



# **ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS POTENCIAIS PARA A REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA**

**Luíza Santana Franca**

**Marcio de Almeida DAgosto**

**Cintia Machado de Oliveira**

**Fabiana do Couto Assumpção**

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-87893-17-8



9 788587 893178



# ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS POTENCIAIS PARA A REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA

**Luíza Santana Franca**  
**Márcio de Almeida D'Agosto**  
**Cíntia Machado de Oliveira**  
**Fabiana do Couto Assumpção**

Programa de Engenharia de Transportes do Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia  
– PET/COPPE

## RESUMO

O setor de transporte de carga brasileiro vem crescendo continuamente, se caracterizando pela elevada participação do transporte rodoviário na divisão modal. Esse quadro resulta no alto consumo de combustíveis fósseis e gera altas emissões de poluentes atmosféricos, acarretando a necessidade de adoção de novas práticas que possam minimizar estes impactos ambientais. Esse artigo analisa as alternativas tecnológicas que vem sendo estudadas e desenvolvidas no setor do transporte rodoviário de carga no mundo a partir de uma revisão bibliográfica narrativa, para que sua aplicação possa ser considerada e avaliada para o Brasil. Foi observado que é difícil encontrar alternativas tecnológicas que possam contemplar o baixo custo, a alta economia de combustível e a alta redução de emissão de poluentes atmosféricos simultaneamente, sendo mais comum a ocorrência de dois desses três aspectos ou apenas um deles.

**PALAVRAS-CHAVES:** Transporte rodoviário de carga, alternativas tecnológicas, redução de impactos ambientais.

## ABSTRACT

The Brazilian freight transport sector has been growing steadily and is characterized by a high share of road transport. This scenario results in high fossil fuels consumption which generates high air pollutants emissions. Therefore, it's important that the sector could adopt new practices which can minimize these environmental impacts. From a preliminary literature research, this article analyzes the alternative technologies for freight road transport, which have been studied in the world, so that their application could be considered for Brazil. It was observed that it is difficult exist a single alternative technology that could aggregate low cost, low fuel consumption and high reduction of air pollutant emissions, simultaneously. In conclusion, it is possible achieve two of these three aspects considered, or only one of these.

## 1. INTRODUÇÃO

O modo rodoviário é o mais utilizado para o transporte de carga no mundo, apresentando crescimento nos últimos anos. Os países da OECD (Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e da União Europeia (UE) apresentaram crescimento de 1% deste setor em 2011, enquanto a China e a Índia cresceram 18% e 5%, respectivamente (ITF, 2013). A Comissão Europeia afirma ainda que o transporte de carga deve crescer 50% entre 2000 e 2020 (European Commission, 2006).

Se comparado com os modos dutoviário, ferroviário e aquaviário, o transporte rodoviário de carga é o que mais consome energia por unidade de carga transportada, representando 30% do total de energia consumida no mundo (D'Agosto et al, 2013). Por isso, ele é responsável pela intensa emissão de gases de efeito estufa resultantes da combustão de combustíveis fósseis, contabilizando 8% do total de emissões de CO<sub>2</sub> no mundo (McKinnon *et al*, 2010),

Já no Brasil, de acordo com as estimativas feitas pelo Plano Decenal de Energia 2021, o uso de combustíveis fósseis foi responsável pela emissão de 396 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2011. O setor de transporte, sozinho, foi responsável pela emissão de 192 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> no mesmo ano, correspondendo a 49% do total (MME, 2012).

Para reduzir os impactos ambientais oriundos do transporte rodoviário de carga, alternativas tecnológicas podem ser consideradas pela iniciativa privada e pelo poder público, tanto no Brasil quanto no mundo. Essas alternativas tecnológicas podem ser baseadas em três fatores: o aprimoramento de tecnologia convencional, o desenvolvimento de novas fontes de energia e o desenvolvimento de novos sistemas de propulsão.

