuras. Neste sentido as energias tradicionais, como os combustíveis fósseis, não atendem à sustentabilidade ambiental sendo necessário o uso de energias alternativas.

O gás natural se comparado aos demais combustíveis fósseis possui uma combustão mais limpa, emitindo menos poluentes nocivos ao meio ambiente e à saúde humana. Quando comparado às energias renováveis, o gás natural não é mais vantajoso ambientalmente mas possui vantagens operacionais. Por exemplo, no caso da energia nuclear, existe o problema ambiental ainda não solucionado dos lixo radioativos gerados com o uso desse tipo de energia e nas hidrelétricas, existe a necessidade do alagamento de extensas áreas, o que implica no reassentamento de comunidades inteiras e extinção de espécies nativas da flora e fauna. Tais problemas não são encontrados ao se explorar o gás natural cujo processo de extração e produção são semelhantes ao petróleo.

Além disso, o gás natural possui a característica de ser versátil, podendo ser utilizado em diversos setores como: transportes, industrial, geração de energia (termelétricas, cogeração), residencial, comercial, entre outros. Tudo isso aliado ao fato de que o gás natural é uma fonte de energia confiável e principalmente segura. Por ser menos denso que o ar, em caso de vazamentos, o gás natural dissipa-se mais facilmente reduzindo os riscos de explosões e inflamando somente em temperaturas superiores a 620 °C.

Por fim, outro fato que justifica o uso de gás natural no panorama brasileiro é a sua disponibilidade. Segundo a Petrobras, em 2014, a oferta média de gás natural no Brasil foi de 96,1 milhões de m³/dia (10% superior ao ano anterior) e a previsão é de que no período de

2020 – 2030 a oferta média passe para 168 milhões de m³/dia. Este aumento significativo pode ser atribuído às recentes descobertas das reservas de gás natural nas áreas de pré-sal¹.

1.1.2 Aplicação no setor de petróleo e gás natural

O gás natural, conforme já mencionado, é uma fonte energética versátil e de forma a limitar o tema deste trabalho foi escolhida sua aplicação no setor de transportes. Dessa maneira foi estudado o gás natural veicular (liquefeito ou comprimido), sendo que o gás natural comprimido é mais utilizado no setor.

No setor de transportes três aspectos são essenciais para a escolha do gás natural como combustível: econômico, tecnológico e ambiental.

Os investimentos iniciais com veículos dedicados ao gás natural são normalmente maiores (maior custo de compra, por exemplo), no entanto este é geralmente amortizado em alguns anos em virtude dos menores custos operacionais com o veículo a gás.

No que diz respeito ao aspecto tecnológico, existem atualmente motores a gás muito avançados e que podem reduzir as emissões veiculares substancialmente. Convém ressaltar que embora já existam veículos que podem ser mais vantajosos em termos ambientais, suas tecnologias ainda não foram viabilizadas ou ainda são caras como é o caso dos veículos movidos a células de combustível e elétricos.

Por fim, no aspecto ambiental, o gás natural é uma solução eficiente na redução da emissão de poluentes nos grandes centros urbanos, sendo isento de materiais particulados e reduzindo a emissão de dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, entre outros.

Para o presente estudo, o setor de transportes é limitado ao estudo de ônibus dedicados movidos a gás natural. Além da comparação dos três aspectos citados anteriormente, o estudo pretende relatar as vantagens técnicas do uso de gás natural em motores a combustão e que impactos a substituição destes pode proporcionar.

¹ As regiões do pré-sal são compostas por grandes acumulações de óleo leve, de excelente qualidade e com alto valor comercial localizadas no litoral brasileiro. Como as acumulações são encontradas por baixo de uma extensa camada de sal, em profundidades que podem variar de 2.000 até 7.000 metros (PETROBRAS, 2015).

1.2 USO DE GÁS NATURAL E SEUS DESAFIOS NO BRASIL

O principal argumento de críticos contrários a utilização de gás natural no Brasil é de que as reservas brasileiras não indicam sustentabilidade para o consumo a longo prazo. Com as descobertas das bacias nas camadas de pré-sal, este argumento começa a ser questionável tendo em vista o potencial já provado das reservas.

No Brasil, o principal desafio a ser enfrentado pelo setor de gás natural é deficiência existente nas redes de transporte e distribuição. Um país de dimensões continentais como o Brasil, precisa de maiores investimentos nas redes de transporte (gasodutos) e estes são influenciados pela distância (aumentando os custos e riscos envolvidos na interligação das malhas). Como a indústria de gás natural é extremamente dependente de redes de transporte quando esta não possui uma boa infraestrutura e integração com os mercados consumidores, tem-se uma insegurança energética no suprimento para todas as regiões do país.

Um dos fatores propulsores para a exploração de gás natural no país é a necessidade de complementação da hidroeletricidade, que com os regimes de chuva instáveis e o aumento da demanda pela energia elétrica necessita de geração complementar feitas por termelétricas, algumas utilizando o gás natural.

Outro fator importante é a nacionalização do gás boliviano, ocorrida em 2006, sendo que a Bolívia é o maior exportador de gás natural utilizado para suprir o mercado brasileiro. A partir de então existe a incerteza de suprimento, fortemente influenciado pelas relações políticas e econômicas entre os países. Nesse sentido cabe ao governo brasileiro reavaliar o papel das importações no mercado nacional de gás natural, de forma a estimular a cadeia produtiva existente no país reduzindo assim dependência da oferta externa.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo principal analisar o impacto econômico e ambiental decorrente da substituição do diesel por gás natural veicular (GNV) na frota de uma empresa de transporte público em uma cidade com aproximadamente 120 mil habitantes. A análise inclui os benefícios, limitações técnicas e viabilidade econômica decorrente da implementação de tal substituição.

Com este estudo objetiva-se também apresentar o panorama brasileiro do gás natural, bem como os principais desafios encontrados no setor no país, além de apontar a potencialidade do uso do gás natural como combustível automotivo por reduzir significativamente a emissão de poluentes atmosféricos e os custos operacionais de uma eventual frota movida a gás natural.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No segundo capítulo deste trabalho é feita uma apresentação do gás natural abordando temas mais específicos como a cadeia produtiva, características do gás natural, composição do gás natural bruto e comercial, entre outros aspectos. Além disto, é apresentado o panorama mundial e nacional do gás natural sendo relevante ainda uma breve explanação dos tipos de motores utilizados neste trabalho (essencialmente os de ciclo Otto e Diesel).

Os aspectos conceituais são abordados no terceiro capítulo, sendo expostas as normas europeias, norte-americanas e brasileiras para o controle das emissões por veículos pesados. São discutidos os principais ensaios que verificam se os valores-limite estão sendo cumpridos aprovando a homologação dos motores comercializados. Finalizando essa seção, é apresentada uma análise qualitativa do gás natural comparado a outros combustíveis, em termos das vantagens técnicas e ambientais do mesmo.

No quarto capítulo, é apresentado um estudo de caso feito por uma empresa alemã que efetuou uma análise comparativa de custos de veículos movidos a gás natural e a diesel. A seguir é feita uma análise similar considerando o caso aplicado a veículos brasileiros. Nesta seção é também apresentado o retorno econômico decorrente da substituição de veículos diesel por GNV.

As considerações finais e algumas observações decorrentes do trabalho são apresentadas no quinto capítulo, onde os principais aspectos do tema abordado são destacados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O GÁS NATURAL

O gás natural é uma fonte não-renovável de energia cuja principal vantagem com relação aos demais derivados do petróleo é a sua menor emissão de gases poluentes durante os processos de combustão, gases estes que são prejudiciais tanto à saúde humana quanto ao meio ambiente. Esta fonte de energia possui vasta aplicação em diversos setores da economia, como por exemplo: na geração e cogeração de energia elétrica; em motores à combustão; na produção de calor, vapor ou chamas; entre outros (ANEEL, 2008).

Segundo a definição da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis² (ANP), o gás natural é “todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gasíferos, incluindo gases úmidos, secos residuais e gases raros (ANP, 2014)”.

O petróleo é proveniente da decomposição da matéria orgânica depositada junto com sedimentos submetidos à condições termoquímicas apropriadas. O tipo de hidrocarboneto a ser gerado, óleo ou gás, dependerá da constituição da matéria orgânica original e das condições térmicas a que estão submetidas. Os campos marítimos são formados basicamente a partir da matéria orgânica de microorganismos e algas, formando o fitoplâncton (THOMAS et al., 2001).

O gás natural é comumente encontrado associado ao petróleo recebendo a denominação de “gás associado”. Para os casos em que o gás é encontrado em campos isolados, este recebe o nome de “gás não-associado”. Na Figura 2.1 podem ser vistos a configuração destes tipos de reservatórios.

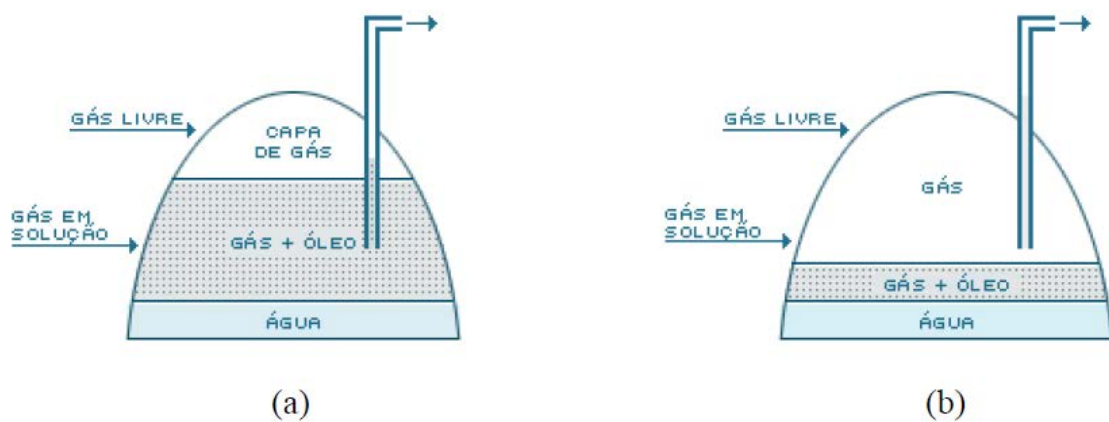
Segundo Martins (2006) e Petrobras (2014b), o gás associado é encontrado juntamente com petróleo, dissolvido no óleo ou na forma de capa de gás de reservatório. Neste caso, o gás é obtido após a separação física da fração líquida do petróleo e é considerado um co-produto deste. Já o gás não-associado pode ser encontrado em reservatórios de

² “Autarquia federal, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, a ANP é responsável pela execução da política nacional para o setor energético do petróleo, gás natural e biocombustíveis, de acordo com a Lei do Petróleo (Lei nº 9.478/1997)” (MME, 2015).

hidrocarbonetos isolados (jazidas puramente de gás) ou com pequenas quantidades de óleo, não havendo necessidade de separação física durante a produção do gás.

Em ambos os casos, após ser produzido, o gás deve ser processado antes de sua comercialização, de modo que atenda aos padrões de qualidade exigidos pelas normas regulatórias do país (no Brasil essas medidas regulatórias competem à ANP).

Figura 2.1 – Reservatório de gás natural: (a) associado; (b) não-associado.



Fonte: (SANTANNA, 2005).

Conforme já mencionado, a composição físico-química do gás natural bruto dependerá do tipo de matéria orgânica decomposta e das condições térmicas do campo. Além disso outros fatores são determinantes, como: localização do reservatório (campos terrestres ou marítimos, conhecidos como *onshore* e *offshore*, respectivamente), processos naturais a que o campo foi submetido no decorrer dos anos e geologia do solo. A Tabela 2.1 exemplifica a diversidade e variabilidade do gás natural bruto (antes de ser processado para comercialização) em alguns países.

Tabela 2.1 – Composição química do gás natural bruto encontrado em alguns países.

ORIGEM	COMPOSIÇÃO EM % VOLUME						Densidade (kg/m ³)	Poder Calorífico Superior (MJ/Nm ³)
País/Campo	Metano (CH ₄)	Etano (C ₂ H ₆)	Propano (C ₂ H ₂)	C4 e maiores	CO ₂	N ₂		
EUA/Panh.	81,80	5,60	3,40	2,20	0,10	6,90	-	42,70
EUA/Ashlaw	75,00	24,00	-	-	-	1,00	-	46,70
Canadá	88,50	4,30	1,80	1,80	0,60	2,60	-	43,40
Rússia	97,80	0,50	0,20	0,10	0,10	1,30	-	39,60
Austrália	76,00	4,00	1,00	1,00	16,00	2,00	-	35,00
França	69,20	3,30	1,00	1,10	9,60	0,60	-	36,80
Alemanha	74,00	0,60	-	-	17,80	7,50	-	29,90
Holanda	81,20	2,90	0,40	0,20	0,90	14,40	0,64	31,40
Pérsia	66,00	14,00	10,50	7,00	1,50	1,00	0,87	52,30
Mar do Norte	94,70	3,00	0,50	0,40	0,10	1,30	0,59	38,60
Argélia	76,00	8,00	3,30	4,40	1,90	6,40	-	46,20
Venezuela	78,10	9,90	5,50	4,90	0,40	1,20	0,70	47,70
Argentina	95,00	4,00	-	-	-	1,00	0,58	40,70
Bolívia	90,80	6,10	1,20	0,00	0,50	1,50	0,61	38,80
Chile	90,00	6,60	2,10	0,80	-	-	0,64	45,20
Brasil								
Rio de Janeiro	88,44	6,70	2,26	0,46	0,34	0,80	0,62	40,22
Bahia	88,56	9,17	0,42	-	0,65	1,20	0,61	39,25
Alagoas	76,90	10,10	5,80	1,67	1,15	2,02	-	47,70
Rio Grande do Norte	83,48	11,00	0,41	-	1,95	3,16	0,64	38,54
Espírito Santo	84,80	8,90	3,00	0,90	0,30	1,58	0,66	45,40
Ceará	76,05	8,00	7,00	4,30	1,06	1,53	-	52,40

Fonte: (GASNET, 2013a).

Pela Tabela 2.1 pode-se observar a predominância do gás metano (CH₄) na composição química do gás natural bruto e que o gás natural é menos denso que o ar, sendo esta uma característica que proporciona segurança em caso de vazamentos pois o gás dissipa-se diminuindo os riscos de explosões e incêndios. Além de possuir metano em sua composição, o gás natural é também composto em menores proporções por: etano, propano, gás carbônico, nitrogênio, água, ácido clorídrico, metanol e outros.

O gás natural comercial também possui composições variadas e depende do mercado que será atendido, seu uso final e do produto gás que se deseja. Mas apesar disso, existem parâmetros fundamentais a serem atendidos antes que o gás natural seja comercializado. Para

isso o gás natural bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), que tem a função retirar as impurezas e separar o gás de hidrocarbonetos pesados (GASNET, 2013a).

As características do gás natural comercial são determinadas segundo as normas da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da International Organization for Standardization (ISO).

Segundo o Regulamento Técnico ANP N° 001/98 o gás natural comercializado (de origem interna ou externa) no Brasil, deve atender determinadas especificações que estão apresentadas na Tabela 2.2. O gás natural comercial é dividido em três grupos, de acordo com a faixa de poder calorífico. De acordo com Petrobras (2014a), Bahiagás (2015) e outros fornecedores, o gás natural combustível possui Poder Calorífico Superior (PCS) de 9400 kcal/m³, ou seja, pertence ao Grupo M.

Tabela 2.2 – Especificações do gás natural comercial do Brasil.

CARACTERÍSTICAS (1)	UNID.	GRUPOS			MÉTODOS
		B (baixo)	M (médio)	A (alto)	
Poder calorífico superior (PCS)	kcal/m ³	8000 a 9000	8800 a 10200	10000 a 12500	ASTM D 3588
Densidade relativa ao ar		0,54 a 0,60	0,55 a 0,69	0,66 a 0,82	ASTM D 3588
Teor de Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	20	20	20	ASTM D 5504 ou ISO 6326-3
Teor de Enxofre (H ₂ S e enxofre mercaptídico), máx.	mg/m ³	80	80	80	ASTM D 5504 ou ISO 6326-3
Teor de Dióxido de Carbono (CO ₂), máx. (2)	% volume	2	2	2	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Teor de Inertes, máx. (3)	% volume	4	4	4	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Teor de Oxigênio (O ₂), máx.	% volume	0,5	0,5	0,5	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Pto de orvalho de água, 1atm, (4)	°C	-45	-45	-45	ASTM D 5454
(1) - Limites especificados são valores referidos a 20°C a 101,33 kPa (1 atm), exceto onde indicado.					
(2) - Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 3,5.					
(3) - Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 6,0.					
(4) - Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de - 39.					

Fonte: (BRASIL, 2014).

2.1.1 Cadeia produtiva do gás natural

A cadeia produtiva do gás natural pode ser dividida em cinco atividades que estão interligadas e estas são: exploração, produção, processamento, transporte e distribuição PRAÇA (2003).

Exploração – além da avaliação das atividades de prospecção, perfuração e completação de poços, nesta etapa as jazidas de petróleo são também avaliadas em termos qualitativos e quantitativos de forma a justificar a decisão de explorar uma determinada bacia. As fases que compõem esta atividade são:

- **Prospecção** – as atividades de prospecção consistem no levantamento de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares visando encontrar áreas propícias à acumulação de petróleo e gás natural. Os métodos mais comuns utilizados para a determinação da existência de hidrocarbonetos são: os geológicos, potenciais e sísmicos;
- **Perfuração** – uma vez determinados os locais com jazidas de petróleo e gás natural é então efetuada a perfuração. Um poço é perfurado em diversas fases, caracterizadas pelas diferentes distribuição de gradientes de pressão e conseqüentemente diferentes diâmetros de brocas a serem utilizadas. A perfuração pode atingir diferentes profundidades, em terra é feita por meio de sondas de perfuração, e no mar através de plataformas marítimas;
- **Completação** – ocorre após a perfuração de um poço e consiste em deixá-lo em condições de operação segura, durante seu período produtivo. A completação envolve as operações destinadas a equipar o poço para a produção de óleo ou gás ou ainda injeção de fluidos nos reservatórios. Essa operação é extremamente importante e envolve altos custos, sendo necessário o planejamento das operações e uma cuidadosa análise econômica (THOMAS et al., 2001).

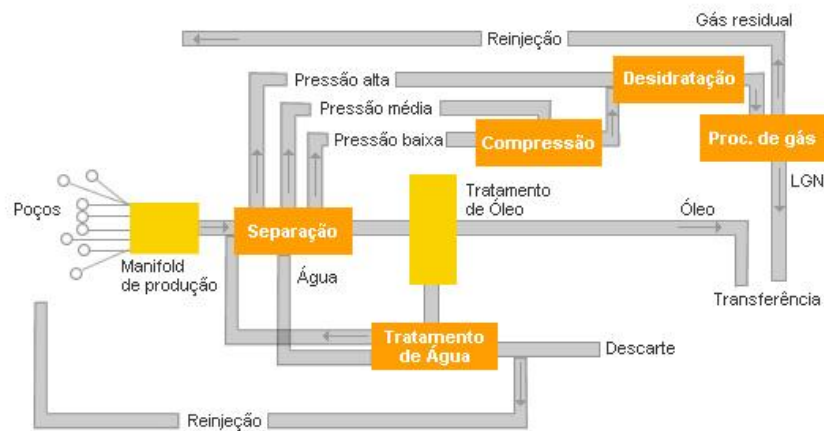
Produção – envolve a elevação do gás natural e o processamento primário no campo, separando o gás de outros componentes e transportando-o até a estação de tratamento ou à

base de armazenamento (MARTINS, 2006). Na produção de gás é comum que uma parte seja reinjetado nos poços e a outra seja utilizado nas UPGNs para geração de eletricidade e vapor. Convém ressaltar que, em alguns campos de produção de petróleo e gás a infra-estrutura existente não é capaz de produzir gás natural. Neste caso, o gás natural não é escoado e é comumente queimado nos *flares* (chaminés). As principais atividades desta fase são:

- **Elevação ou extração** – consiste no fluxo de fluidos produzidos no campo até a superfície, podendo ocorrer espontânea ou artificialmente. Na elevação natural os fluidos (óleo, gás ou água) chegam até a superfície devido à existência de diferença de pressão entre o interior das jazidas e o meio externo. Já na elevação artificial, alguns métodos são utilizados: a) *Gas lift* – introduzindo-se gás comprimido na coluna de produção, utiliza-se sua energia para elevar os fluidos até a superfície; b) Bombeio centrífugo submerso – utilizado nos poços com fluidos de elevada viscosidade e temperatura; c) Bombeio mecânico com hastes – por meio de hastes conectadas a um motor, o movimento é transmitido até o fundo do poço acionando uma bomba que eleva até a superfície os fluidos produzidos; d) Bombeio por cavidades progressivas – aplicado na produção de fluidos com baixa ou alta viscosidade e em poços menos profundos (GALP ENERGIA, 2014);
- **Processamento primário de fluidos** – esta etapa visa: i) separar os hidrocarbonetos (óleo e gás) da água e outras impurezas; ii) fazer o tratamento (ou condicionamento) dos hidrocarbonetos para que nas refinarias estes possam ser processados e iii) fazer o tratamento da água para reinjeção e descarte;

No caso do condicionamento do gás natural, objetiva-se remover ou reduzir o teor dos contaminantes de forma a atender às especificações de comercialização (Tabela 2.2). Nesse processo ocorre a desidratação a fim de evitar corrosão e redução da vida útil dos gasodutos e dessulfurização que consiste na remoção de compostos de enxofre que são causadores de corrosão. O diagrama da Figura 2.2 mostra os principais componentes de uma unidade de processamento primário.