Esse artigo tem como objetivo principal a identificação das alternativas tecnológicas para o transporte rodoviário de carga que estão sendo desenvolvidas e utilizadas no mundo, avaliando a oportunidade de empregá-las no Brasil. Como objetivo secundário, pretende-se, a partir de uma revisão bibliográfica narrativa com enfoque preliminar, apresentar uma comparação destas alternativas tecnológicas em função dos aspectos financeiro (avaliado pelo atributo custo adicional de implantação da tecnologia) e ambiental (avaliado pelos atributos economia de combustível e emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa).

A partir dessa introdução, este artigo se divide em 4 seções. A seção 2 apresenta a tendência sobre as alternativas tecnológicas que vem sendo desenvolvidas e utilizadas no mundo. A metodologia de estudo e os resultados são apresentados nas seções 3 e 4. Por fim, as conclusões e recomendações são apresentadas na seção 5.

## **2. TENDÊNCIAS SOBRE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEIS PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA**

Nas últimas décadas, alternativas tecnológicas potenciais para a redução dos impactos ambientais no transporte rodoviário de carga têm sido estudadas e implantadas em função do aumento da preocupação em relação aos impactos ambientais associados a esta atividade. No Brasil, a implantação de algumas delas se deu a partir de exigências da legislação ambiental, em particular para os veículos equipados com tecnologia convencional com menores limites de emissão de poluentes atmosféricos estabelecidos pelo PROCONVE. Entende-se por veículos com tecnologia convencional aqueles equipados com motor de combustão interna, sistema de propulsão mecânico e que utilizam combustível derivado do petróleo.

A tendência futura para o transporte rodoviário de carga pode ser o emprego de alternativas tecnológicas que possam incrementar o desempenho dos veículos equipados com tecnologia convencional quanto ao consumo de combustível (Ribeiro *et al*, 2007). No longo prazo, é possível que estes veículos passem a sofrer modificações no seu projeto, motor, sistema de propulsão e combustível, a fim de reduzir as emissões de poluentes atmosféricos pela redução do consumo de combustíveis.

De uma forma mais ampla, as alternativas tecnológicas tendem a focar no aumento da capacidade de carregamento do veículo e na melhoria da sua eficiência energética baseando-se nos seguintes fatores (McKinnon, 2010): (1) o aprimoramento de tecnologia convencional; (2) o desenvolvimento de novas fontes de energia e (3) o desenvolvimento de novos sistemas de propulsão.

Na Europa, tais alternativas tecnológicas buscam a melhoria da aerodinâmica do veículo e o desenvolvimento de novos sistemas mecânicos que possam aumentar a eficiência energética dos motores e reduzir a emissão de poluentes atmosféricos por parte dos veículos equipados

com tecnologia convencional. Além disso, as alternativas tecnológicas europeias também dão enfoque no desenvolvimento de novos combustíveis, como o biodiesel (éster alcoólico produzido a partir de triglicerídeos como óleos ou gorduras), o etanol (álcool etílico) e o biogás (metano) e de sistemas de propulsão alternativos, como a pilha a combustível alimentada a hidrogênio e os sistemas de propulsão híbridos, como o diesel-elétrico (European Commission, 2007).

Nos Estados Unidos, a legislação de independência e segurança energética de 2007 reconheceu a importância de se reduzir o consumo energético do sistema de transporte americano. A partir daí, o Departamento de Transportes (DOT) estabeleceu normas por meio de um programa de economia de combustível para veículos comerciais leves e caminhões pesados que considera o uso de alternativas tecnológicas, práticas operacionais e mudanças na estrutura logística (The National Academies Press, 2010). Essas ações são necessárias para que a redução do consumo de combustível e a decorrente redução das emissões de gases de efeito estufa possam ser alcançadas. Além disso, foi identificado o desenvolvimento de potenciais fontes de energia alternativa para o uso em veículos comerciais leves, como o etanol, a eletricidade e o hidrogênio (Pew Center On Global Climate Change, 2011-b).

As pesquisas brasileiras consideram, por um lado, a melhoria do desempenho dos veículos equipados com tecnologia convencional de forma a reduzir a emissão de poluentes atmosféricos locais, atendendo aos limites definidos pela última edição do PROCONVE em janeiro de 2012 (P7) (CNT, 2012). Por outro lado, consideram o desenvolvimento de biocombustíveis, principalmente o etanol e o biodiesel. O desenvolvimento de sistemas de propulsão alternativos se concentra basicamente em estudos preliminares, que já apresentam resultados promissores (Volvo, 2009).

### **3. METODOLOGIA DE PESQUISA**

Para identificar e analisar as alternativas tecnológicas que vem sendo desenvolvidas e aplicadas no transporte rodoviário de carga no mundo, conforme tendências apresentadas na seção 2, a metodologia de pesquisa utilizada é a revisão bibliográfica narrativa, que levou em consideração, preliminarmente, a seleção de 12 estudos que apresentavam revisão bibliográfica acerca destas alternativas tecnológicas.

A revisão bibliográfica narrativa é um processo de revisão apropriado para descrever e discutir o desenvolvimento ou o “estado da arte” de um determinado assunto, sob o ponto de vista teórico ou convencional (Bencheikh *et al*, 2006). Os estudos foram selecionados em função da sua data de publicação, considerando os últimos 10 anos.

As referências pesquisadas são apresentadas em tabelas, para que cada estudo seja classificado em função dos seguintes itens: fatores, alternativa tecnológica, tipo de veículo, tipo de aplicação, economia de combustível, custo adicional de implementação da alternativa tecnológica, emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (compostos orgânicos voláteis - COV, óxidos de nitrogênio - NO<sub>x</sub>, material particulado - MP, hidrocarbonetos - HC, monóxido de carbono - CO, dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>) e local de estudo. A análise dos resultados será feita em função da comparação das alternativas tecnológicas levando em consideração os atributos: custo adicional de implementação da alternativa tecnológica e emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (GEE).

Consideraram-se como alternativas tecnológicas que poderiam apresentar oportunidades de investimento no Brasil, aquelas que pudessem contemplar: (1) baixo custo adicional de implementação da tecnologia; (2) alta economia de combustível e (3) alta redução de emissão de poluentes atmosféricos. Os autores consideram que esses três atributos indicam as potenciais vantagens do uso de alternativas tecnológicas perante o uso de tecnologias convencionais, justificando, assim, seu estudo e desenvolvimento. Desta forma, este método de avaliação representa uma contribuição deste artigo, que analisará as referências bibliográficas em função desses três atributos. Porém, cabe ressaltar que a sua efetiva implantação e uso no Brasil dependerá de condicionantes adicionais, como interesses políticos e comerciais.

#### **4. RESULTADOS E ANÁLISES**

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados da revisão bibliográfica narrativa. A Tabela 1 apresenta as alternativas tecnológicas em função de sua aplicação em cada tipo de veículo e as classifica em função da economia de combustível e do atributo financeiro. A economia de combustível, dada em porcentagem (%), está relacionada à adoção de uma dada alternativa tecnológica sendo comparada ao uso de tecnologia convencional. Já o atributo financeiro avalia o custo adicional (US\$/unidade) de se implantar determinada alternativa tecnológica. Nem todos os estudos apresentam esta informação, por isso, serão comparadas apenas aquelas em que foi avaliada tal característica.

Por outro lado, a Tabela 2 apresenta a redução das emissões de poluentes atmosféricos e GEE (%) por tipo de alternativa tecnológica empregada em comparação com a tecnologia convencional.

Os resultados são classificados em função do local de estudo. Nesta abordagem preliminar, os estudos selecionados se localizam em grande parte nos Estados Unidos, Europa e Ásia. As alternativas tecnológicas também estão divididas em função dos fatores: aprimoramento de tecnologia convencional, desenvolvimento de novas fontes de energia e desenvolvimento de novos sistemas de propulsão.