Figura 2.2 – Fluxograma do processamento primário de fluidos.



Fonte: (GALP ENERGIA, 2014).

Processamento – nas UPGNs é feita a separação das frações leves (metano e etano, que constituem o chamado gás residual) das frações pesadas (desde propano até hexano, que são mais valorizadas comercialmente). O gás natural antes do processamento contém líquido de gás natural (LGN) e por esse motivo é denominado “gás úmido”, enquanto o gás residual é chamado de “gás seco” pois não possui hidrocarbonetos condensáveis. A Figura 2.3 mostra o esquema de funcionamento de uma UPGN e os três principais subprodutos do processamento: o gás natural processado, formado a partir de metano (C1) e etano (C2); o GLP, originado do propano (C3) e do butano (C4) e a gasolina natural (C5).

Figura 2.3 – Esquema de funcionamento de uma UPGN.



Fonte: (PRAÇA, 2003).

Transporte – a solução mais utilizada é o transporte por gasoduto, no entanto existe ainda a possibilidade de transporte do gás natural nas suas forma liquefeita ou comprimida sendo feita por meio de veículos específicos para este fim. De forma resumida os tipos de transporte são:

- **Gasoduto** – é uma rede de tubulações operando em alta pressão e levando grande volume de gás natural das fontes produtoras até as distribuidoras, chamados *city-gates* ou pontos de recebimento. Para garantir que o gás chegue a seu destino, ao longo da malha existem estações de compressão, que são responsáveis por aumentar a capacidade de transporte;
- **Gás Natural Comprimido (GNC)** – consiste no gás natural processado e condicionado sob a sua forma comprimida em reservatórios de temperatura e pressão de 220 atm. Este modo de transporte é conhecido como “gasoduto virtual” e é feito em distâncias de até 150 km por carretas com capacidade de 3000 a 5000 m³ (OLIVEIRA FILHO, 2006). O gás é armazenado em cilindros metálicos por meio de compressores especiais e é transportado em caminhões, balsas ou plataformas ferroviárias específicas até os clientes que farão a distribuição do mesmo;
- **Gás Natural Liquefeito (GNL)** – esta tecnologia consiste em submeter o gás natural a baixíssimas temperaturas (-162 °C) e com volume reduzido em até 600 vezes em relação ao gás natural no estado gasoso. Facilitando assim o armazenamento e transporte de grandes quantidades de gás para os centros de consumo. O combustível é geralmente transportado em navios construídos para esse fim e ao chegar em terminais de desembarque é regaseificado e ajustado à pressão requerida para o uso final.

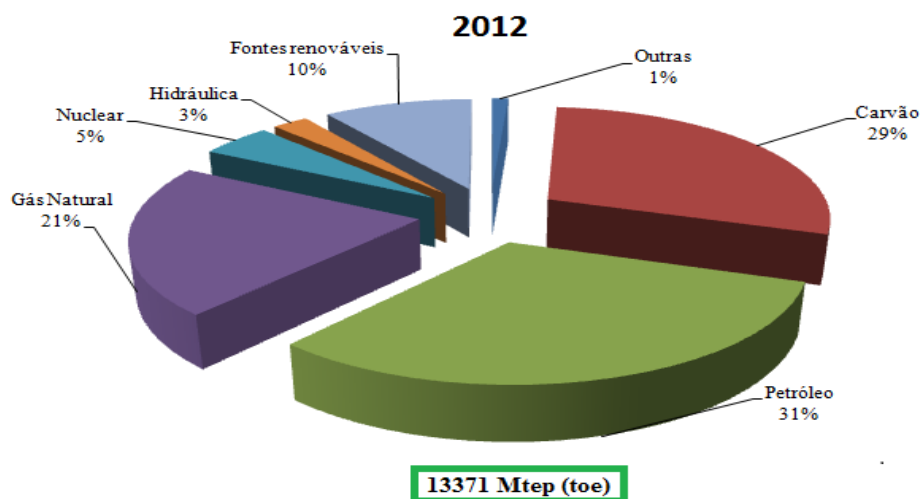
Distribuição – constitui a etapa final da cadeia produtiva e pode ser feita também por gasodutos ou a granel (na forma de GNC ou GNL), chegando finalmente ao consumidor final. Nesta fase, o produto já atende às especificações da ANP e é praticamente isento de contaminantes. Em seu estado bruto, o gás natural é inodor e por medidas de segurança exige-se a presença de substância odorante durante sua distribuição, podendo no entanto ser transportado sem odorização.

2.1.2 O gás natural no cenário mundial

Nas últimas décadas a importância do gás natural e sua participação na matriz energética mundial vem crescendo significativamente.

De acordo com dados do *Key World Energy Statistics 2014*, no ano de 2012 o gás natural ocupava a terceira posição das fontes primárias mais utilizadas na matriz energética mundial, sendo superado apenas pelo carvão e derivados de petróleo, conforme mostra a Figura 2.4.

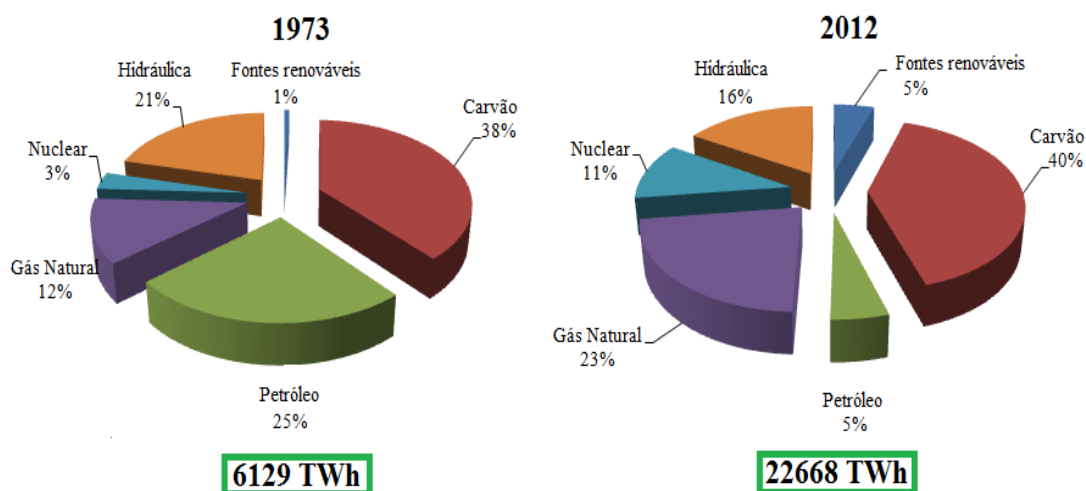
Figura 2.4 – Oferta de energia mundial por fonte primária para o ano de 2012.



Fonte: Traduzido de (IEA, 2014).

Em relação à produção de energia elétrica, o gás natural está em segundo lugar no ranking mundial das fontes primárias mais utilizadas (IEA, 2014). Na Figura 2.5, pode-se observar um significativo decréscimo do uso de petróleo e seus derivados entre os anos de 1973 e 2012. E em contrapartida, o gás natural teve crescente participação no período observado passando de 12,1% para 22,5%. Quase o dobro das fontes mais utilizadas na geração de energia elétrica mundial.

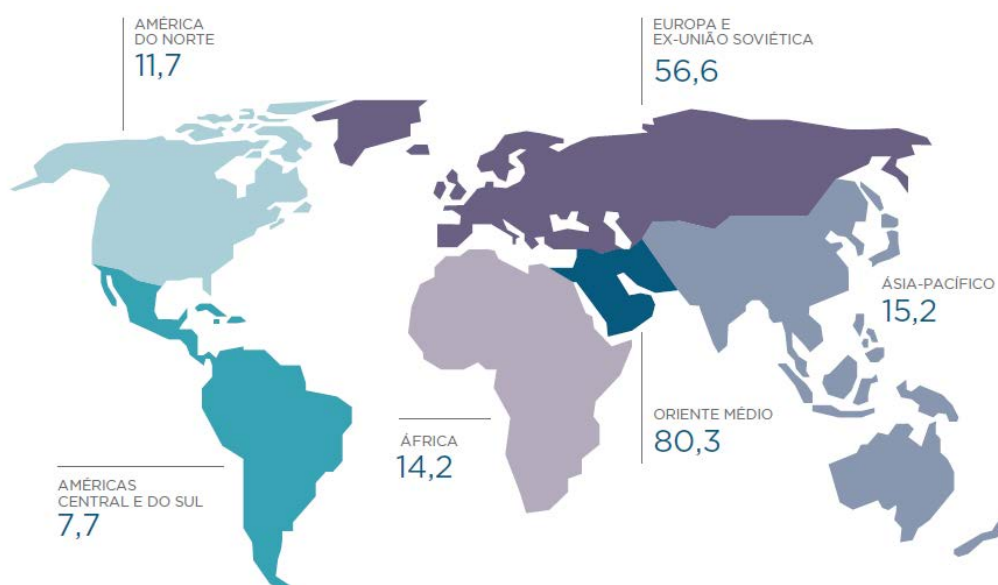
Figura 2.5 – Geração de energia elétrica por fonte primária nos anos de 1973 e 2012.



Fonte: Traduzido de (IEA, 2014).

Segundo dados do Anuário Estatístico da ANP de 2014, que tem por ano base o ano de 2013, as reservas totais provadas no mundo eram de 185,7 trilhões de m³. Dentre as quais 80,3 trilhões de m³ (43,2% do total mundial) estão concentradas no Oriente Médio. O cartograma da Figura 2.6 ilustra as reservas provadas de gás de acordo com as regiões geográficas.

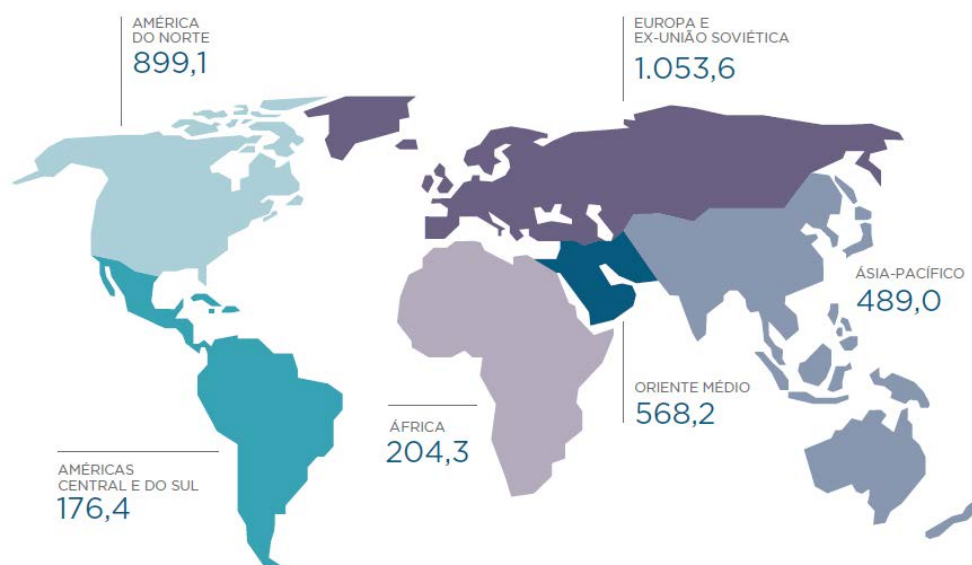
Figura 2.6 – Reservas provadas de gás natural, segundo regiões geográficas (trilhões de m³).



Fonte: (ANP, 2014).

Em termos da produção do gás natural mundial, houve uma alta de 0,8% em relação ao ano anterior correspondendo a 3,4 trilhões de m³ de gás natural produzidos mundialmente. No ranking global de maiores produtores estão em primeiro lugar, os Estados Unidos com 687,6 bilhões de m³ (20,3% do total mundial). Seguido da Rússia que produziu 604,8 bilhões de m³ (17,8% do total mundial). Na Figura 2.7 pode ser vista a produção mundial de gás natural segundo as regiões geográficas.

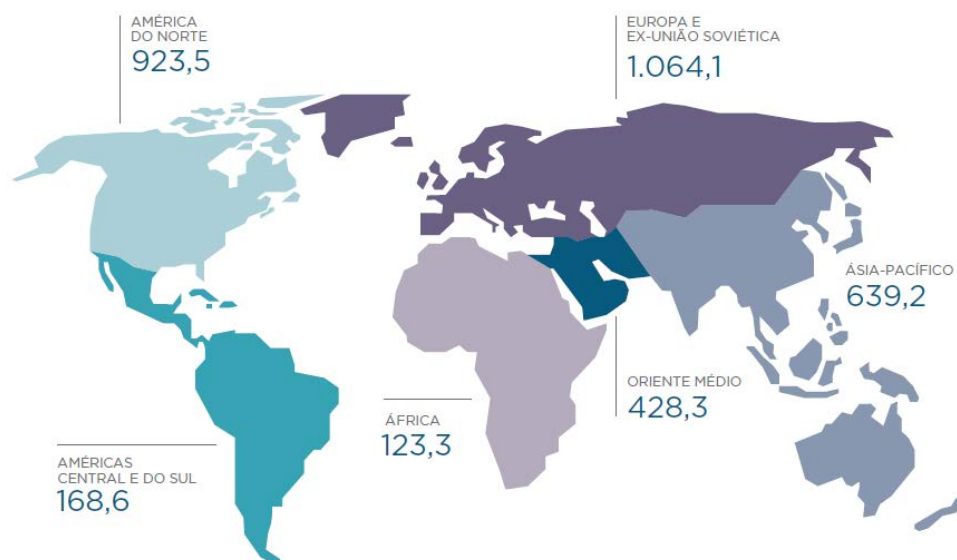
Figura 2.7 – Produção de gás natural, segundo regiões geográficas (bilhões de m³).



Fonte: (ANP, 2014).

O consumo global de gás natural em 2013 foi de 3,3 trilhões de m³ (1,1% de aumento), ficando abaixo da média histórica de crescimento de 2,5% apresentada nos últimos 10 anos. O crescimento do consumo ficou abaixo da média em todas as regiões, com exceção da América do Norte. Os Estados Unidos é o maior consumidor global de gás natural, consumindo 737,2 bilhões de m³, o que representa 22% do total mundial. Em termos geográficos pode ser visto qual o consumo registrado em 2013 na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Consumo de gás natural, segundo regiões geográficas (bilhões de m³).



Fonte: (ANP, 2014).

2.1.3 O gás natural no cenário brasileiro

O mercado brasileiro de gás natural é relativamente recente e os primeiros mercados até os anos 90 estavam concentrados em poucos estados, principalmente no Rio de Janeiro, São Paulo e Bahia. Além disso, o papel da atividade de exploração e produção de gás natural possuía caráter complementar à produção de petróleo, visto que não se tinha o objetivo de suprir o mercado de gás, considerando as poucas aplicações existentes na época (PRATES et al., 2006).

Somente em 1999 com a criação do Gasoduto entre Bolívia e Brasil (GASBOL), houve um aumento expressivo da utilização do gás natural na matriz energética brasileira devido as importações de gás natural boliviano. Em 2002, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2015, o gás natural correspondia em 2005 a uma parcela de 9,4% da oferta interna de energia passando em 2014 para 13,5%.

O Brasil não possui um número expressivo, se comparado com as reservas mundiais, de reservas provadas de gás natural (ficando na 31ª colocação no ranking mundial) e não é autosuficiente na produção do mesmo, necessitando da parcela de importação. Em 2013, as importações de gás natural totalizaram 16,5 bilhões de m³, dos quais 70,2% do total são provenientes da Bolívia. O volume restante correspondia a importações de GNL.

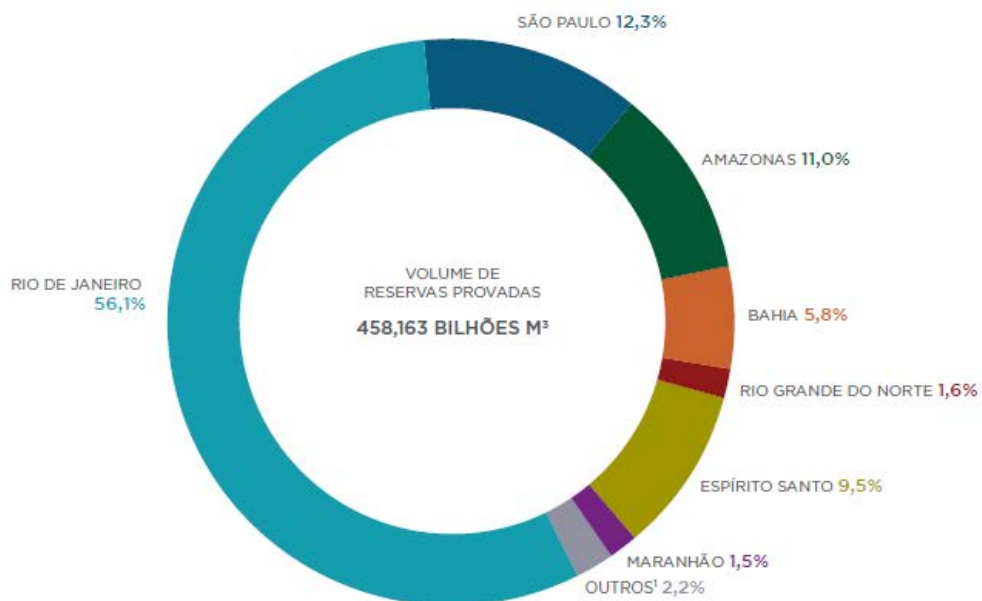
O gás boliviano tem sido importante para suprir a demanda em território nacional e tem possibilitado que o suprimento de gás natural no país seja mantido, complementando a produção nacional de forma rápida e com grandes volumes.

No entanto, com a nacionalização do gás boliviano, ocorrida em 2006, houve um conflito diplomático entre Bolívia e Brasil, gerando instabilidade de preços e incertezas quanto à continuidade do abastecimento. A partir de então o governo brasileiro passou a tomar medidas para tentar reduzir a dependência do gás boliviano, como por exemplo o investimento na cadeia produtiva de gás natural nacional e importação de GNL de países como Trinidad e Tobago, Nigéria, Espanha, entre outros (MARTINS, 2006).

No Brasil, as acumulações de gás natural normalmente se encontram ligadas às de petróleo, na forma de gás associado (representando 66,6% do gás produzido em 2013).

Segundo o Anuário Estatístico da ANP de 2014, no ano de 2013, as reservas provadas de gás natural totalizavam 458,2 bilhões de m³, tal volume representava 54,6% das reservas totais. Este número foi 8,6% menor que o ano anterior. A maior parte das reservas provadas do Brasil estão concentradas na Região Sudeste (estados do Rio de Janeiro e São Paulo sozinhos, totalizam juntos quase 70% do total) e isso pode ser visto na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Reservas provadas de gás natural, segundo unidades da federação.