A partir da análise das Tabelas 1 e 2, é possível concluir que, em relação à economia de combustível, o sistema de propulsão elétrico a bateria aplicado em caminhão leve é o que apresenta maior economia (66 – 99%), além do sistema híbrido diesel-elétrico em caminhão pesado e de coleta de lixo (50%) e do sistema de propulsão elétrico a pilha combustível a hidrogênio em caminhão leve (38 – 55%).

Quanto às novas fontes de energia, o biogás proveniente do esgoto (36%) e o propano em um veículo comercial leve (27%) apresentaram as maiores porcentagens de economia de combustível. No caso do propano, os estudos apontam menores custos adicionais de implantação da alternativa tecnológica, sendo US\$9.000/unidade para uma van e US\$9.800,00/unidade para uma pick-up (Windecker e Ruder, 2013). Outro teste apresentado por esse mesmo estudo avaliou a inserção de um sistema híbrido diesel-elétrico, também em uma pick-up, apresentando baixo custo de implementação, com US\$2.000,00/unidade. Vale ressaltar que o propano é considerado uma fonte alternativa de energia, mais não é um combustível utilizado no Brasil. Seu uso como combustível em veículos é proibido no Brasil segundo a Resolução da ANP nº 15 de 18/05/2005, sendo utilizado somente para uso residencial (Sindigás, 2007).

**Tabela 1: Classificação das alternativas tecnológicas por economia de combustível e do atributo financeiro.**

Fatores	Alternativa Tecnológica	Tipo de Veículo	Tipo de Aplicação	Economia de Combustível (%)	Custo adicional de implantação de alternativa tecnológica (US\$/unidade)	Referência Bibliográfica	Local
Desenvolvimento de Novos Sistemas de Propulsão	Híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	Guindaste	2,0	55300	Windecker, A. e Ruder, A. (2013)	EUA
	Híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	-	11,0	42900		
	Híbrido diesel-elétrico	Veículo comercial leve	Pick-up	-	2000		
	Híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	-	39,0	41000		
	Elétrico a bateria	Veículo comercial leve	Van	-	10500		
	Híbrido diesel-elétrico	Caminhão médio	-	-	39900		
	Híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	-	15,6 - 22,4	-	CalHeat (2010)	EUA
	Elétrico a pilha combustível*	Caminhão pesado	-	4,0	1500	Lutsey, N. et al. (2007)	EUA
	Elétrico a bateria	Caminhão leve	-	66 - 99	-	TIAX LLC (2007)	EUA
	Elétrico a pilha combustível (hidrogênio)	Caminhão leve	-	38 - 55	-		
	Elétrico a pilha combustível interna (hidrogênio)		-	25 - 42	-		
	Híbrido diesel-elétrico	-	-	20 - 30	-	CalHeat (2013)	EUA
	Híbrido diesel-elétrico em paralelo	Veículo comercial leve	Van	18,0	9000	The National Academies Press (2012)	EUA
	Híbrido diesel-elétrico em paralelo	Caminhão leve	-	30,0	20000		
	Híbrido diesel-elétrico em paralelo ou elétrico a bateria	Caminhão pesado	Caçamba	40,0	30000		
	Híbrido diesel-elétrico em paralelo**	Caminhão pesado	-	10,0	25000		
	Híbrido diesel-elétrico em paralelo	Caminhão pesado	Coleta de lixo	30,0	39000		
	Híbrido diesel-elétrico em paralelo			25,0	3000		
	Híbrido diesel-elétrico em série	-	-	50,0	N/A		
	Híbrido diesel-elétrico em paralelo	-	-	5,0	-	European Commission (2007)	Europa
Híbrido diesel-elétrico com regeneração de energia	-	-	35,0	-	Itália		
Híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	-	50,0	-	McKinnon (2010)	Europa	
Desenvolvimento de Novas Fontes de Energia	Gás natural comprimido	Caminhão pesado	-	25,0	70300	Windecker, A. e Ruder, A. (2013)	EUA
	Propano	Veículo comercial leve	Pick-up	27,0	9800		
	Gás natural comprimido	Caminhão pesado	Coleta de lixo	-	55700		
	Gás natural comprimido	Caminhão pesado	Limpeza de rua	-	72500		
	Gás natural comprimido	Veículo comercial leve	Van	8,0	15100		
	Propano	Veículo comercial leve	Van	-	9000		
	Gás natural comprimido	Caminhão médio	-	-	34000		

\*Em unidades de energia auxiliares

\*\*Veículo também operou com tecnologias de redução de marcha lenta

**Tabela 2 - continuação:** Classificação das alternativas tecnológicas por economia de combustível e do atributo financeiro.

Fatores	Alternativa Tecnológica	Tipo de Veículo	Tipo de Aplicação	Economia de Combustível (%)	Custo adicional de implantação de alternativa tecnológica (US\$/unidade)	Referência Bibliográfica	Local	
Desenvolvimento de Novas Fontes de Energia	Propano	Caminhão leve	-	22 - 23	-	TIAX LLC (2007)	EUA	
	Gás natural			22 - 23	-			
	Diesel de baixo enxofre			26 - 31	-			
	Desenvolvimento de Novas Fontes de Energia	Biogás proveniente do esgoto	-	-	36,0	-	Volvo (2012)	EUA
		Diesel sintético da celulose	-	-	17,5	-		
		Biodiesel de soja e colza	-	-	17,0	-		
		Etanol da celulose	-	-	15,0	-		
Aprimoramento de Tecnologia Convencional	Etanol de grãos	-	-	13,0	-	The National Academies Press (2010)	EUA	
	Defletor em cima da cabine	Caminhão pesado	-	4 - 7	1000 - 13000			
	Teto aerodinâmico da cabine			7 - 10	500 - 1000			
	Redução de peso do chassi			3 - 4	1500 - 2000			
	Extensão da cabine para ligar direto no implemento			2 - 3	300 - 500			
	Conjunto de melhorias da aerodinâmica, como extensão da cabine, defletor no teto, capô e para-choque aerodinâmicos	Caminhão pesado	-	3 - 4	2750			
				3 - 5	1500 - 2000			
				3 - 4	2750			
	Melhoria das rodas, aumento da pressão interna dos pneus e, melhoria do alinhamento das rodas	Caminhão pesado	Trator	4,5	-			
		Caminhão simples	-	1,8	-			
		Caminhão pesado	Guindaste	1,4	-			
		Caminhão pesado	Coleta de lixo	1,5	-			
		Veículo comercial leve	Van	1,0	-			
		Melhorias na aerodinâmica, no motor, no sistema de transmissão, redução de ociosidade + sistema de propulsão híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	Trator	30 - 50,5			44300 - 84600
	Caminhão simples		-	30,5 - 47,1	43120 - 50390			
Caminhão pesado	Guindaste		40,2 - 49,6	49870 - 62390				
Caminhão pesado	Coleta de lixo		28,4 - 38,4	50800 - 52800				
Veículo comercial leve	Van		21,4 - 44,5	4435 - 14710				
Melhorias na aerodinâmica	Caminhão pesado	-	15 - 20***	5000				
Pneus de baixa resistência ao rolamento	Caminhão pesado	-	4 - 11***	-				
Medição da operação do sistema e prática do Ecodriving	Caminhão pesado	-	7,0	-				

\*\*\*Operando em vias expressas

**Tabela 3 - continuação:** Classificação das alternativas tecnológicas por economia de combustível e do atributo financeiro.