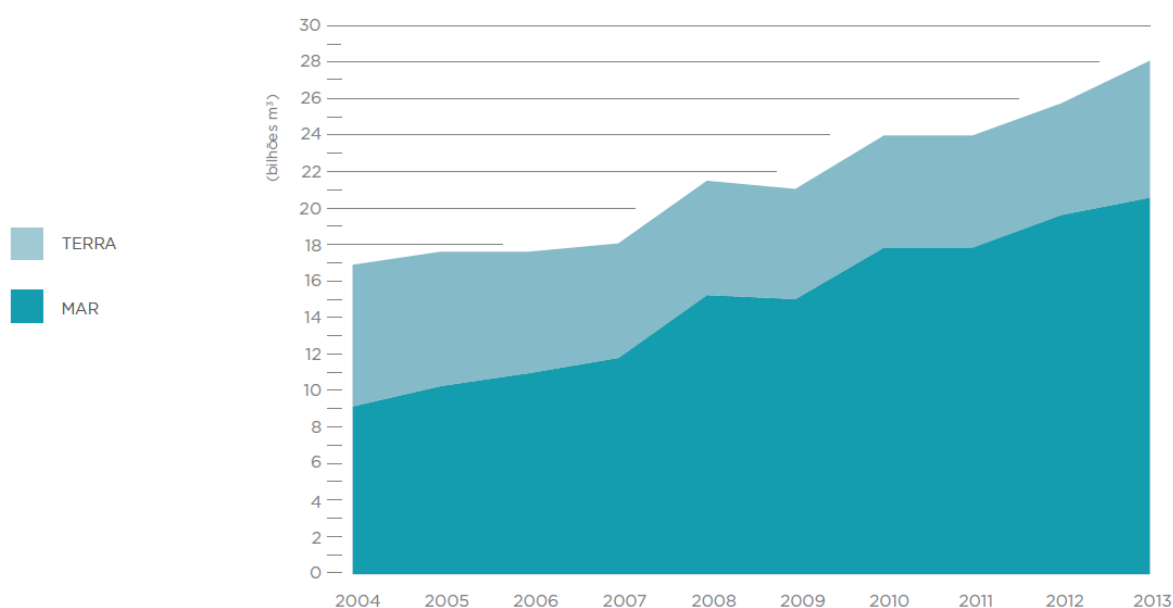


Fonte: (ANP, 2014).

A produção de gás natural teve acréscimo de 9,1% no ano de 2013, totalizando 28,2 bilhões de m³. A média diária de produção foi de 87,4 milhões de m³/dia, sendo que a produção marítima correspondeu a maior parcela do total produzido (73,3%). A Figura 2.10 ilustra a produção de gás natural em terra e no mar no período compreendido entre os anos de 2004 a 2013.

Da produção total de gás natural, 4,6% sofreu queima ou perda³ e 13,8% foi reinjetada. Estes valores foram os menores desde a criação da ANP (1998), com um índice de 95,4% de aproveitamento do gás natural produzido. Em 2013, o Brasil estava na 34ª posição no ranking mundial de produtores de gás natural.

Figura 2.10 – Evolução da produção de gás natural em terra e mar no Brasil (2004 - 2013).



Nota: o valor total da produção inclui os volumes de reinjeção, queimas, perdas, consumo próprio e volume condensado na forma de LGN.

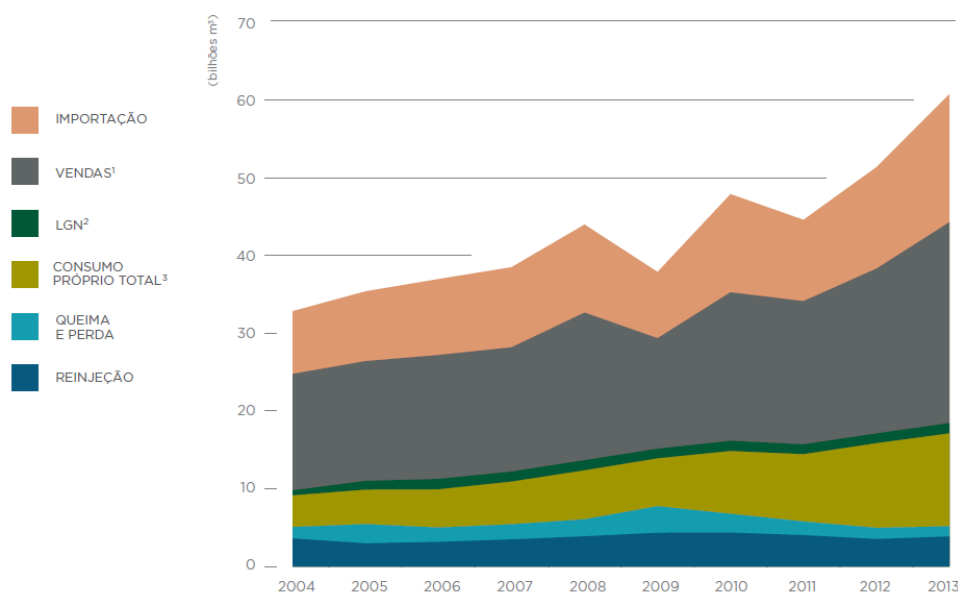
Fonte: (ANP, 2014).

Em 2013, a oferta primária de gás natural brasileiro foi de 39,2 bilhões de m³ e a Figura 2.14 mostra a oferta primária nacional que corresponde à soma dos valores de importação e

³ São objeto de regulamentação específica estabelecida pela Portaria ANP n° 249, de 01/11/2000. E alguns motivos para queimas e perdas são: segurança, emergência, limitação operacional, manutenção programada, baixa produção de gás natural, contaminação, etc (MARTINS, 2006).

produção, descontados os ajustes, queima, perda e reinjeção. O valor da oferta interna também pode ser obtido pela soma do consumo próprio total, do LGN absorvido nas UPGNs e das vendas.

Figura 2.11 – Evolução do balanço do gás natural no Brasil (2004 - 2013).



Fonte: (ANP, 2014).

Nota:

¹Inclui as vendas para as Fábricas de Fertilizantes Nitrogenados (FAFEN) pertencentes à Petrobras. ²Volume de gás natural absorvido nas UPGNs (GLP, C5+, etano e propano). ³Refere-se ao consumo próprio da Petrobras nas áreas de produção, refino, geração térmica de eletricidade, processamento e movimentação de gás natural.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DE MOTORES

Nesta seção são apresentadas os principais tipos de motores a combustão interna (MCI). Sendo divididos quanto ao tipo de ignição (por centelha ou compressão) e mistura ar-combustível (estequiométrico ou mistura pobre).

Convém ressaltar que este trabalho promove comparações entre veículos dedicados ao gás natural veicular (GNV) e veículos *dual-fuel*⁴ em relação a outros combustíveis como

⁴ O termo “dual-fuel” é usado para os veículos “diesel-gás” e não foi traduzido para o português de forma que não haja confusão com os termos “bicomcombustível” e “flex-fuel”. O termo bicomcombustível está relacionado a motores que operam ora com um combustível ora com outro sem que estes se misturem na câmara de combustão. A denominação flex-fuel refere-se a motores que operam simultaneamente com dois combustíveis

diesel e gasolina. No entanto, não serão mencionadas as características dos veículos convertidos para operarem com GNV.

2.2.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna transformam a energia térmica proveniente da queima do combustível em energia mecânica. As duas principais classificações para os motores de combustão interna dizem respeito ao seu ciclo termodinâmico, podendo este ser do tipo Otto ou Diesel.

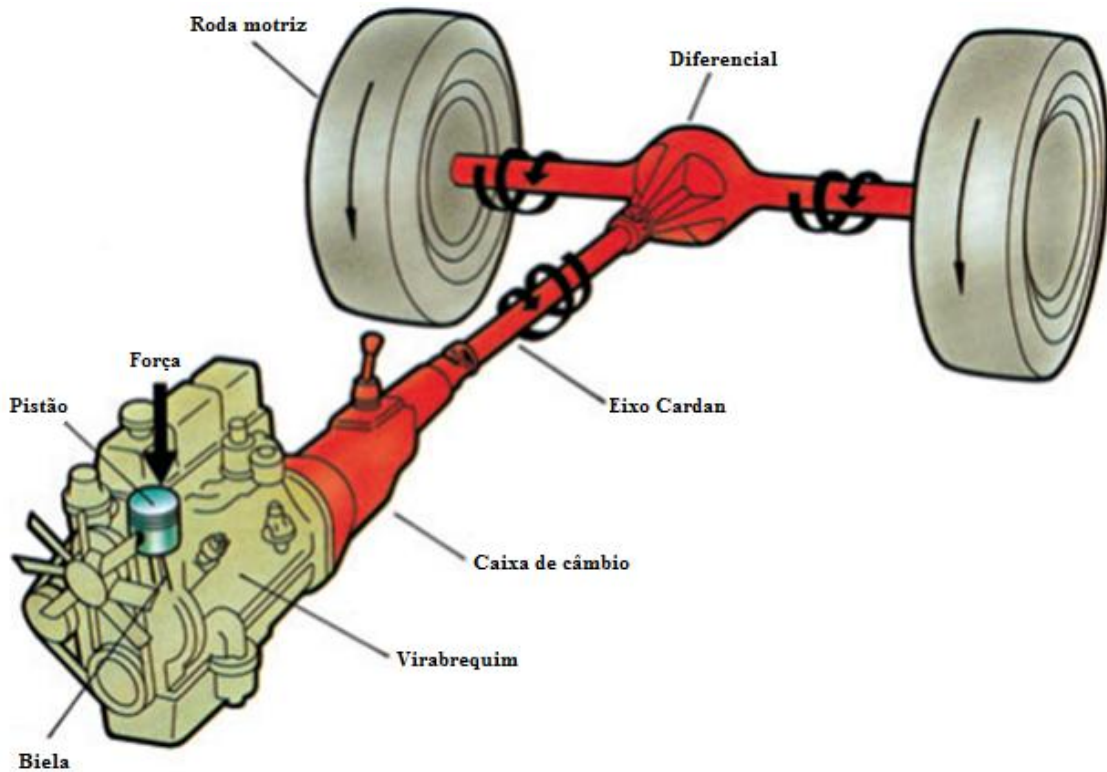
Os motores de ciclo Otto promovem a queima da mistura ar-combustível através de uma faísca (ou centelha). Já nos motores de ciclo Diesel, a queima ocorre devido ao elevado calor e pressão gerados pela compressão do ar adicionado ao combustível na câmara de combustão.

O processo de combustão determina características importantes de um motor como: potência, eficiência térmica e emissão de poluentes.

A Figura 2.12 mostra as partes mecânicas de um veículo, que promovem o movimento giratório do eixo devido ao processo de combustão que ocorre dentro da câmara.

A energia liberada no processo de combustão, executa um trabalho contra a cabeça do pistão, forçando-o a deslocar-se na direção do virabrequim (também chamado de eixo ou árvore de manivelas). A biela, elemento de ligação entre o pistão e o virabrequim, transmite a força atuante na cabeça do pistão ao moente (parte do virabrequim onde se apoiam as bielas), fazendo com que este inicie o movimento giratório que será transmitido para as rodas do veículo.

Figura 2.12 – Movimento de rotação do eixo Cardan proveniente de um MCI.



Fonte: (MAHLE, 2012).

2.2.1.1 Ciclo Otto

Em 1876, Nicolaus August Otto inventou o motor de combustão interna de quatro tempos movido a gasolina. O motor de ciclo Otto possui ignição por centelha, podendo utilizar como combustíveis o álcool, a gasolina ou o GNV.

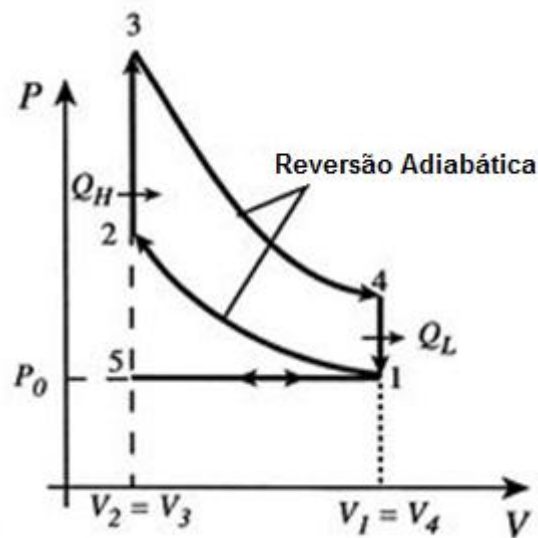
O sistema de ignição em um motor Otto é composto por: bateria, chave de ignição, bobina de ignição, distribuidor e vela de ignição.

A bateria transforma a energia química em energia elétrica alimentando o primário da bobina. A ignição ocorre quando a chave de ignição é acionada, sendo que esta tem a função de interromper ou não o fluxo de corrente que vai para a bobina. A bobina de ignição possui enrolamentos primários e secundários, que a partir de uma baixa tensão (em geral de 12 V, proveniente da bateria) induz uma alta tensão da ordem de 2000 V que por meio do

distribuidor é destinada às velas de ignição. A vela de ignição por sua vez, produz uma centelha que é emitida na cabeça do pistão no momento da combustão.

O funcionamento do motor Otto a quatro tempos segue o ciclo termodinâmico mostrado na Figura 2.13 e pode ser explicado como se segue.

Figura 2.13 – O ciclo termodinâmico ideal em motores do tipo Otto.



Fonte: Adaptado de (QUATTROCHI, 2006a).

- **1º Tempo – Admissão:** à medida que o pistão move-se de PMS⁵ para PMI⁶, a válvula de admissão se abre e por meio de vaporização e aspiração da mistura ar-combustível no interior do cilindro (5 para 1 na Figura 2.13). No tempo de admissão, o virabrequim efetua meia volta (180°);
- **2º Tempo – Compressão:** ocorre quando há o fechamento da válvula de admissão. Conforme o pistão vai voltando para PMS, a mistura ar-combustível vai sendo comprimida e a pressão e temperatura aumentam (1 para 2 na Figura 2.13). O virabrequim faz outra meia volta, dando portanto uma volta completa (360°);
- **3º Tempo – Combustão:** um pouco antes do pistão atingir PMS, o sistema de ignição envia um sinal elétrico à vela, fazendo com que surja uma centelha entre os eletrodos da mesma, inflamando a mistura que está fortemente comprimida (de 2 para 3). Dessa

⁵ Ponto Morto Superior (PMS) – posição do êmbolo mais próxima à parte superior do bloco.

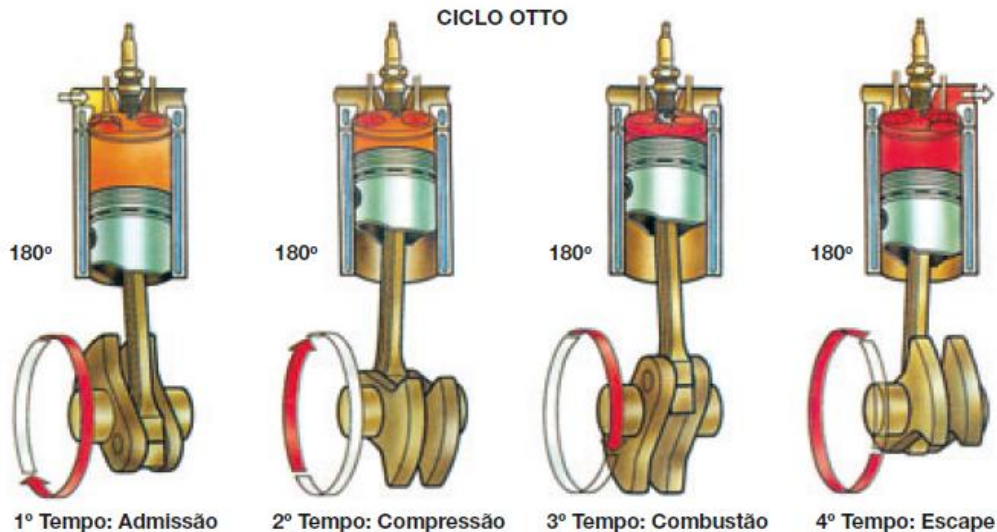
⁶ Ponto Morto Inferior (PMI) – posição do êmbolo mais próxima ao virabrequim .

forma, os gases tendem a se expandir com o aumento de temperatura forçando o pistão de PMS para PMI (3 para 4). O virabrequim efetua outra meia volta (540°);

- **4º Tempo – Escape:** é o tempo posterior à queima da mistura e a expansão dos gases, nesse momento a válvula de escape se abre havendo rejeição de calor para as temperaturas de T_4 a T_1 (4 para 1). Com o movimento do pistão de PMI para o PMS, os gases queimados são forçados para fora do cilindro (1 para 5). O virabrequim dá mais uma meia volta, assim tem-se a segunda volta completa (720°).

A Figura 2.14 mostra a posição do pistão e do virabrequim de acordo com as fases explicitadas no processo de combustão do motor Otto. É importante ressaltar que o único tempo em que há produção de energia mecânica é o tempo de “Combustão”. Os demais tempos são chamados de passivos, pois somente absorvem energia.

Figura 2.14 – Funcionamento de um motor a quatro tempos do Ciclo Otto.



Fonte: (MAHLE, 2012).

2.2.1.2 Ciclo Diesel

Em 1892, Rudolf Diesel inventou um motor de combustão interna cuja ignição ocorria por compressão. O motor de ciclo Diesel pode utilizar como combustíveis o diesel, biodiesel e suas misturas.

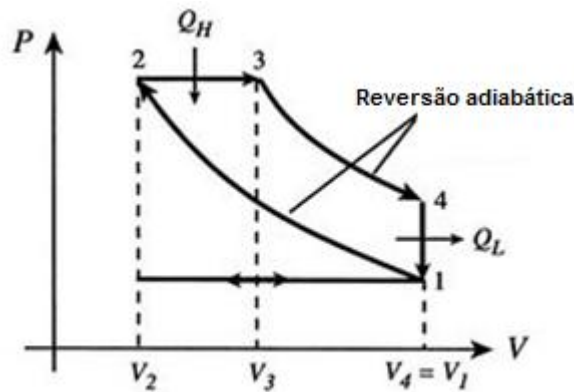
Este tipo de motor possui menor consumo de combustível, maior vida útil (tanto do motor quanto seus componentes) e melhor eficiência térmica, quando comparado com os motores de ciclo Otto similares.

O GNV pode ser usado em motores de combustão interna substituindo os combustíveis líquidos derivados de petróleo como a gasolina e o diesel. No entanto, o gás natural não é utilizado em motores do ciclo Diesel devido a necessidade de uma alta taxa de compressão para causar a auto-ignição do gás natural (taxa de 38:1, sendo que as maiores taxas de compressão dos motores Diesel são da ordem de 20:1).

Dessa maneira, a maior parte dos veículos movidos a GNV são equipados com motores do ciclo Otto e os *dual-fuel* que utilizam ignição por compressão são dotados de um sistema de injeção piloto de diesel. Este sistema tem a mesma função que a vela de ignição no motor de ciclo Otto, onde uma pequena quantidade de diesel é injetada na câmara de combustão se inflamando e iniciando a queima do gás natural. O sistema de ignição por compressão, é similar ao do motor Otto não apresentando apenas a vela de ignição e o distribuidor de energia.

O funcionamento de motores ciclo Diesel é semelhante aos de ciclo Otto, o diagrama que ilustra o ciclo ideal do motor Diesel é apresentado na Figura 2.15 e as voltas efetuadas pelo virabrequim são ilustradas na Figura 2.16.

Figura 2.15 – O ciclo termodinâmico ideal em motores do tipo Diesel.

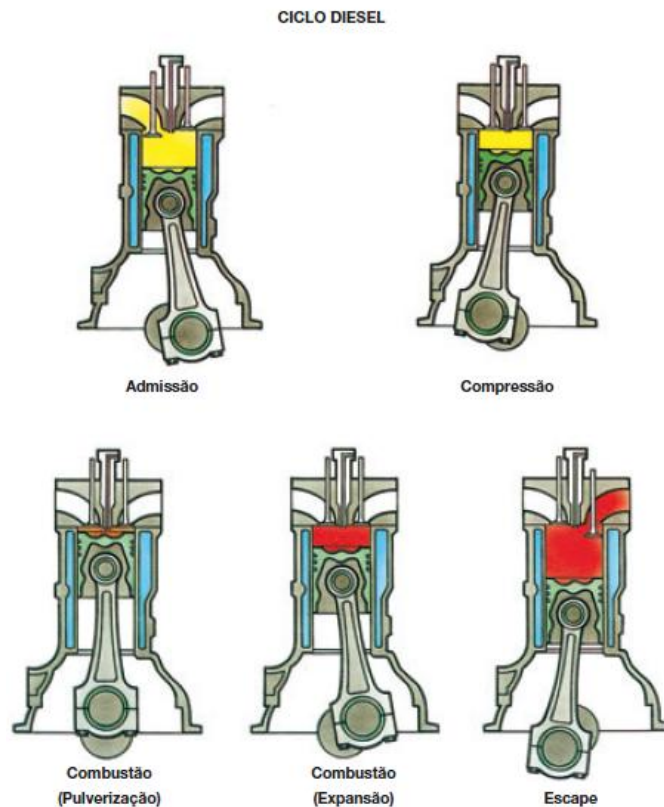


Fonte: Adaptado de (QUATTROCHI, 2006b).

- **1º Tempo – Admissão:** à medida que o pistão move-se de PMS para PMI, a válvula de admissão se abre e ocorre a aspiração *somente do ar* no interior do cilindro. Nesse tempo a árvore de manivelas efetua meia volta (180°);
- **2º Tempo – Compressão:** ocorre quando há o fechamento da válvula de admissão. Conforme o pistão vai voltando para PMS, o ar vai sendo comprimido (1 para 2) até atingir uma alta pressão (P_2). A árvore de manivelas faz mais uma meia volta, dando então uma volta completa (360°);
- **3º Tempo – Explosão/Expansão:** quando o pistão atinge PMS, o bico injetor pulveriza, fina e fortemente, um certo volume de combustível dentro da câmara de combustão⁷. O ar que está a uma temperatura de 500 a 700 °C e sob alta pressão, o combustível, injetado nessas condições promovem a autoignição, impulsionando o pistão para PMI (3 para 4). O virabrequim efetua outra meia volta (540°);
- **4º Tempo – Escape:** é o tempo posterior à queima da mistura e a expansão dos gases, nesse momento a válvula de escape se abre. Com o movimento do pistão de PMI para o PMS, os gases queimados são forçados para fora do cilindro (4 para 1). O virabrequim dá mais uma meia volta, completando assim a segunda volta completa (720°) e encerrando o ciclo.

⁷ Volume que fica no cilindro após o êmbolo atingir seu ponto máximo (PMS), também é chamada de câmara de compressão.

Figura 2.16 – Funcionamento de um motor a quatro tempos do Ciclo Diesel.



Fonte: (MAHLE, 2012).

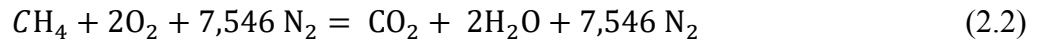
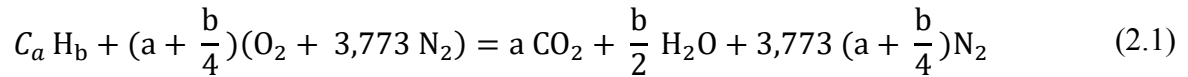
Em relação ao tipo de mistura ar-combustível envolvida no processo de combustão, existem dois tipos principais de tecnologia para motores movidos a GNV. Uma é a do motor estequiométrico e a outra do motor de mistura pobre (também conhecido na literatura como *lean-burn*).

2.2.1.3 Motor estequiométrico

Uma combustão estequiométrica ocorre quando a quantidade exata de combustível é adicionada ao ar, ou seja, há a quantidade de oxigênio suficiente para oxidar completamente todos os produtos.

Segundo Loureiro (2015), a equação (2.1) fornece os valores estequiométricos da combustão completa de um determinado combustível. Por meio desta equação pode-se obter a

combustão estequiométrica do ar com qualquer combustível, um exemplo seria o metano (CH_4) e o resultado dessa combustão é dado pela equação (2.2).



Comumente utiliza-se algumas relações que descrevem a proporção de combustível em relação a uma massa de ar ou vice-versa. Como a composição dos produtos da combustão varia quanto ao tipo de mistura (rica ou pobre) e como a razão ar-combustível estequiométrica $(A/F)_s$ ⁸ depende da composição do combustível, utiliza-se mais comumente a razão de equivalência combustível-ar (Φ , dada pela Equação 2.3) ou a razão relativa ar-combustível (λ , dada pela Equação 2.4). Nos sistemas de injeção eletrônica existe um dispositivo chamado sonda lambda que checa essa razão entre ar e combustível.

$$\Phi = \frac{(\frac{F}{A})_{real}}{(\frac{F}{A})_s} \quad (2.3)$$

$$\lambda = \Phi^{-1} = \frac{(\frac{A}{F})_{real}}{(\frac{A}{F})_s} \quad (2.4)$$

Para mistura estequiométrica os valores de Φ e λ são iguais a 1. Os motores estequiométricos são muito usados em veículos leves movidos a gasolina e reduzem as emissões a níveis extremamente baixos.

⁸ Esta relação indica quantas partes de ar para a combustão completa de uma parte de combustível, A- vem do inglês para “air”, F – vem do inglês para “fuel” e s – vem do inglês para “stoichiometric”.

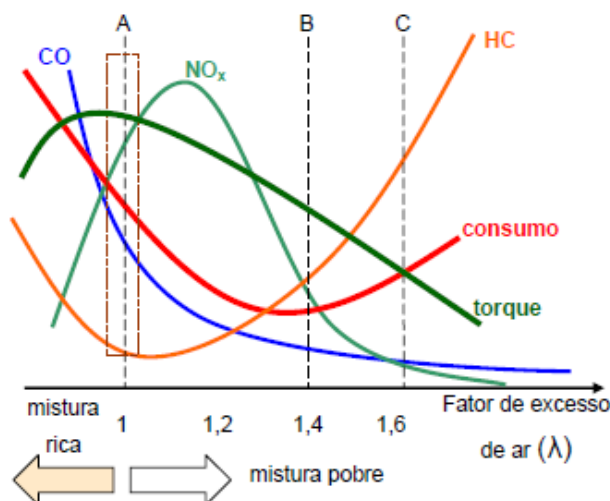
2.2.1.4 Motor de mistura pobre

Uma mistura pobre ($\Phi < 1$ e $\lambda > 1$) é aquela em que há excesso de oxigênio, pois no processo de combustão existe mais ar do que o necessário para queimar o combustível. O excesso de ar diminui o pico da temperatura de combustão, reduzindo as emissões dos óxidos de nitrogênio (NO_x) e materiais particulados (MP). Além disso, permite um índice de compressão maior que o motor estequiométrico, aumentando sua eficiência.

Os benefícios desse tipo de motor são: durabilidade, economia de combustível e alta potência de saída se turbocompressor⁹ for usado. Os motores de mistura pobre geralmente operam a uma baixa rotação e tem mais potência que os motores estequiométricos – dessa forma eles operam de forma semelhante aos motores a diesel. Assim, grande parte dos motores a gás do tipo *lean-burn* são utilizados para veículos pesados.

A Figura 2.17 apresenta a variação típica dos parâmetros de emissão, desempenho e consumo dos ônibus GNV com motor ciclo Otto (gasolina), em função do fator λ .

Figura 2.17 – Variação dos parâmetros de ônibus a gás em função de λ .



Fonte: (OLIVEIRA FILHO, 2006).

⁹ É um componente externo ao motor, mecanicamente independente e termodinamicamente integrado ao motor. O uso de turbocompressor aumenta a potência específica do motor, proporciona um aproveitamento de quase 100% dos gases gerados na combustão, reduz a emissão de CO_2 , reduz o nível de ruído e melhora a relação (A/F)s.

O ponto “A” indica uma mistura estequiométrica e o retângulo hachurado representa a faixa limite em que o motor estequiométrico permite o uso de catalisador de 3 vias. Os motores de mistura pobre costumam ser ajustados em “B”, sendo este um ponto ótimo de operação com baixa emissão de NO_x e não necessitando do uso de catalisador. Por fim, como pode-se observar na Figura 2.17, as misturas muito pobres ($\lambda > 1,6$) tem altos níveis de emissão de hidrocarbonetos (HC) totais e possuem grande instabilidade na combustão (OLIVEIRA FILHO, 2006).

3 ASPECTOS CONCEITUAIS

3.1 SETOR DE TRANSPORTES E MEIO AMBIENTE

A poluição atmosférica traz danos à saúde humana e ao meio ambiente, sendo decorrente de atividades antropogênicas como queima de combustíveis fósseis para geração de energia, processos industriais, transportes, desmatamento, entre outras atividades. Além de fenômenos como chuva ácida e a inversão térmica, a poluição atmosférica pode contribuir com o chamado aquecimento global.

O aquecimento global é geralmente associado ao efeito estufa pois a intensificação do efeito estufa resulta no aquecimento global. É importante ressaltar que o efeito estufa é um fenômeno natural e fundamental para a manutenção da vida na Terra e consiste em uma camada de gases que retém o calor proveniente da energia solar, similarmente à uma estufa. Sendo assim a temperatura da Terra é mantida em condições adequadas para a sobrevivência de várias espécies no planeta.

No entanto, com a intensificação dos gases de efeito estufa (GEE) na camada de ozônio, a temperatura da Terra tem aumentado nos últimos anos. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) é o órgão das Nações Unidas que produz informações científicas sobre o tema. De acordo com o IPCC, o aquecimento global é responsável pelas mudanças climáticas e pelo aumento da temperatura média da Terra em 0,85 °C no período de 1880 a 2012.

Os principais gases responsáveis pelo efeito estufa, de acordo com EPA (2015), são:

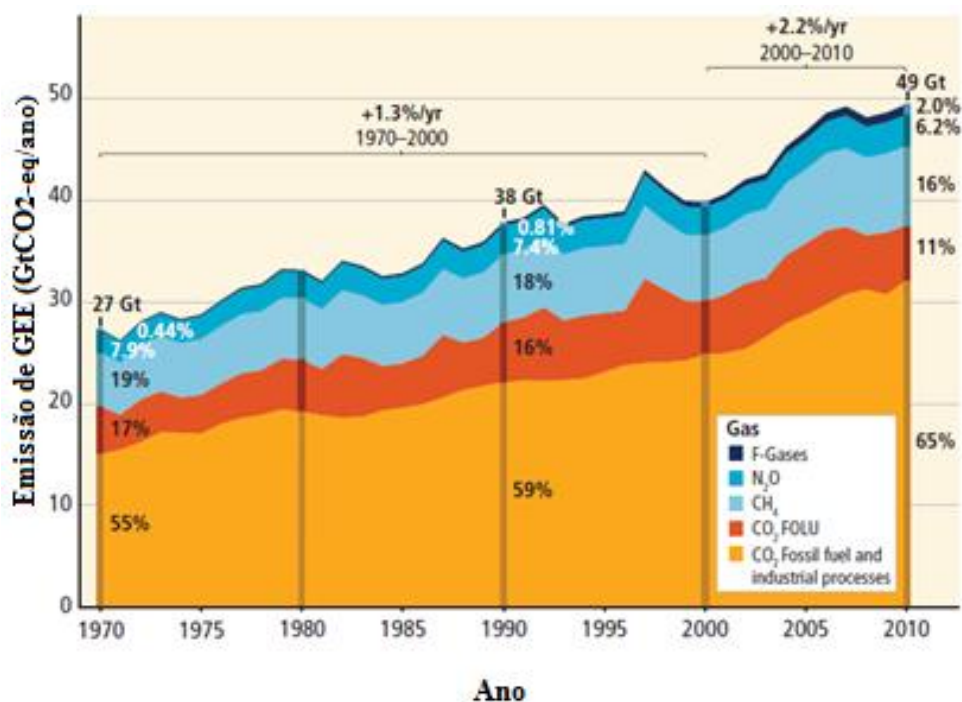
- **Dióxido de Carbono (CO₂)** – proveniente da queima de combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural, carvão mineral, sendo estas fontes primárias de CO₂ e o desmatamento que é também significativa fonte de emissão de CO₂;
- **Metano (CH₄)** – proveniente de atividades agrícolas, gestão de resíduos, produção e transporte de gás e petróleo, processos digestivos de ruminantes;
- **Óxido nitroso (N₂O)** – provenientes de atividades agrícolas, como uso de fertilizantes;

- **Clorofluorcarbonos (CFCs)** – proveniente dos processos industriais, refrigeração e o uso de produtos que possuem tais gases que inclui hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6).

Atualmente, as pesquisas apontam o dióxido de carbono como o principal gás que contribui para o aquecimento global pois representa mais de 70% das emissões de GEE e seu tempo de permanência na camada de ozônio é de no mínimo cem anos. Apesar da quantidade de CH_4 emitida na atmosfera ser bem menor, o seu potencial de aquecimento é de cerca de vinte vezes superior ao do dióxido de carbono. Já o N_2O e CFCs, possuem poder de retenção de calor aproximadamente 310 a 7100 vezes maior do que o CO_2 .

A Figura 3.1 mostra os principais GEE produzidos por atividades antropogênicas no mundo para o período de 1970 a 2010.

Figura 3.1 – Total anual mundial de emissão dos GEE no período de 1970 a 2010.



Nota: FOLU do inglês *Forestry and Other Land Use*, significa Sivicultura e outros usos do solo.

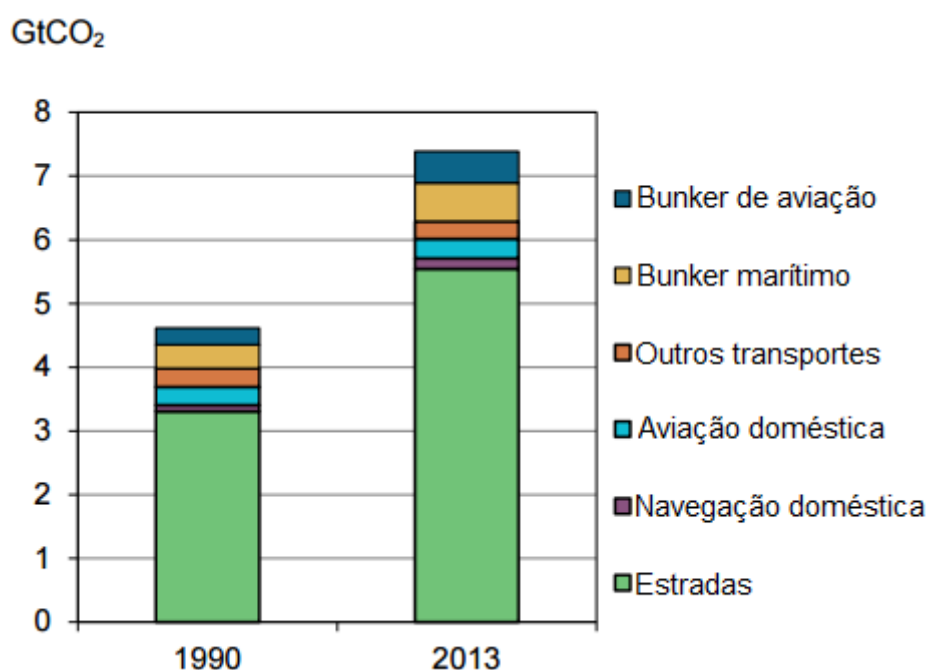
Fonte: Traduzido de (IPCC, 2014).

Segundo dados da IEA STATISTICS (2014), os setores de geração de energia elétrica e transportes correspondiam, no ano de 2012, à aproximadamente dois terços da emissão

global de CO₂. Do total das emissões 42% eram devido ao setor de geração de calor e energia elétrica e 23% eram atribuídos ao setor de transportes.

O setor de transportes, objeto de estudo deste trabalho, teve o aumento das emissões de CO₂ devido aos veículos automotivos utilizados em estradas (carros, ônibus, caminhões e minivans). A Figura 3.2, ilustra esse aumento representado pela parcela “Estradas”.

Figura 3.2 – Emissão de CO₂ do setor de transportes em 2013 comparado à 1990.



Fonte: Traduzido de (STATISTICS, 2015).

Dessa maneira justifica-se a grande preocupação ambiental, que impulsionou o setor de transportes a buscar alternativas aos combustíveis tradicionais, visando diminuir assim as emissões de GEE e principalmente de CO₂. Alguns avanços nesse sentido já podem ser vistas no setor, como por exemplo: veículos *flex* (movidos a álcool e outro combustível), movidos a biocombustíveis, eletricidade e hidrogênio (célula de combustível).

O gás natural é uma alternativa interessante para a substituição em veículos movidos a gasolina ou diesel já presentes no mercado. Pois além de possuir baixa presença de poluentes tóxicos e cancerígenos, emite pouco ou nenhum tipo de MP como cinza e fuligem.

Ao final de 2013, o Estado de São Paulo possuía 40% da frota automotiva brasileira com um total de aproximadamente 14,8 milhões de veículos. No referido ano, de acordo com

Relatório de Emissões Veiculares da CETESB, foram emitidas no Estado um total de 423 mil toneladas de monóxido de carbono (CO), 192 mil toneladas de NO_x, 72 mil de hidrocarbonetos não metânicos (HCNM) e 5,4 mil toneladas de MP.

A Tabela 3.1 mostra qual seria a taxa de redução aproximada nas emissões, caso um veículo leve movido a gasolina fosse substituído por um veículo leve a gás natural e qual impacto isso teria para a frota do Estado de São Paulo.

Tabela 3.1 – Redução da emissão de poluentes com a substituição da gasolina por gás natural.

	Redução das Emissões¹ (%)	Redução das Emissões² – Frota do Estado de SP (mil toneladas)
CO	90 - 97	380,70 - 410,30
CO₂	25	105,75
NO_x	35 - 60	67,20 - 115,20
HCNM	50 - 75	36,00 - 54,00

Fonte: Adaptado de (PALMER; HILL; VON EINEM, 2010)¹ e (CETESB, 2015)².

Com a diminuição dos níveis de poluentes no ar atmosférico, tem-se uma melhoria da qualidade do ar nas cidades e conseqüentemente diminuição dos problemas de saúde provenientes de emissões tóxicas. Dessa forma, a população pode usufruir de uma melhor qualidade de vida e o meio ambiente sofrerá menos com os impactos negativos das emissões de poluentes atmosféricos.

De forma resumida, justifica-se o uso de gás natural como combustível veicular pelas seguintes motivações:

- **Ambiental** – o gás natural se comparado com outros combustíveis fósseis proporciona uma redução na emissão de poluentes, conforme mencionado na Tabela 3.1;
- **Preço** – grande diferencial em relação ao petróleo e outros combustíveis, um exemplo com base em uma quilometragem diária de 250 km, pode ser visto na Tabela 3.2 a seguir;

Tabela 3.2 – Vantagem econômica do uso de GNV em veículos leves.

	Consumo	Custo	Gasto/dia (R\$)	Custo/km (R\$)	Gasto em 25 dias (R\$)	Economia com o uso de GNV (R\$)
GNV	18 m ³	R\$ 1,91/m ³	34,38	0,14	859,50	-
Álcool	31 l	R\$ 2,59/l	80,29	0,32	2.007,25	1.147,75
Gasolina	28 l	R\$ 3,51/l	98,28	0,39	2.457,00	1.597,50

Fonte: (Levantamento de preços ANP – Dezembro/15).

- **Segurança** – o gás natural é menos denso que o ar e em caso de vazamentos, o gás dissipa-se diminuindo os riscos de explosões e incêndios. Além disso o gás natural se inflama a temperaturas superiores a 620 °C;
- **Potencial de crescimento do gás natural** – com os investimentos empreendidos nas reservas recém descobertas de pré-sal e um maior investimento na malha de distribuição já existente poder-se-ia aumentar o uso de gás no setor de transportes no Brasil.

3.2 ÔNIBUS MOVIDOS A GNV

O Gás Natural Veicular (GNV) é o gás natural utilizado em veículo automotores. É o mesmo gás utilizado em setores como indústria, comércio e residências, porém armazenado e transportado sob alta pressão em cilindros especiais. É importante destacar que o GNV é diferente do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP ou conhecido como gás de botijão).

As diferenças entre o GNV e o GLP vão desde sua composição (o GLP composto por propano e butano e GNV composto basicamente por metano) até sua armazenagem (GLP é armazenado a baixa pressões e na forma líquida, enquanto o GNV é transportado sob pressões de 200 bar). Segundo Resolução ANP N° 15 de 18/05/05 o uso de GLP para fins automotivos é proibido (COMGÁS, 2013).

Os ônibus urbanos movidos a gás natural geralmente utilizam GNC como combustível e essa tecnologia já faz parte de mercados com legislação ambiental exigentes, como países da Europa e EUA.

Em alguns países, o GNV é mais utilizado no transporte coletivo que nos veículos leves pois as distâncias que os ônibus urbanos percorrem não variam muito e possibilitam que a autonomia do veículo seja bem utilizada. Nos ônibus, os cilindros de estocagem para GNC e GNL (considerados GNV) são frequentemente instalados na parte superior do ônibus permitindo que o peso seja distribuído igualmente pelo chassis.

Os ônibus GNV podem ser classificados de diferentes formas, de acordo com: o processo tecnológico de manufatura (podendo ser com os equipamentos originais de fábrica¹⁰ ou convertidos para operar com GNV); o sistema de combustível (dedicado ao GNV, *dual-fuel* e bicomcombustível); a tecnologia do motor (estequiométrico ou *lean-burn*) e o estado físico do gás natural (comprimido ou liquefeito).

A eficiência energética de motores a GNV são praticamente as mesmas que dos motores a gasolina nos veículos recentes. No entanto, a eficiência energética dos motores a gás se torna inferior quando comparada aos motores diesel existentes, os quais são mais modernos.

Ao contrário de países como EUA, Argentina, Itália e outros, as experiências brasileiras do uso de GNV no transporte público não foram de modo geral bem sucedidas. Silva (2006) atribui o insucesso brasileiro com o uso de GNV no transporte público às seguintes causas:

- **Custo de aquisição e revenda dos ônibus a GNC** – os ônibus GNC são mais caros que os veículos diesel equivalentes e a revenda destes depende da existência de uma malha de distribuição eficiente no município, pois caso contrário, não se garante uma boa aceitação do produto;
- **Custo e tempo de abastecimento** – os custos da infraestrutura de abastecimento são mais elevados do que as de veículos diesel, além disso o tempo de abastecimento é maior (em média 15 minutos contra 5 minutos para os veículos diesel);
- **Adaptação das garagens** – como o gás natural é mais leve do que o ar, nos ambientes fechados faz-se necessário a instalação de sensores para detecção da concentração de metano, evitando riscos de explosão;
- **Custos de operação** – dependem do bom treinamento dos motoristas, pois estes normalmente estão acostumados à resposta do motor diesel, verifica-se que a

¹⁰ Também conhecido como veículo *Original Equipment Manufacturer* (OEM).

condução correta do veículo a GNV proporciona aproximadamente 25% de redução no consumo de combustível;

- **Custos de manutenção** – os custos variam de acordo com as empresas, nos EUA por exemplo a manutenção de um ônibus GNC é em média 40% mais onerosa que a de um ônibus a diesel;
- **Autonomia**¹¹ – um ônibus GNC possui menor autonomia que um ônibus a diesel, sendo sua autonomia média 400 km e nos veículos a diesel esse valor é de 700 km.

3.3 MANUFATURA DE ÔNIBUS NO BRASIL

O processo de manufatura dos ônibus no Brasil, difere da manufatura em alguns países, pois utiliza a segmentação da manufatura entre os fabricantes de chassis e carrocerias. Na Alemanha, por exemplo, as montadoras são responsáveis pela fabricação do veículo completo.

Os fabricantes de chassis produzem a plataforma de sustentação e o sistema motriz. Enquanto as encarroçadoras produzem a carroceria e fazem a montagem final do veículo¹².

No Brasil, os seis principais fabricantes de chassis de ônibus são: Agrale, Iveco Brasil, MAN Latin America, Mercedes-Benz do Brasil (MBB), Scania Brasil e Volvo América Latina. Sendo que a maior parte deste mercado é dominado pela MBB e MAN, que segundo Sinfreca (2011a), em 2011 as duas empresas juntas possuíam 75% do mercado nacional de chassis.

Na Figura 3.3 tem-se um chassi da Mercedes-Benz de um ônibus superarticulado com capacidade para grande volume de passageiros.

¹¹ A autonomia de um veículo é a distância em quilômetros que consegue percorrer com o tanque de combustível cheio até precisar reabastecer (GRAUS, 2015).

¹² Essa divisão na fabricação de ônibus (fabricantes de chassis e montadoras de carrocerias) foi introduzida em 1996 pela Mercedes-Benz do Brasil que desativou a montagem do ônibus por completo, de forma a focar no desenvolvimento de chassis e plataformas (BERNARDES, 2002).

Figura 3.3 – Chassi modelo *O500 UDA* fabricado pela Mercedes-Benz.



Fonte: (MERCEDES-BENZ, 2015).

Quanto às encarroçadoras, as sete principais no mercado brasileiro são: Caio Induscar, Marcopolo (Ciferal-Mondeo-Volare), Neobus, Comil, Busscar, Irizar e Mascarello. As montadoras de carrocerias, além de atender ao mercado interno, tem forte atuação no mercado internacional exportando seus produtos e com fábricas instaladas em outros países.

No período de janeiro a setembro de 2015, segundo dados da Fabus (2006), a maior parte dos modelos de ônibus encarroçados foi do tipo urbano (55,54% do total), seguido dos rodoviários (24,6%), micro-ônibus (13,21%) e intermunicipais (6,65%). A Figura 3.4 mostra um chassi da MBB numa carroceria produzida pela montadora Caio Induscar.

Figura 3.4 – Ônibus *Millenium BRT* superarticulado fabricado pela Caio Induscar.



Fonte: (MERCEDES-BENZ, 2015).

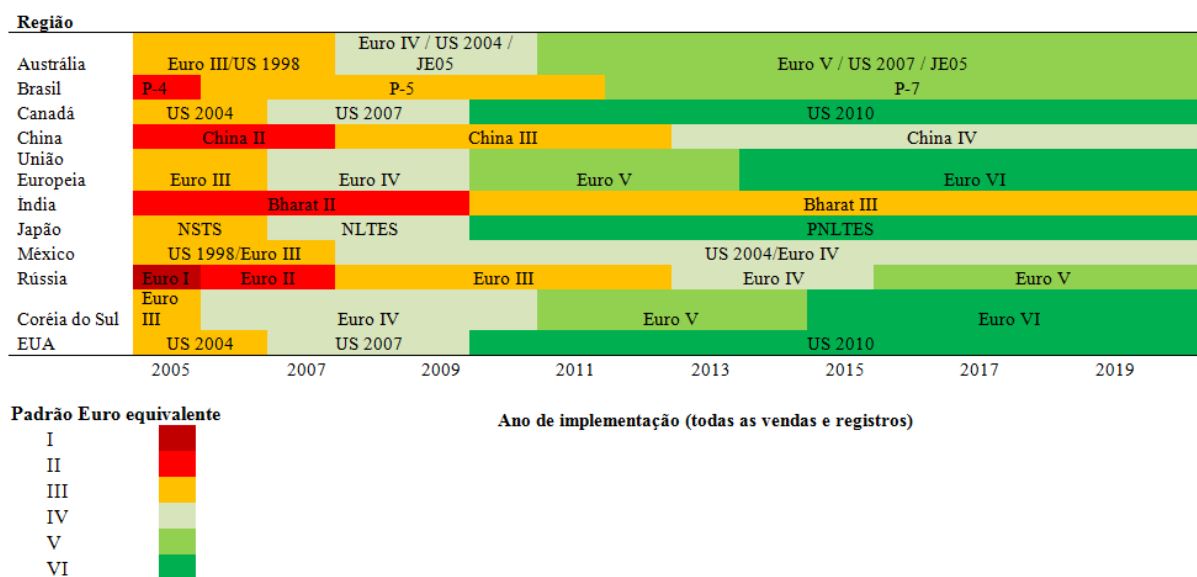
3.4 NORMAS PARA O CONTROLE DE EMISSÕES EM VEÍCULOS PESADOS

Nos últimos 20 anos, as autoridades reguladoras da Europa, Estados Unidos e Japão tem implementado programas de redução nas emissões de poluentes provenientes de fontes automotivas. O Brasil e outros países como China, Índia, Rússia, Coreia do Sul e Tailândia seguem o modelo europeu de certificação de emissão de poluentes em motores. O México segue o padrão norte-americano, mas recentemente tem aceitado tanto motores certificados pelas normas americanas quanto pelas normas europeias de emissões (WAGNER, 2014).

De acordo com o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), na resolução nº 340, classificam-se como veículos pesados: ônibus, microônibus, caminhão, caminhão-trator, trator de rodas, trator misto, chassi-plataforma, motor-casa, reboque ou semi-reboque e suas combinações. E de acordo com o EPA, entram nessa classificação veículos com massa superior à 8500 lbs (aproximadamente 3856 kg). Os veículos leves de acordo com o EPA são todos com massa inferior a este valor.

As normas para controle de emissão nos motores veiculares podem variar dependendo do país e do tipo de veículo, apresentando diferentes prazos para implementação das suas fases regulatórias. Sendo que a contar da data de aprovação, os fabricantes devem garantir que os motores e veículos produzidos obedeçam aos novos limites de emissão de poluentes estabelecidos para que os mesmos sejam homologados. As etapas de implementação para alguns países estão mostradas na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Linha do tempo dos padrões de controle de emissões nos veículos pesados em alguns países.



Fonte: Traduzido de (WAGNER, 2014).

Nesta seção são abordadas algumas das normas de controle das emissões de poluentes (normas europeias, norte-americanas e brasileiras) e uma breve comparação entre elas.

3.4.1 Norma europeia

Em 1988, foi introduzida na Europa padrões de limitação na emissão de poluentes de veículos pesados. A norma “Euro” foi implementada em 1992 e com o passar dos anos recebeu mais restrições nos valores de emissões. O padrão Euro é numerado com algarismos romanos (por exemplo, Euro I, II, ... V) para os veículos pesados e para os veículos leves são utilizados algarismos arábicos (Euro 1, 2, ... 5) (WAGNER; STAHL; OLIVARES, 2015).

Na Europa, o órgão responsável pelo cumprimento dos limites de emissões e prazos estabelecidos é a União Europeia (UE), representada pelas comissões, parlamento, conselho e estados membros. Atualmente, a norma europeia encontra-se no estágio de implementação Euro VI que entrou em vigor em 31 de dezembro de 2012.

Uma série de ensaios são feitos nos motores com intuito de verificar se os mesmos atendem aos valores-limite de emissões de poluentes. Os testes europeus expressam a emissão

de poluentes em termos de gramas por quilowatt-hora (g/kWh). Não é utilizada a emissão de poluentes por quilômetro pois devido as diferenças de tamanho e consumo de combustível dos veículos, seria necessário diferentes padrões para cada categoria de veículo pesado.

O padrão Euro I foi introduzido em 1992, seguido das regulações Euro II em 1996. Foram aplicados tanto para caminhões quanto ônibus urbanos, no entanto a adequação dos ônibus urbanos foi facultativa.

Em 1999, a UE adotou a Diretiva 1999/96/EC que introduzia no ano seguinte o Euro III bem como os próximos padrões Euro IV/V (2005/2008). A Diretiva fixava valores-limite de emissão facultativos aos veículos ecológicos avançados (VEA).

E alguns adendos aos padrões anteriores foram estabelecidos:

- Dispositivos manipuladores – em 2001, a Diretiva 2001/27/EC estabelecia novos ciclos de ensaio para emissões e prescrições para evitar a utilização de dispositivos manipuladores e/ou estratégias manipuladoras no controle das emissões. Isso se referia a estratégias que poderiam prejudicar os controles de emissão quando os veículos operassem em condições normais quando comparados aos níveis de emissão durante o ensaio;
- Alteração Euro IV e V – em 2005, a Diretiva 2005/55/EC além de reafirmar os limites de emissões estabelecidos em 1999, introduz parâmetros de durabilidade (considera-se o tempo de utilização e a quilometragem dos veículos) e o sistema de diagnóstico a bordo (OBD¹³) como equipamento obrigatório (para controlar as emissões gasosas durante o funcionamento).

Em 2009, foi iniciada a fase Euro VI por meio da Regulação N° 595/2009 do Parlamento Europeu. Os novos limites de emissões, com o rigor equiparado ao da norma norte-americana US 2010, entrou em vigor em 2013 para novos veículos homologados e mais considerações foram incluídas como por exemplo:

¹³*On-Board Diagnostic* (OBD) ou “Sistema de diagnóstico a bordo” e designa um sistema instalado a bordo do veículo, que detecta problemas no funcionamento e indica por meio de um sistema de alerta de anormalidades.

- O valor limite das emissões de NO₂ devem ser especificados para além do valor-limite das emissões de NO_x total (que além de NO₂ incluem NO), isso sem diminuir a proteção ambiental já conquistada. O limite para as emissões de NO₂ deve ser estabelecido de forma a corresponder às tecnologias já existentes;
- Realização de novos testes para emissões “fora de ciclo” e ensaios de conformidade dos veículos pesados em circulação.
- O teste *World Harmonized Stationary Cycle* (WHSC) estabelece o limite do número de partículas por quilowatt-hora para motores a diesel e este valor é de 6.10¹¹ a 8.10¹¹. Este limite ainda não é aplicado para motores a gás e devem ser definidos futuramente.

Neste contexto, a redução das emissões dos veículos pesados é tratada como parte de uma estratégia global. As normas Euro VI foram concebidas para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos, tais como materiais particulados, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos, já detalhados anteriormente.

Ao estabelecer tais normas, a comunidade europeia entende que é preciso oferecer incentivos financeiros à inovação visto que este esforço resultará na melhoria da qualidade do ar, na redução das despesas com a saúde e de uma maior expectativa de vida para sua população.

A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos valores-limite para as emissões estabelecidas por cada uma das fases do padrão Euro nos veículos diesel.

Tabela 3.3 – Norma europeia de emissões para veículos pesados diesel detalhados em g/kWh.

Estágio	Data	Teste	CO	HC	NO _x	MP	Fumaça
Euro I	1992 (< 85 kW)	R-49	4,50	1,10	8,00	0,61	-
	1992 (> 85 kW)		4,50	1,10	8,00	0,36	-
Euro II	Outubro 1996		4,00	1,10	7,00	0,25	-
	Outubro 1998		4,00	1,10	7,00	0,15	-
Euro III	Voluntário VEA (Outubro 1999 a Janeiro 2013)	ESC & ELR	1,50	0,25	2,00	0,02	0,15
	Outubro 2000	ESC & ELR	2,10	0,66	5,00	0,10	0,80
Euro IV	Outubro 2005		1,50	0,46	3,50	0,02	0,50
Euro V	Outubro 2008		1,50	0,46	2,00	0,02	0,50
Euro VI	Janeiro 2013	WHSC	1,50	0,13	0,40	0,01	-

Fonte: Adaptado de (WAGNER; STAHL; OLIVARES, 2015).

A Tabela 3.4 apresenta os valores-limite para motores diesel e gás nos ensaios transientes (que serão citados adiante), sendo que a medida da concentração de metano é feita somente em motores a gás (Euro VI gás natural e GLP, e Euro III-V somente gás natural). Já a medida de materiais particulados (MP) não é aplicada nos estágios Euro III-IV para motores movidos a gás.

Tabela 3.4 – Norma europeia de emissões para veículos pesados a diesel e a gás detalhados em g/kWh.

Estágio	Data	Teste	CO	HCNM	CH₄	NO_x	MP
Euro III	Voluntário VEA (Outubro 1999 a Janeiro 2013)	ETC	3,0	0,40	0,65	2,0	0,02
	Outubro 2000	ETC	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16
Euro IV	Outubro 2005		4,0	0,55	1,1	3,5	0,03
Euro V	Outubro 2008		4,0	0,55	1,1	2,0	0,03
Euro VI	Janeiro 2013	WHTC	4,0	0,16	0,5	0,46	0,01

Fonte: Adaptado de (WAGNER; STAHL; OLIVARES, 2015).

Os testes descritos na Tabela 3.3 são realizados com a finalidade de medir gases como monóxido de carbono, hidrocarbonetos não-metânicos, óxidos de nitrogênio e material particulado no gás de escapamento de motores de veículos pesados a diesel. No caso dos motores a gás (Tabela 3.4) é medido, além dos gases citados anteriormente, o metano.

Os testes para a determinação de emissões de gases poluentes por veículos pesados foram estabelecidos a partir da Diretiva Europeia 96/1999. Sendo estes divididos em dois tipos, os estacionários (ESC e ELR) e os transientes (ETC e WHTC).

O teste estacionário ECE R-49 foi substituído a partir do estágio Euro III pelos testes denominados Ciclo Europeu em Regime Constante (ESC) e Ciclo Europeu em Regime Transiente (ETC). Há ainda um teste que mede a opacidade¹⁴ da fumaça sendo denominado Ciclo Europeu de Resposta em Carga (ELR).

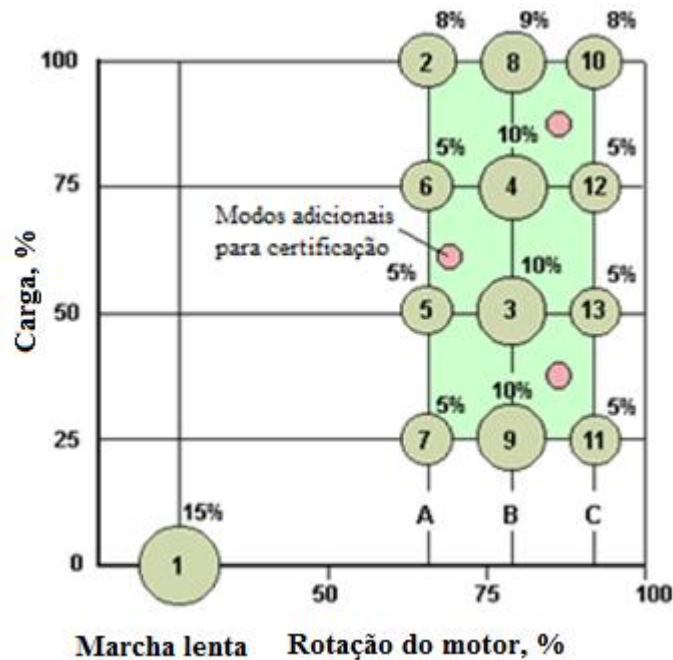
¹⁴ Também conhecido como índice de enegrecimento da fumaça e sua medição é feita por meio de um opacímetro. As formas de indicação da opacidade podem ser: N – porcentagem de enegrecimento (%) ou K – coeficiente de absorção de luz (m⁻¹). De acordo com a Resolução CONAMA os limites máximos de opacidade são 2,1 m⁻¹ (TECCOM TECNOLOGIA EM COMBUSTÃO, 2015).

A partir do Euro VI as emissões passaram a ser testadas pelo Ciclo Transiente a nível mundial (WHTC e WHSC), os quais são similares ao ETC e ESC, e criados para simular as condições de condução na UE, EUA, Japão e Austrália.

Segundo a Diretiva Europeia 96/1999, os ensaios para determinação de emissões de poluentes, são feitos com o motor montado em uma bancada de ensaios e ligado a um dinamômetro. As medições em cada um dos ensaios é feita conforme detalhado abaixo:

- **ESC** – consiste num ciclo de ensaio com treze modos de operação em regime permanente (ou estacionário). Os modos são estabelecidos de acordo com velocidade e potência do funcionamento típico de um motor diesel, examinam-se as quantidades de emissões (em g/kWh) retirando amostras dos gases de escape e determinando as concentrações ponderadas dos mesmos. Uma amostra é recolhida em filtros adequados, durante o procedimento completo, calculando-se a massa em gramas de cada poluente emitida por kWh. Além disso, mede-se a concentração de NO_x em três pontos de controle numa zona selecionada pela equipe técnica e os valores medidos são comparados aos calculados nos modos selecionados. Essa verificação da concentração de NO_x assegura a eficácia do controle de emissões no funcionamento típico do motor (PARLAMENTO EUROPEU, 1999). Este tipo de teste caracteriza-se por alto fator médio de carga e altas temperaturas nos gases de exaustão. A Figura 3.6 ilustra o carregamento médio do motor em função da velocidade e os treze modos estabelecidos para o ensaio ESC, o valor percentual acima de cada modo indica o fator de carga correspondente nos mesmos;

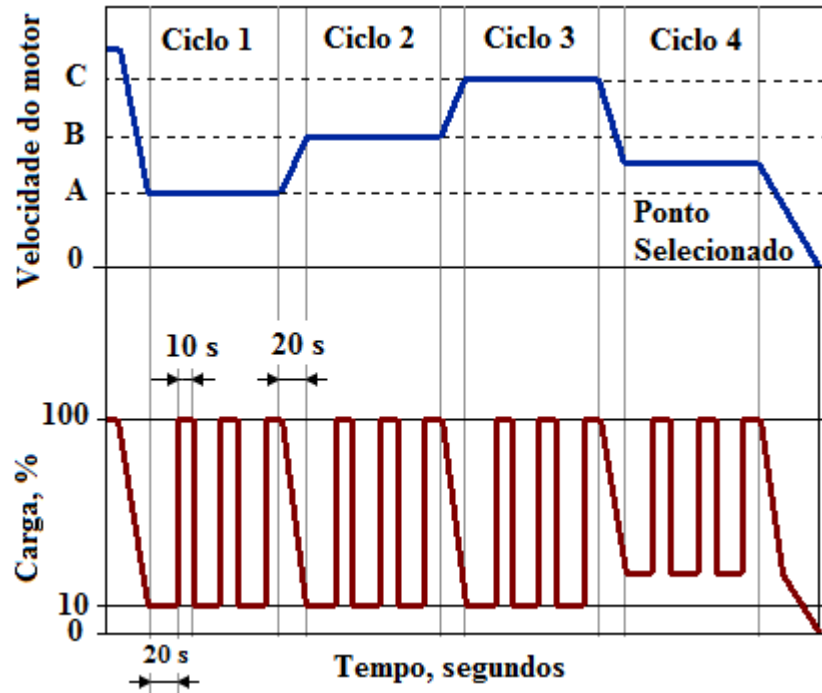
Figura 3.6 – Caracterização dos modos para ensaio do ciclo ESC.



Fonte: Traduzido de (FOUKES, 2013b).

- **ELR** - consiste numa seqüência de quatro patamares a diferentes velocidades, para determinação da opacidade da emissão de escapamento e são feitas simultaneamente ao ensaio ESC. Este ensaio utiliza um opacímetro para determinação da fumaça e consiste em submeter o motor a velocidade constante e carga crescente de 10 a 100% para três velocidades diferentes. O quarto patamar de carga é selecionado pela equipe técnica, sendo comparado aos valores dos patamares de carga anteriores. A medida dos valores de fumaça são amostrados em uma frequência de pelo menos 20 Hz. Por meio de um algoritmo de cálculo de médias determina-se também o pico da emissão de fumaça (PARLAMENTO EUROPEU, 1999). A Figura 3.7 mostra a seqüência de operação do dinamômetro e as velocidades A, B e C ilustradas no ESC. Observa-se também pela Figura 3.7 o ponto selecionado para confirmação das medições.

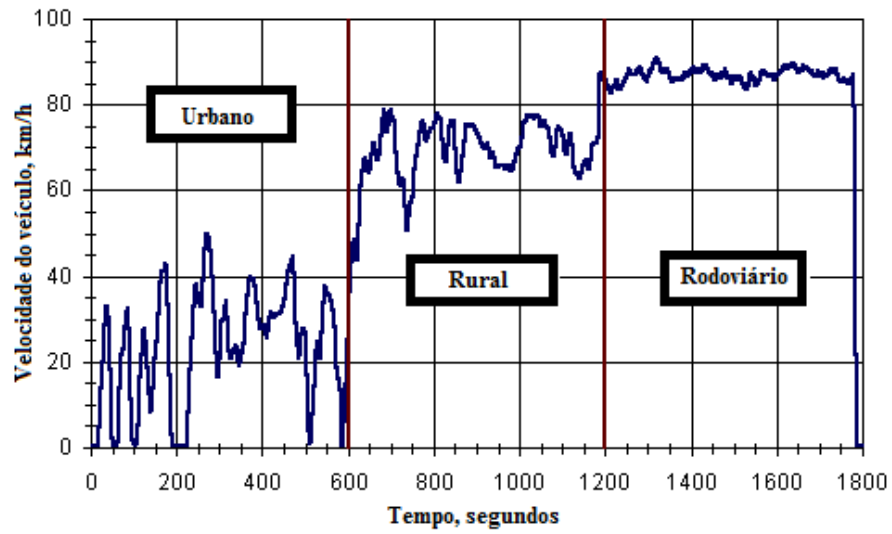
Figura 3.7 – Caracterização dos patamares para ensaio do ciclo ELR.



Fonte: Traduzido de (FOUKES, 2013a).

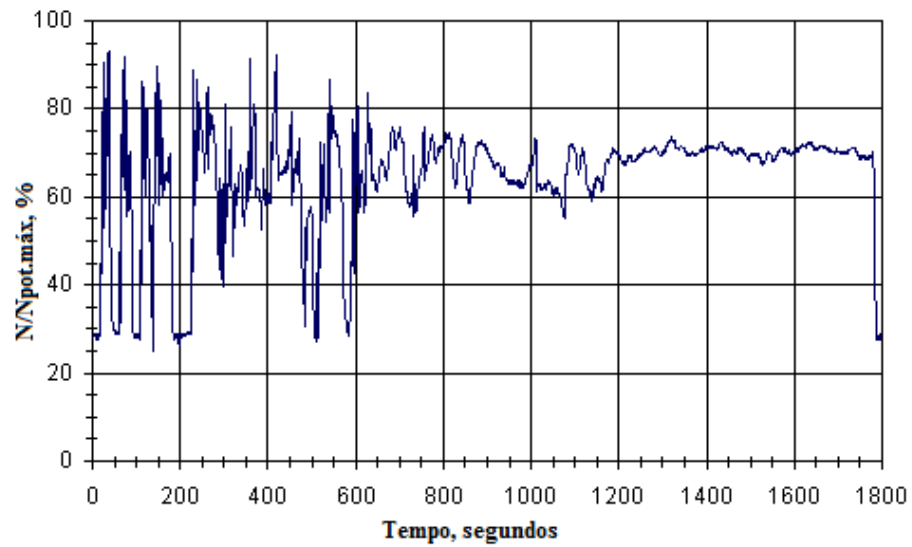
- **ETC** - consiste numa sequência de mil e oitocentos modos transientes, segundo a segundo, simulando as condições reais de uso. Dependerá das condições de condução a qual o motor será submetido, incluindo a condução urbana (velocidade máxima de 50 km/h), rural (velocidade média de 72 km/h) e rodoviário (velocidade média de 88 km/h). Utiliza-se os sinais de retroação do binário e da velocidade do motor medida pela dinamômetro para integrar a potência em relação ao tempo de ciclo, obtendo assim o trabalho do motor. Nesse ensaio são determinadas as concentrações de NO_x e dos HCs no ciclo, por meio da integração do sinal no analisador. As concentrações de CO, CO_2 e dos HCNM podem ser determinadas por integração do sinal do analisador ou pelo recolhimento de amostras. Quanto às partículas, usando filtros adequados faz-se a recolha de amostras. De posse do caudal dos gases de escape diluídos ao longo do ciclo, calcula-se os valores das emissões mássicas dos poluentes. Esses valores são relacionados com o trabalho do motor obtendo-se a massa de cada poluente emitida por kWh (PARLAMENTO EUROPEU, 1999). A Figura 3.8 mostra o teste ETC realizado de acordo com a velocidade dos veículos. Os gráficos transientes da velocidade e torque do motor são mostrados nas Figuras 3.9 e 3.10, respectivamente.

Figura 3.8 – Velocidade do veículo para diferentes trechos, ciclo de testes ETC.



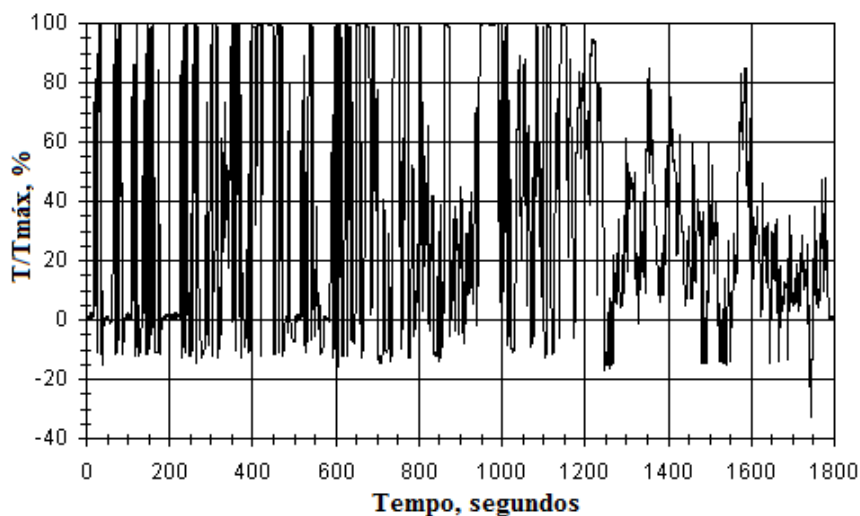
Fonte: Traduzido de (FOUKES, 2013c).

Figura 3.9 – Velocidade do motor em função do tempo no ciclo de teste ETC.



Fonte: Traduzido de (FOUKES, 2013c).

Figura 3.10 – Torque do motor em função do tempo no ciclo de teste ETC.



Fonte: Traduzido de (FOUKES, 2013c).

3.4.2 Norma norte-americana

Nos EUA, a regulação federal das emissões de poluentes para os veículos pesados tiveram início em 1970. No entanto, as primeiras ações norte-americanas visando a melhoria da qualidade do ar iniciaram em 1955 com o Ato de Controle da Poluição Atmosférica e com o conhecido *Clean Air Act* (CAA) em 1963. As ações concretas para a implementação de valores-limite de emissões mais restritivos começaram em 1998 e 2004.

As emissões por veículos pesados nos Estados Unidos são reguladas pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), com exceção da Califórnia que possui padrões próprios de regulação. Atualmente, a fase de implementação do controle de poluentes nos EUA é a chamada “US 2010”.

O valor-limite nas emissões é expresso em termos de gramas por bhp-hora (g/bhp-hr), em que a unidade bhp refere-se a “brake-horsepower”, mais conhecida como HP, no entanto para as emissões é chamado de bhp. O bhp é equivalente a 0,746 kW. Os valores limites das emissões aplicados para os anos-modelo 1988-2003 para veículos pesados e ônibus nos EUA são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores-limite de emissão para veículos pesados nos EUA em g/bhp-hr.

Ano	HC	CO	NO _x	MP
Motores veículo a diesel (caminhões)				
1988	1,30	15,50	10,70	0,60
1990	1,30	15,50	6,00	0,60
1991	1,30	15,50	5,00	0,25
1994	1,30	15,50	5,00	0,10
1998	1,30	15,50	4,00	0,10
Motores de ônibus urbanos				
1991	1,30	15,50	5,00	0,25
1993	1,30	15,50	5,00	0,10
1994	1,30	15,50	5,00	0,07
1996	1,30	15,50	5,00	0,05*
1998	1,30	15,50	4,00	0,05*
* em uso MP padrão de 0,07				

Fonte: Adaptado de (MILLER; WAGNER; OLIVARES, 2014).

Em 1997, o EPA adotou um padrão para o ano modelo de 2004 cujo objetivo principal era reduzir a emissão de NO_x nas estradas devido a veículos pesados. Os fabricantes tinham a possibilidade de escolher duas opções de certificação para os motores, sendo estas mostradas na Tabela 3.6. As emissões, com exceção dos HCNM e NO_x, continuaram aos níveis estabelecidos em 1998 (Tabela 3.5).

Tabela 3.6 – EPA padrão das emissões para o ano modelo de 2004 detalhado em g/bhp-hr.

Opção	HCNM + NO _x	HCNM
1	2,40	-
2	2,50	0,50

Fonte: Adaptado de (MILLER; WAGNER; OLIVARES, 2014).

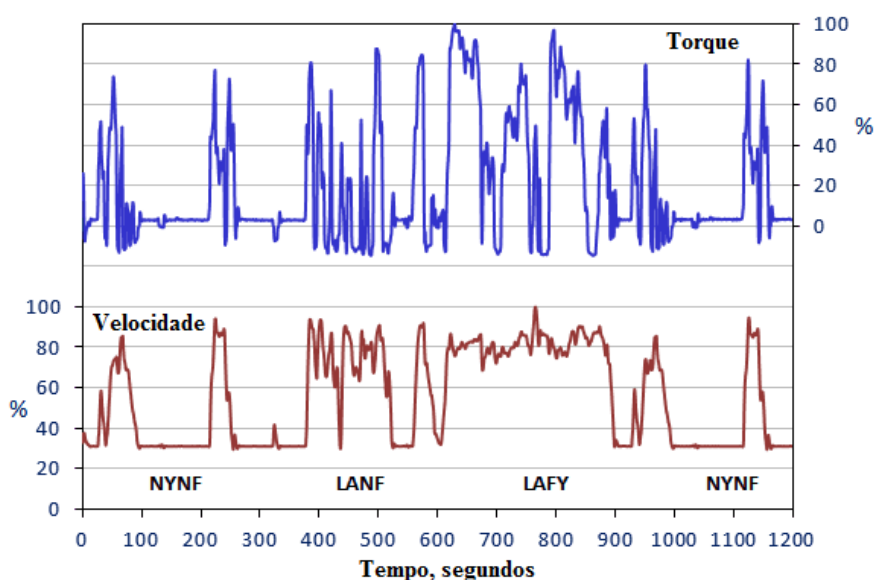
Em 2001, foram estabelecidas regulações tanto para os limites de emissão e para a composição do diesel a serem adotadas a partir do ano de 2007. Os padrões adotados e seguidos até hoje são: emissão de MP de 0,01, NO_x de 0,20 e HCNM de 0,14 expressos em g/bhp-hr.

Na fase US 2007, a tecnologia *Ultra Low Sulfur Diesel* (ULSD) teve grande contribuição na diminuição dos níveis de enxofre presentes no diesel. A tecnologia refere-se ao diesel com limites de enxofre de 15 ppm, valor muito abaixo do anterior que era 500 ppm, por esta razão recebendo o nome de ultra baixa presença de enxofre.

Os testes efetuados para a certificação de motores nos EUA são: *Federal Test Procedure* (FTP), *Supplemental Emissions Test* (SET) e *Not-To-Exceed* (NTE). Sendo estes dois últimos incluídos em 1998 como testes complementares. As medições em cada um dos ensaios são detalhadas a seguir:

- **FTP** – é um teste transiente que leva em conta a diversidade existente na condução de ônibus e caminhões nas cidades americanas. Consiste em quatro etapas: 1- *New York Non Free Way* (NYNF) fase que considera veículos urbanos com frequentes paradas, 2- *Los Angeles Non Free Way* (LANF) fase para tráfego lotado com poucas paradas, 3- *Los Angeles Freeway* (LAFY) fase que simula via expressa cheia e por último a repetição da fase 1. Segundo Faiz, Weaver e Walsh (1996), este teste realizado nos motores de ônibus podem subestimar as emissões de chassis por um fator de três a seis vezes. A Figura 3.11 ilustra a variação da velocidade e do torque em porcentagem obtidas nesse ensaio.

Figura 3.11 – Teste FTP considerando o torque e a velocidade do motor.



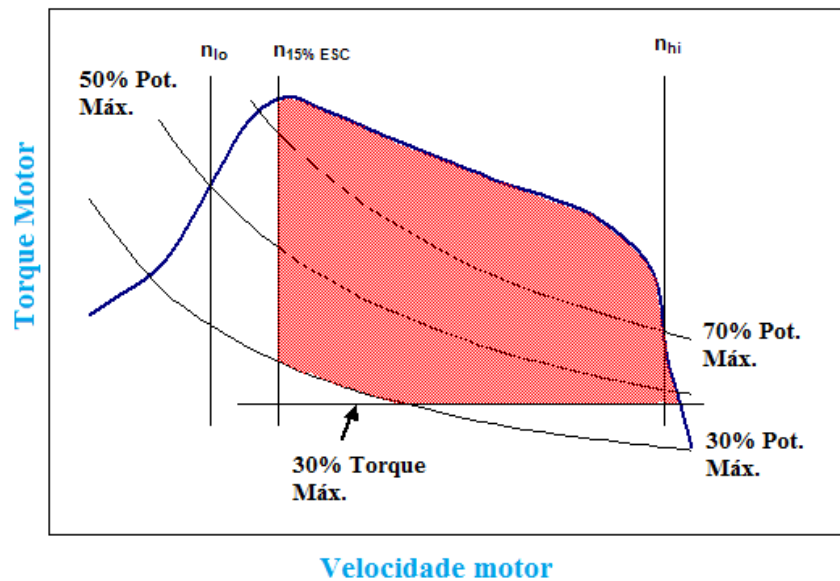
Fonte: Traduzido de (MAJEWSKI; OLIVARES; FOUKES, 2013).

A velocidade média é de 30 km/h e os quilômetros rodados são de 10,3 km para o tempo de 1200 s. O fator de carga médio para o ensaio FTP é de no máximo 20 – 25%. Os veículos pesados testados com este ensaio produzem gases de exaustão com temperaturas de 250 °C podendo chegar a 450 °C.

- **SET** – é um teste de regime estacionário contendo treze modos e utilizando um dinamômetro. Existem duas versões do teste, uma com modo cíclico de duas rampas (RMC) e outra modo cíclico discreto (DMC). O DMC utilizado no ensaio SET é equivalente ao teste europeu ESC. O RMC, até o ano de 2010, continha os mesmos modos de operação do ESC, mas a ordem e a transição dos modos era diferente. A partir do referido ano, o RMC foi alterado para operar com os modos na mesma ordem do ESC, diferenciando somente as transições. Os limites de emissão deste teste são numericamente iguais ao FTP.

- **NTE** – este teste não envolve um ciclo de condução específico ou uma duração e quilometragem específicas. Envolve qualquer tipo de condução que ocorra dentro da zona de controle do NTE, tanto estado estacionário como transiente. As emissões são calculadas para um tempo mínimo de 30 segundos e em seguida faz-se uma comparação com os limites aplicáveis do NTE. A zona NTE é mostrada na Figura 3.12, sendo normalmente uma região elíptica ou retangular. O teste exige que o motor não opere mais que 5% do tempo fora dessa região e os limites de emissão para este teste são maiores que os do FTP.

Figura 3.12 – Zona do teste NTE considerando o torque e a velocidade do motor.



Fonte: Traduzido de (OLIVARES, 2013).

3.4.3 Norma brasileira

Em 1986, o Brasil implementou por meio da Resolução CONAMA 18/1986 um Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), e este segue o padrão europeu de controle de emissões de veículos pesados, tanto nos valores-limite das emissões quanto nos testes cíclicos de certificação.

Da mesma maneira que a norma europeia, o programa visa reduzir gradativamente o nível de poluentes emitidos pelos novos veículos. Cada fase, a indústria automobilística deve desenvolver tecnologias capazes de atender tais normas.

A norma recebe a denominação “P” para os veículos pesados e “L” para os veículos leves, sendo utilizados algarismos arábicos em sua numeração. No Brasil, o órgão responsável pelo cumprimento dos limites de emissões e prazos estabelecidos é o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), uma autarquia federal vinculada ao Ministério do Meio Ambiente. Atualmente, a norma brasileira encontra-se no estágio de implementação P-7, a qual entrou em vigor em 2012.

A Figura 3.13 mostra a correlação entre os estágios da norma Euro e seu correspondente no programa brasileiro. Observa-se uma defasagem da norma brasileira em relação à

européia. Ressalta-se ainda que a fase P-6 não foi implementada devido a tecnologia ULSD não estar disponível no Brasil e portanto o P-5 continuou até 2011 quando foi substituída por pela fase P-7.

Figura 3.13 – Equivalência entre as normas de emissões europeias e brasileiras.



Fonte: (MAN LATIN AMERICA, 2015).

A Tabela 3.7 apresenta um resumo dos valores-limite para as emissões estabelecidas de acordo com os tipos de testes (ESC/ ELR e ETC), para o estágio P-7. É importante ressaltar que motores a gás são ensaiados apenas no ciclo ETC e o limite de CH₄ é válido somente para os motores a gás (seja GNV ou GLP). Lembrando que os motores a gás não são submetidos ao limite de materiais particulados (MP).

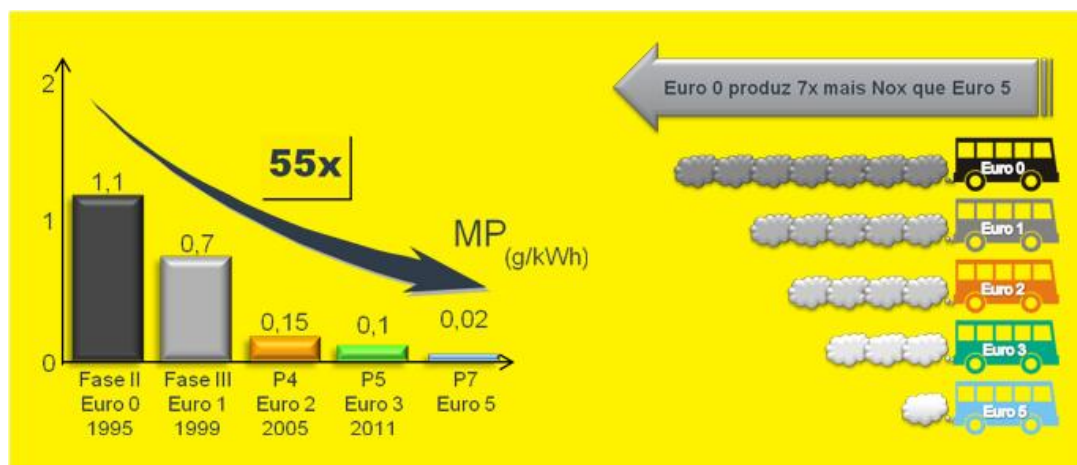
Tabela 3.7 – Limites de emissão para a norma P-7 expressos em g/kWh.

	NO _x	HC	CO	CH ₄	MP	HCNM	Opacidade (m ⁻¹)
Ensaio ESC/ELR	2,00	0,46	1,50	-	0,02	-	0,50
Ensaio ETC	2,00	-	4,00	1,10	0,03	0,55	-

Fonte: Adaptado de (CONAMA, 2008).

A adoção de normas restritivas a emissão de poluentes por fontes veiculares contribui para que a poluição atmosférica seja menor. Um veículo que segue o padrão P-7 emite sete vezes menos NO_x e 55 vezes menos material particulado que um veículo regulamentado pelo P-2 (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Diminuição da emissão de poluentes com a evolução do Proconve.



Fonte: (MAN LATIN AMERICA, 2015).

3.4.4 Comparativo entre as normas de emissão brasileira e norte-americana

Nesta seção, serão comparadas as normas de emissão brasileiras com as norte-americanas. É importante destacar que as normas brasileiras foram derivadas das europeias.

As normas brasileiras e americanas não são comparáveis diretamente, a razão para isso é que existem diferenças nos procedimentos de teste e aprovação dos veículos.

Quanto ao processo de aprovação dos veículos, a norma brasileira aplica os valores-limite de emissões durante a produção dos veículos (conformidade de produção), sendo que após deixar a fábrica o veículo não tem continuidade de monitoramento das emissões por parte do fabricante. Já nos EUA são feitos testes de vigilância, sistema obrigatório de garantia para as emissões, campanhas de *recall* entre outras não existentes no sistema brasileiro ou europeu (CANIS; LATTANZIO, 2014).

Quanto aos procedimentos de teste dos motores, uma diferença fundamental é que o ciclo de condução com os quais o motor é submetido para analisar e coletar os gases de escape. O ciclo europeu (utilizado nos testes brasileiros) difere do procedimento utilizado pelos EUA em variáveis como distância, duração e velocidade, além de fatores como se o motor inicia o ciclo aquecido ou frio (CANIS; LATTANZIO, 2014).

Além disso existe a diferença nas unidades utilizada para mensurar os valores-limite de emissões. Para a norma brasileira, este valor é expresso em g/kWh enquanto para a norte-americana utiliza-se a unidade g/bhp-hr (sendo 1 bhp equivalente a 0,746 kW).

Uma outra diferença é que as fases estabelecidas pelo PROCONVE para os veículos pesados são claras e bem definidas, o que não ocorre com as normas norte-americanas. A começar pelo nome adotado, alguns autores chamam a norma de US 2007, podendo haver no mesmo texto a mesma norma sendo chamada de US07 ou ainda Norma do ano modelo de 2007. Isso dificulta a clareza das informações e a identificação das fases de implementação da mesma.

Para a determinação dos limites de emissão, com exceção do teste SET da norma norte-americana que é similar ao ESC, todos os demais ensaios são diferentes para a determinação dos poluentes emitidos pelos escapamentos dos veículos. No entanto, a emissão relativa medida usando tanto o procedimento norte-americano quanto o brasileiro varia de acordo com a tecnologia de emissão dos veículos, mas o resultado dos testes em g/km¹⁵ são geralmente da mesma ordem de grandeza.

Portanto, não existe uma maneira simples de se comparar os ensaios e qual deles é o mais confiável. Por essa razão a UE vem tentando implementar os testes WHSC e WHTC que possuem um caráter mais geral podendo unificar os testes de emissões.

Quanto às fases de implementação dos valores-limite de emissões, o Brasil encontra-se atrasado em relação aos EUA. A norma americana vigente é a US 2010 que equipara-se ao Euro VI (norma europeia), no entanto o Brasil possui em vigência a norma P-7 (Euro V).

3.5 COMPARAÇÃO ENTRE O GNV E OUTROS COMBUSTÍVEIS

3.5.1 Características técnicas dos veículos GNV

Do ponto de vista energético, pode-se comparar motores a GNV com a gasolina e diesel de acordo com seu **rendimento térmico, potência e autonomia**.

¹⁵ Os testes para a obtenção de gramas de poluente emitido por quilômetro rodado é feito submetendo os ônibus a ciclos testes com dinamômetros de rolo instalados nos veículos (utilizados em testes de rua).

O rendimento térmico e a potência do motor estão diretamente relacionados às taxas de compressão dos combustíveis nos veículos. A taxa de compressão diz respeito ao volume de combustível aspirado para dentro do cilindro e em quantas vezes este foi comprimido antes que a centelha da vela de ignição iniciasse a combustão.

Quanto maior for a taxa de compressão, melhor é o aproveitamento energético que o motor faz do combustível consumido. As taxas de compressão em motores a gás natural são da ordem de 14:1 a 16:1, sendo que nos motores a gasolina é de 8:1 e nos motores a álcool é de 12:1 (GASNET, 2013b).

Os veículos de ciclo Otto movidos a gasolina ou álcool podem ser convertidos para operar a GNV e esta conversão é chamada de “Ottolisação”. Em função da limitada malha de abastecimento de GNV, os veículos mantêm as taxas de compressão dos seus motores originais podendo acarretar a subutilização das características originais do GNV e isto pode causar uma aparente perda de potência.

A baixa taxa de compressão, resulta no corte de 10 a 15% da potência entregue enquanto o motor é operado a gás natural. No caso dos veículos bicomcombustíveis (gasolina - GNV), a perda de eficiência é reduzida de 5 a 10% (PALMER; HILL; VON EINEM, 2010).

Uma solução para anular a perda de potência é a utilização de turbocompressores acoplados ao motor, no entanto, esta alternativa encarece o produto final.

Quanto aos veículos de ciclo Diesel verifica-se que não é possível a simples conversão do mesmo para operar a GNV, pois a taxa de compressão necessária para causar a auto-ignição do gás natural seria de 38:1. Dessa forma, a maioria dos motores ciclo Diesel que utilizam gás natural são do tipo *dual-fuel*.

Este tipo de motor utiliza a injeção piloto de diesel para inflamar o gás natural misturado na câmara de combustão. De acordo com Machado, Melo e Lastres (2007), dentre os benefícios dos veículos *dual-fuel* destacam-se: pequenas alterações no motor são necessárias; flexibilização na escolha do combustível (diesel puro ou diesel+gás natural), aproveitando o alto rendimento do motor diesel (que é cerca de 7% maior que do ciclo Otto) e aumentando a flexibilidade no abastecimento e revenda do veículo (que pode ser reconvertido caso repassado para uma região sem infra-estrutura de abastecimento de GNV).

Nos veículos dedicados a GNC (especialmente ônibus) utiliza-se geralmente motores do ciclo Otto cuja tecnologia já tem alcançado taxas de compressão mais elevadas (a octanagem

do gás natural é mais elevada), proporcionando um melhor rendimento, baixo nível de ruído e emissões de poluentes (PALMER; HILL; VON EINEM, 2010).

Quanto a autonomia de veículos movidos a GNV, constata-se que esta é menor que os veículos similares a gasolina e diesel. Isto ocorre pois em um tanque de mesmo tamanho, uma menor quantidade de energia pode ser armazenada utilizando o gás natural cujo estado físico ocupa maior volume. Visando o aumento da autonomia de veículos GNV são utilizados tanques extras ou o GNL, tais recursos são utilizados para veículos maiores (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2015).

O uso de GNV possui a vantagem de contribuir para o aumento da vida útil dos motores e seus componentes, visto que a combustão do mesmo produz baixa formação de resíduos. Além disso, por não contaminar o óleo lubrificante possibilita um intervalo maior de trocas de óleo (GASNET, 2013b).

De maneira geral, o uso de GNV proporciona a potência necessária para o funcionamento regular do motor tanto em marcha lenta quanto em altas solicitações de potência (altas rotações e pouca carga) ou torque (baixas rotações e muita carga). Devido suas características físicas e químicas pode ser um substituto para combustíveis como gasolina e o álcool.

3.5.2 Características ambientais dos veículos GNV

O GNV é considerado um combustível ecológico quando comparado com os convencionais gasolina e diesel. Isso porque o GNV apresenta uma combustão mais completa (liberando apenas dióxido de carbono e água) e menos emissões evaporativas em veículos automotores, que resulta diminuição de emissão de gases poluentes que degradam o meio ambiente piorando a qualidade do ar nos grandes centros urbanos.

A comparação entre os veículos deve considerar além do combustível, outros fatores contribuem para as emissões. Os veículos novos que atendem a padrões mais restritivos de emissões são mais limpos que outros de fases tecnológicas de emissões anteriores. Outro fator que deve ser levado em consideração é que o total de emissões de qualquer veículo envolve os processos que vão desde produção até a distribuição. Só então são contabilizadas a emissão de

poluentes do veículo em si e emissões indiretas como uso do solo (CANIS; PIROG; YACOBUCCI, 2014).

Ainda assim, é um consenso geral de diversos autores de que os veículos movidos a GNV reduzem significativamente a emissão de poluentes em comparação aos veículos diesel e a gasolina.

Nos ônibus dedicados a GNC produzidos em 2004, de acordo com Palmer, Hill e Von Einem (2010), há a redução de 49% NO_x e 84% MP em relação aos ônibus diesel do mesmo ano. Essa redução, conforme apontado na seção “Setor de transportes e meio ambiente”, por meio da Tabela 3.1, em veículos leves substituindo a gasolina também é expressiva.

4 ESTUDO DO IMPACTO ECONÔMICO DA SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL NO TRANSPORTE PÚBLICO

4.1 INTRODUÇÃO

Nesse estudo serão analisados os aspectos econômico e ambiental do uso de GNV no transporte público, usando como caso de referência a empresa HARU – Reisen que monitorou durante um ano o impacto da utilização de veículos GNC no transporte público de Berlim.

O presente estudo pretende apresentar o caso alemão da empresa HARU e em seguida fazer uma análise de custos similar, relacionado a veículos utilizados no Brasil.

4.2 CASO DE BERLIM

4.2.1 Frota analisada

A empresa HARU presta serviços para a administradora do transporte público em Berlim, a *Berliner Verkehrsbetriebe* (BVG). Os ônibus diesel e GNC comparados faziam a mesma linha, percorrendo portanto as mesmas distâncias e atendendo as exigências de quilometragem da BVG (400 km). As especificações técnicas dos veículos da frota da empresa alemã HARU estão apresentadas na Tabela 4.1 a seguir.

No estudo, foram analisados nove ônibus movidos a GNC e dois diesel, ambos articulados de piso rebaixado e produzidos pela MAN. Os veículos GNC, construídos em 2005, eram do tipo **NEOPLAN N4521** (Figura 4.1). Os ônibus diesel, construídos em 2001, eram do tipo **MAN NG 313/D28/3T** (Figura 4.2).

Tabela 4.1 – Características da frota de veículos monitoradas e analisadas no caso alemão.

Ônibus GNC	Especificações técnicas	Diesel (veículo de referência)
28.000 kg	Peso máximo permitido	28.000 kg
17.200 kg	Peso do veículo vazio	16.200 kg
228 kW	Potência máxima	228 kW
Capacidade de passageiros e equipamentos extras		
47	Sentados	47
111	Em pé	104
158	Capacidade somada	151
Sim	Ar-condicionado	sim
Sim	Aquecedor auxiliar	sim
Combustível, norma vigente e autonomia		
VEA	Norma das emissões do veículo	Euro IV+ Filtro CRT ¹⁶
222 kg	Capacidade do Tanque	350 l
51,25 kg	Consumo de combustível a cada 100 km (segundo fabricante)	60 l
433 km	Autonomia (segundo fabricante)	583 km
400 km	Autonomia diária solicitada pela BVG	400 km

Fonte: Traduzido de (HARU, 2007).

Figura 4.1 – Ônibus movido a GNC da empresa HARU do tipo Neoplan N4521.



Fonte: (DANIEL POTTHOFF, 2015).

¹⁶ *Continuously Regenerating Trap* (CRT) que em português significa Sistema de filtragem continuamente regenerável. Serve para o tratamento do gás de escape e abrange um catalisador de oxidação que convete substâncias nocivas por meio de tratamento químico (MAN PORTUGAL, 2015).

Figura 4.2 – Ônibus movido a diesel da empresa HARU do tipo NG 313.



Fonte: (U. BERGMANN, 2015).

As operações de abastecimento bem como as de manutenção foram feitas dentro da empresa HARU, para os onze ônibus analisados. A quilometragem diária de cada ônibus foi de 364 km (incluindo o trajeto da garagem até a primeira estação da linha) e a velocidade média da linha nas viagens era 17-18,6 km/h.

Durante um ano cada ônibus apresentou uma quilometragem média de aproximadamente 70.000 km e esta será utilizada para os cálculos a seguir.

4.2.2 Custos de abastecimento

Embora mencionados alguns dos custos (manutenção, por exemplo) que foram encontrados pela empresa HARU durante o monitoramento, o enfoque dado foi para os custos de abastecimento.

Para a compra dos ônibus GNC foi investido 27.560 € a mais que na de ônibus a diesel e a empresa aponta que o preço de resgate do fabricante é menor para os veículos GNC (valor estimado com que o fabricante compra o veículo de volta) variando de acordo com a quilometragem e tempo de uso do veículo.

A empresa HARU teve menos gastos anuais com a manutenção dos ônibus GNC que com os diesel (607,00 € por ônibus a menos), na quilometragem de 70.000 km.

O abastecimento dos ônibus dura tempos diferentes: os ônibus a gás demoram cerca de 8 minutos e 43 segundos e os ônibus a diesel necessitam de 1 minuto e 44 segundos para completar o tanque. Considerando os custos com um frentista, o estudo de caso da empresa HARU relata que 743 €/ano seria pago a mais para abastecer os ônibus GNC. Após algumas melhorias no sistema de abastecimento, o tempo nos ônibus GNC foi reduzido para 6 minutos, conseqüentemente diminuindo os custos com o frentista.

A análise dos custos de combustível foram calculadas com base no ano de 2006. A empresa afirma que ao se considerar o preço do gás natural e diesel hoje, não haveriam grandes variações para os ônibus a gás, pois a taxa de crescimento dos preços é praticamente a mesma. Os custos com o combustível estimados após um ano são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Custos de consumo de combustível para os ônibus da frota da HARU.

Custo do consumo de combustível no período de: 09/2005 - 08/2006	GNC	Diesel
Custo de compra (2005)	385.840,00 €	345.860,00 €
Número de ônibus	9	2
Tempo de utilização em anos	8	8
Quilometragem (hodômetro)	618.935 km	108.066 km
Uso médio cada 100 km (em kg ou litros)	53,8 kg	60,6 l
Preço médio (em €/kg ou €/l)	0,72 €	0,86 €
Custo do combustível (em € a cada km)	0,39 €	0,52 €
Custo do combustível por ônibus (70.000 km por ano)	27.205,00 €	36.610,00 €
Diferença entre o diesel para GNC a cada ônibus em € por ano	-	+ 9.405,00 €

Fonte: Traduzido de (HARU, 2007).

4.2.3 Custo total

Considerando todos os custos mencionados na seção anterior e o custo estimado do preço de compra do ônibus considerando a depreciação do mesmo, é possível estimar os custos totais operacionais para cada tipo de ônibus. Um resumo dos mesmos é apresentado na Tabela 4.3. Pode-se inferir da Tabela 4.3 que mesmo com os custos não planejados (por

exemplo, reparos inesperados) e o maior tempo de abastecimento dos ônibus a gás, existe uma significativa vantagem econômica em se usar ônibus a GNC.

Tabela 4.3 – Custos operacionais dos ônibus GNC e Diesel da empresa HARU.

Custos totais	GNC		Diesel	
	€ cada ônibus	€/km	€ cada ônibus	€/km
Preço de compra dos ônibus (por ano)	48.230	0,689	43.232	0,618
Consumo de combustível	27.205	0,389	36.610	0,523
Custo para abastecimento do veículo	909	0,013	314	0,004
Soma	76.344	1,091	80.156	1,145
Diferença do diesel para o GNC			+ 3.812	+ 0,054

Fonte: Traduzido de (HARU, 2007).

4.3 CASO ANÁLOGO BRASILEIRO

4.3.1 Frota analisada

Para o estudo do impacto econômico da substituição de diesel por GNV no caso brasileiro utilizam-se valores reais referentes aos veículos diesel e para o veículo GNC são utilizados os valores considerados para um chassi existente comercialmente.

Uma empresa de transporte público, que por razões de confidencialidade não terá seu nome mencionado e será doravante chamada de *Empresa X*, forneceu os valores referentes a um de seus veículos da frota diesel. A *Empresa X* está localizada em uma cidade de aproximadamente 120 mil habitantes, com uma frota urbana de 40 veículos cuja idade média destes é de 5,75 anos.

O ônibus GNC foi escolhido usando como parâmetro principal possuir o mesmo chassi que os veículos diesel da *Empresa X*. Dessa forma foi escolhido um chassi da empresa Mercedes-Benz. O motor a gás escolhido é do tipo M366 LAG da MBB é um motor *lean-burn*, com características similares ao do motor diesel M 366 LA. Os dados este motor foram obtidos em IACCARINO (2005) e CONCEIÇÃO (2006).

A tecnologia dos ônibus dedicados a GNC tem sofrido constantes evoluções nos países europeus, no entanto no Brasil esta é ainda incipiente. A maior parte dos ônibus utilizando GNV no Brasil são veículos Ottolisados.

As especificações técnicas dos ônibus utilizados para as estimativas brasileiras estão apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características da frota de veículos analisadas no estudo brasileiro.

Ônibus GNC	Especificações técnicas	Diesel (veículo de referência)
-	Peso máximo permitido	15.000 kg
-	Peso do veículo vazio	8.500 kg
170 kW	Potência máxima	140 kW
Capacidade de passageiros		
-	Sentados	38
-	Em pé	24
-	Capacidade somada	62
Combustível, norma vigente e autonomia		
VEA	Norma das emissões do veículo	Euro V (P-7)
151,2 kg	Capacidade do Tanque	300 l
35 kg	Consumo de combustível a cada 100 km (segundo fabricante)	39,06 l
432 km	Autonomia (segundo fabricante)	800 km

Fonte: (AUTOR, 2015).

No estudo foram analisados dois ônibus de cada tipo de combustível ambos com chassis produzidos pela MBB. Para manter o padrão estabelecido no estudo de caso alemão, utilizou-se todos os valores de combustível do veículo GNC convertidos de m³ para kg. Esta conversão utiliza a densidade média do gás natural como sendo 0,63 kg/m³ (valor encontrado na Tabela 2.2, gás comercial do tipo M).

O consumo de combustível por quilômetro foi utilizado de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo GEIPOT (2002), cujo o consumo ótimo para os ônibus urbanos movidos a diesel é de 2,56 km/l (ou 0,39 l/km).

A quilometragem diária fornecida pela *Empresa X* foi de 250 km e estima-se que durante um ano cada ônibus apresentou uma quilometragem média de 70.000 km, isso corresponde à utilização dos veículos por 280 dias.

4.3.2 Custos de abastecimento

Para a compra de um ônibus GNC deve-se investir R\$ 54.000,00 a mais que na de um ônibus a diesel. A análise dos custos de combustível foram feitas com base no ano de 2015. O preço do GNV e diesel foram obtidos a partir de dados da (ANP, 2015). Foram utilizados os preços médios considerando que o combustível foi comprado diretamente dos distribuidores (valor menor devido a grande quantidade comprada) na cidade de São Paulo. Os custos com combustível estimados após um ano estão descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Custos de consumo de combustível para os ônibus do caso brasileiro.

Custo do consumo de combustível no período de: 09/2014 - 08/2015	GNC	Diesel
Custo de compra (2005)	R\$ 310.000,00	R\$ 256.000,00
Número de ônibus	1	1
Tempo de utilização em anos	8	8
Uso médio cada 100 km (em kg ou litros)	33,8 kg	41,2 l
Preço médio¹ (em R\$/kg ou R\$/l)	R\$ 2,51	R\$ 2,57
Custo do combustível (em R\$ a cada km)	R\$ 0,85	R\$ 1,06
Custo do combustível por ônibus (70.000 km por ano)	R\$ 59.500,00	R\$ 74.118,80
Diferença entre o diesel para GNC a cada ônibus em R\$ por ano	-	+ R\$ 14.618,8

Fonte: (AUTOR, 2015).

4.3.3 Custo total

Considerando os custos mencionados na seção anterior e o preço de compra dos ônibus, são estimados os custos totais de combustível na Tabela 4.6.

O ônibus GNC brasileiro, custa R\$ 54.000 a mais que o diesel. Como pode-se inferir da Tabela 4.6, o uso de GNC durante um ano economizaria o montante de aproximadamente 8 mil reais. Se considerado no período de 8 anos, o valor economizado seria de R\$ 64.000 que além de cobrir a diferença com o investimento feito na compra do ônibus GNC proporcionaria ainda uma reserva de 10 mil reais para outros custos.

Tabela 4.6 – Custos operacionais dos ônibus GNC e Diesel do caso brasileiro.

Custos totais	GNC		Diesel	
	R\$ cada ônibus	R\$/km	R\$ cada ônibus	R\$/km
Grupo de custos				
Preço de compra dos ônibus (por ano)	38.750	0,553	32.000	0,457
Consumo de combustível	59.500	0,850	74.118	1,058
Soma	98.250	1,403	106.118	1,515
Diferença do diesel para o GNC			+ 7.868	+0,112

Fonte: (AUTOR, 2015).

4.3.4 Aspecto ambiental

Além da vantagem econômica, deve ser considerado o aspecto ambiental do uso de ônibus GNC. Estes pertencentes à classe VEA, que é mais restritiva, com menor níveis de emissão de poluentes que os veículos diesel equivalentes.

Segundo a *Kraftfahrt-Bundesamt* (KBA) que verifica o consumo de combustível do motor e faz o teste de emissão de poluentes (Ensaio ETC) para os veículos alemães, a diferença entre o CO₂ emitido por ônibus a gás e os diesel é muito pouca. No entanto, nas emissões de outros poluentes, essa diferença é bem mais significativa. A emissão de particulados nos ônibus GNC é de 0,002 g/kWh, praticamente nula. Quanto à emissão de NO_x, os ônibus GNC reduzem em 42% as emissões quando comparado ao ônibus diesel equivalente.

Além disso em países como a Alemanha tem-se a projeção de que até 2020 do total de gás natural, 20% será biogás (produzido por matérias primas renováveis, como a biomassa). Dessa forma, as emissões de CO₂ por veículos GNC seriam reduzidas, pois os vegetais

durante seu crescimento absorvem CO_2 do meio ambiente. O gás produzido dessas plantas e queimados no motor, emitem praticamente a mesma quantidade de gás que absorveram, deixando o balanço de CO_2 zerado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do estudo de caso apresentado demonstra-se o impacto econômico que o uso de GNV pode ter sobre os custos de abastecimento de uma frota de ônibus urbano. Os custos com combustível estão presentes em todo o tempo de utilização do veículo e ao se minimizar tais custos pode-se ter benefícios financeiros tanto para o empreendedor como para o usuário (menores custos refletem-se em tarifas mais baratas) a longo prazo.

Outro aspecto que deve ser destacado é que o uso de GNV no transporte público, reduz os níveis de emissão de poluentes. O destaque maior deve-se às reduções de NO_x para praticamente a metade dos emitidos por veículos diesel e a emissão de materiais particulados, que para os veículos GNV é praticamente nula. Dessa forma, tem-se uma melhoria significativa da qualidade do ar em grandes centros urbanos e uma redução de gases que contribuem para o aquecimento global.

O uso do GNV pode ainda diminuir o ruído proveniente dos ônibus, proporcionando uma direção mais confortável para os passageiros e uma razoável melhoria das condições de trabalho dos motoristas. Esse fator é extremamente favorável pois em grandes cidades a poluição sonora causa desconforto e estresse tanto em passageiros como outros cidadãos.

Deve-se atentar para a problemática brasileira no que se refere as malhas de distribuição do GNV, que ainda são um entrave para o aumento do uso deste combustível no setor de transportes. Faltando incentivos fiscais por parte do governo com o intuito de melhorar e interligar a malha de transporte de gás natural existente e estimular o consumo brasileiro.

Em suma, pode-se constatar as vantagens advindas com o uso de GNV no setor de transportes em razão dos aspectos ambiental (redução das emissões e poluição sonora) e principalmente econômico (maior custo de investimento sendo revertido em menores custos operacionais).

6 CONCLUSÃO

Com o presente estudo pode-se concluir que o uso de gás natural no transporte público brasileiro, tem a vantagem de reduzir custos atrelados ao combustível. Conforme apresentado neste trabalho, a economia da substituição de ônibus a diesel por GNV seria da ordem de até R\$ 15.000,00 ao ano para uma frota que percorre uma quilometragem diária média de 250 km.

Além da vantagem econômica, verificou-se por meio do estudo de caso da Alemanha que ocorre uma redução drástica na emissão de poluentes tóxicos como óxidos de nitrogênio (com uma redução de cerca de 42%) e material particulado (cuja presença nos veículos a GNV é praticamente nula), que são nocivos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana.

Em estudos futuros poderiam ser analisados os custos totais envolvidos com a substituição do gás natural no transporte público de forma a se obter um panorama geral das consequências de tal substituição. Além disso, pode-se também estimar se para o caso brasileiro os gastos com manutenção dos ônibus GNV são maiores ou menores do que com os ônibus a diesel. Uma outra estimativa possível são os fatores de emissões da frota obtidos a partir de dados característicos como periodicidade de manutenção, especificações técnicas do motor, utilização diária, quantidade de paradas média, entre outros.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil 3ªed. 2008.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>. Acesso em: 02 out. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2014.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em 22 out. 2015.

ANP (Brasil). **Glossário:** Fonte: ANP. 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=582#g>>. Acesso em: 02 out. 2015.

ANP. **Sistema de levantamento de preços:** de 29/11/2015 a 05/12/2015. 2015. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/resumo_por_estado_index.asp>. Acesso em: 07 dez. 2015.

BAHIAGÁS (Bahia). Governo do Estado da Bahia. **Gás natural:** principais características. 2015. Disponível em: <<http://www.bahiagas.com.br/gas-natural/principais-caracteristicas/>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

BARROS, Mariana. **Nova licitação de transporte em São Paulo mantém ônibus poluidores:** especialistas defendem uso de gás natural e de combustíveis renováveis para amenizar má qualidade do ar e altas temperaturas da cidade. 2015. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/blog/cidades-sem-fronteiras/arte/nova-licitacao-de-transporte-em-sao-paulo-mantem-onibus-poluidores/>>. Acesso em: 08 dez. 2015.

BERNARDES, Ednilson Santos. **Configuração internacional da atividade produtiva:** estudo de caso em uma montadora de carrocerias para ônibus. Porto Alegre: PPGA-UFRGS, 2002.

BRASIL. Anp. Mme. **Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis:** portaria anp nº 41, de 15.4.1998 - dou 17.4.1998. 2014. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_portarias_anp/portarias_anp_tec/1998/abril/panp_41_1998.xml>. Acesso em: 29 out. 2015.

CANIS, Bill; LATTANZIO, Richard K.. **U.S. and EU motor vehicle standards: issues for transatlantic trade negotiations.** Eua: Congressional Research Service, 2014. 32 p.

CANIS, Bill; PIROG, Robert; YACOBUCCI, Brent D.. **Natural gas for cars and trucks: options and challenges**. 2014. Disponível em: <<http://fas.org/sgp/crs/misc/R43791.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2015.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo. **Emissão veicular: introdução**. 2015. Disponível em: <<http://veicular.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

COMGÁS. **O que é GNV?** 2013. Disponível em: <<http://www.comgas.com.br/pt/contato/Lists/perguntasFrequentes/DispForm.aspx?ID=29&ContentTypeId=0x0100E886123A90A16E42A6A5A74C4C24ABA4>>. Acesso em: 26 nov. 2015.

CONCEIÇÃO, Guilherme Wilson da. **A viabilidade técnica, econômica e ambiental da inserção do gás natural veicular em frotas do transporte coletivo urbano de passageiros**. 2006. 290 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução conama no 403, de 11 de novembro de 2008**. 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=591>>. Acesso em: 22 nov. 2015.

Environmental Protection Agency - EPA. **Global greenhouse gas emissions data: global emissions by gas**. 2015. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>>. Acesso em: 19 out. 2015.

FABUS. **Associação Nacional dos fabricantes de ônibus: produção das associadas - mapas modelos**. 2006. Disponível em: <<http://www.fabus.com.br/producao.htm>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

FAIZ, Asif; WEAVER, Christopher S.; WALSH, Michael P.. **Air pollution from the motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions**. Washington: The World Bank, 1996.

FOUKES, Elena. **EU: heavy-duty: elr**. 2013a. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=EU:_Heavy-duty:_ELR>. Acesso em: 26 nov. 2015.

FOUKES, Elena. **EU: heavy-duty: esc**. 2013b. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=EU:_Heavy-duty:_ESC>. Acesso em: 26 nov. 2015.

FOUKES, Elena. **EU: heavy-duty: etc.** 2013c. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=EU:_Heavy-duty:_ETC>. Acesso em: 26 nov. 2015.

FOUKES, Elena; OLIVARES, Elaine. **US: heavy-duty: set.** 2013. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=US:_Heavy-duty:_SET>. Acesso em: 26 nov. 2015.

GALP ENERGIA. **Extração e processamento.** 2014. Disponível em: <<http://www.galpenergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Extracao-e-processamento.aspx>>. Acesso em: 30 out. 2015.

GASNET. **Entendendo o gnv.** 2013b. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/gnv/entendendo_gnv.asp>. Acesso em: 05 dez. 2015.

GASNET. **Gás natural:** composição do gás natural bruto. 2013a. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp>. Acesso em: 05 out. 2015.

GEIPOT. **Anuário estatístico dos transportes – 2000.** 2002. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasília, DF.

GRAUS, 7 (Comp.). **Significado de autonomia:** o que é autonomia:. 2015. Disponível em: <<http://www.significados.com.br/autonomia>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

HARU. **Erdgasbusse im ÖPNV sind wirtschaftlich!:** ergebnisse eines betriebswirtschaftlichen monitorings der wibera in Berlin. 2007. Disponível em: <<https://www.erdgas-mobil.de/fileadmin/downloads/Presse/oepnvwirtschaftlich.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2015.

IACCARINO, Fernando Aniello. **Gás natural na matriz de combustíveis veiculares:** Rio de Janeiro: Abgnv, 2005. 34 slides, color. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/metlegal/palestras/Petrobras.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2015.

IBAMA. **Identidade organizacional.** 2015. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/acesso-a-informacao/identidade-organizacional>>. Acesso em: 26 nov. 2015.

IEA STATISTICS. **CO₂ emissions from fuel combustion: highlights**. 2014. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2014.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **2014 Key world energy statistics**. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2014.html>>. Acesso em 02 out. 2015.

IPCC. **Climate change 2014: synthesis report**. 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

LOUREIRO, Eduardo César de Miranda. **Termoquímica da mistura ar/combustível**. Pernambuco: Eduardo Loureiro, 2015. 12 slides, color. Disponível em: <http://www.eduloureiro.com.br/index_arquivos/MTAula8.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

MACHADO, Guilherme B.; MELO, Tadeu C. Cordeiro de; LASTRES, Luiz Fernando Martins. **Utilização de gás natural em motores e cenário do uso no Brasil**. Rio de Janeiro: Cenpes, 2007. 89 slides, color.

MAN LATIN AMERICA. **Proconve P7**. 2015. Disponível em: <<http://man-joomla.inkubaapps.com.br/motores-e-o-meio-ambiente>>. Acesso em: 22 nov. 2015.

MAN PORTUGAL. **Tecnologia & competência: MAN CRTec®**. 2015. Disponível em: <http://www.bus.man.eu/pt/pt/fascinio-e-tecnologia/tecnologia-e-competencia/euro-6/man-crtec/_MAN-CRTec.html>. Acesso em: 03 dez. 2015.

MAHLE. **Curso Mahle metal leve motores de combustão interna**. Brasil: Mahle Metal Leves S.a., 2012. 226 p. Disponível em: <www.mahle.com.br>. Acesso em: 21 nov. 2015.

MAJEWSKI, Addy; OLIVARES, Elaine; FOUKES, Elena. **US: heavy-duty: ftp transient**. 2013. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=US:_Heavy-duty:_FTP_Transient>. Acesso em: 26 nov. 2015.

MARTINS, Maria Paula. **Setor de gás natural no Brasil**. 2006. Disponível em: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/eventos/seminariointernacional/2006/artigos/pdf/Maria_Martins.pdf>. Acesso em: 02 out. 2015.

MERCEDES-BENZ. **Ônibus Mercedes-Benz atendem às demandas do sistema de transporte coletivo urbano de São Paulo.** 2015. Disponível em: <<https://www.mercedes-benz.com.br/institucional/imprensa/releases/onibus/2015/8/14002-onibus-mercedes-benz-atendem-as-demandas-do-sistema-de-transporte-coletivo-urbano-de-sao-paulo>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

MILLER, Josh; WAGNER, Vance; OLIVARES, Elaine. **US: heavy-duty: emissions.** 2014. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=US:_Heavy-duty:_Emissions>. Acesso em: 12 nov. 2015.

Ministério de Minas e Energia. **A ANP.** 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/entidades-vinculadas-e-afins/anp>>. Acesso em: 22 out. 2015.

OIL & GAS JOURNAL (Comp.). **Race on for deepwater acreage, 3,500-meter depth capability.** 1998. Disponível em: <<http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-58/issue-10/news/general-interest/race-on-for-deepwater-acreage-3500-meter-depth-capability.html>>. Acesso em: 30 out. 2015.

OLIVARES, Elaine. **US: Heavy-duty: nte.** 2013. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=US:_Heavy-duty:_NTE>. Acesso em: 27 nov. 2015.

OLIVEIRA FILHO, A. D. **Substituição de diesel por gás natural em ônibus no transporte público urbano.** Dissertação de mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, 2006. 144 p.

PALMER, Tom; HILL, Nikolas; VON EINEM, Johannes. **Automotive lpg and natural gas engines.** 2010. Disponível em: <http://www.etsap.org/E-techDS/PDF/T03_LPG-CH4_eng-GS-gct-AD.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2015.

PARLAMENTO EUROPEU (União Europeia). Comunidade Europeia. **Directiva 1999/96/ce do parlamento europeu e do conselho:** de 13 de dezembro de 1999. 1999. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0096&rid=1>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

PETROBRAS. **Atuação no pré-sal:** tudo começou com uma ideia de quem acreditou que não existem barreiras, existem oportunidades. temos um horizonte ainda melhor pela frente.. 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/pre-sal/>>. Acesso em: 08 dez. 2015.

PETROBRAS. **Fórmulas de conversão:** densidade e poderes caloríficos superiores. 2014a. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/formulas-de-conversao>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

PETROBRAS. **Glossário.** 2014b. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/glossario/g>>. Acesso em: 27 out. 2015.

PRAÇA, E.R. (2003). **Distribuição de gás natural no Brasil:** um enfoque crítico e de minimização de custos. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 159 fl.

PRATES, Cláudia Pimentel T. et al. **Evolução da oferta e da demanda de gás natural no Brasil.** 2006. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2424/1/BS24 Evolução da oferta e da demanda_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2424/1/BS24%20Evolu%7Ao%20da%20oferta%20e%20da%20demanda_P.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2015.

QUATTROCHI, Douglas. **Thermodynamics and propulsion:** 3.5 the internal combustion engine (otto cycle). 2006a. Disponível em: <<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node25.html>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

QUATTROCHI, Douglas. **Thermodynamics and propulsion:** 3.6 diesel cycle. 2006b. Disponível em: <<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node26.html>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

RIO+20 (Brasil). **Rio +20 conferência das nações unidas sobre o desenvolvimento sustentável:** inventário de emissões de gases de efeito estufa. 2011. Disponível em: <<http://www.rio20.gov.br/rio/iniciativas-da-cidade/inventario-de-gee.html>>. Acesso em: 19 out. 2015.

SANT'ANNA, Andréia Abrahão. **Simulação de processamento de gás natural em plataforma off-shore.** 2005. 141 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Programa Eq-anp, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, Serguei Nogueira da. **uso do gnv em ônibus urbano para operar em linha comercial:** projeto piloto gasbus. 2006. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SINFRECAR (São Paulo). **Ônibus zero km – 1º parte: chassi.** 2010a. Disponível em: <<http://www.sinfrecar.org.br/portal/?p=3695>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

SINFRECAR (São Paulo). **Ônibus zero km – 2ª parte: carroçarias**. 2010b. Disponível em: <<http://www.sinfreicar.org.br/portal/?p=3870>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

STATISTICS, Iea (Org.). **Key trends in co2 emissions**: excerpt from: co2 emissions from fuel combustion. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2-emissions-from-fuel-combustion---2015-edition---excerpt.html>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

SULGÁS. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. **Fornecendo o gás natural através de várias modalidades de transporte**: gasoduto - rede canalizada. Disponível em: <<http://www.sulgas.rs.gov.br/sulgas/index.php/modalidade-de-transporte>>. Acesso em: 30 out. 2015.

TECCOM TECNOLOGIA EM COMBUSTÃO. **Teste de opacidade veicular**. 2015. Disponível em: <http://www.teccom10.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=189>. Acesso em: 26 nov. 2015.

THOMAS, José Eduardo et al (Org.). **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência Ltda., 2001. 278 p.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **Natural gas benefits and considerations**. 2015. Disponível em: <http://www.afdc.energy.gov/fuels/natural_gas_benefits.html>. Acesso em: 01 dez. 2015.

VALIANTE, Daniel. **Análise de viabilidade técnica, econômica, ambiental e mercadológica da instalação original de fábrica de sistema de conversão para uso de gás natural em veículos leves movidos a gasolina e/ou álcool**. 2006. 125 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

WAGNER, Vance. **Global comparison: heavy-duty emissions**. 2014. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=Global_Comparison:_Heavy-duty_Emissions>. Acesso em: 11 nov. 2015.

WAGNER, Vance; STAHL, Robert; OLIVARES, Elaine. **EU: heavy-duty: emissions**. 2015. Disponível em: <http://transportpolicy.net/index.php?title=EU:_Heavy-duty:_Emissions>. Acesso em: 11 nov. 2015.