Fatores	Alternativa Tecnológica	Tipo de Veículo	Tipo de Aplicação	Economia de Combustível (%)	Custo adicional de implantação de alternativa tecnológica (US\$/unidade)	Referência Bibliográfica	Local
Aprimoramento de Tecnologia Convencional	Melhorias na aerodinâmica	Caminhão pesado	-	18 - 50	\$2.50/galão com 7% de desconto	Pew Center on Global Climate Change (2011-b)	EUA
	Sistema híbrido-elétrico em paralelo, limite de velocidade de 60 milhas/h, melhorias da aerodinâmica e pneus de baixa resistência ao rolamento.	Caminhão pesado	-	-	90000		
	Conjunto de melhorias na aerodinâmica e mudanças na logística	Caminhão médio e pesado	-	51,0	85000		
	Melhorias na aerodinâmica	Caminhão pesado	-	51,0	84600	Pew Center on Global Climate Change (2011-b)	EUA
		Caminhão simples	-	47,0	43120		
		Caminhão pesado	Caçamba	50,0	49870		
		Veículo comercial leve	Van	45,0	14710		
		Caminhão pesado	Coleta de lixo	38,0	50800		
	Melhorias no motor, na aerodinâmica, nas rodas, nos equipamentos auxiliares e no sistema de transmissão	Caminhão pesado	-	30,0	-	McKinnon (2010)	EUA
	Melhoria da performance do veículo - conceito "top-runner"	Caminhão	-	12,5	-		Japão
	Melhorias na aerodinâmica	Caminhão	-	6 - 20	-		Reino Unido
	Melhorias na aerodinâmica	Caminhão pesado	-	85,0	-		
	Manutenção constante das rodas	Caminhão	-	2,0	-		
	Alinhamento dos eixos	Caminhão	-	3 - 8	-		EUA
	Melhorias na aerodinâmica, na redução de peso, monitoramento e manutenção contínuo, redução da velocidade máxima, adoção de lubrificantes com baixa fricção e marcha automática	Caminhão	-	33	-		
	Ecodriving	Caminhão	-	10	-		
Redução da resistência ao rolamento	Caminhão	-	3,5 - 8	-	McKinnon (2010)		Europa
Avanços tecnológicos na injeção de combustível e no abastecimento	Veículo comercial leve	Van	20 - 40	-			
Pistão de carbono em motor de combustão interna	-	-	5,0	-	European Commission (2007)	Alemanha	



**Tabela 4:** Classificação das alternativas tecnológicas por emissão de poluentes.

Fatores	Alternativa Tecnológica	Tipo de Veículo	Redução GEE (%)	COV	NOx	MP	CO <sub>2</sub>	NOx e HC	HC	CO	Referência Bibliográfica	Local
				Redução (%)								
Desenvolvimento de Novos Sistemas de Propulsão	Híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	1,0	-	-	-	-	-	-	-	Windecker, A. e Ruder, A. (2013)*	EUA
	Híbrido diesel-elétrico	Caminhão pesado	4,4 - 5,5	-	-	-	-	-	-	-		
	Elétrico a pilha combustível	Caminhão pesado	-	-	-	-	99***	-	-	-	CalHeat (2013)	EUA
	Elétrico a bateria		-	-	-	-	98***	-	-	-		
	Híbrido diesel-hidráulico		-	-	-	-	43***	-	-	-		
	Elétrico a pilha combustível**	Caminhão pesado	-	-	40,0	-	-	6,0	-	-	Lutsey, N. et al. (2007)	EUA
Híbrido diesel-elétrico	Veículo comercial leve	20 - 25	-	-	-	-	-	-	-	McKinnon (2010)	Europa	
Desenvolvimento de Novas Fontes de Energia	Gás natural comprimido	Caminhão pesado	1,8	-	-	-	-	-	-	-	Windecker, A. e Ruder, A. (2013)*	EUA
	Propano	Veículo comercial leve	1,8	-	-	-	-	-	-	-		
	Gás natural comprimido	Veículo comercial leve	1,5	-	-	-	-	-	-	-		
	Biocombustível	Caminhão	-	-	-	-	20***	-	-	-	CalHeat (2013)	EUA
	Hidrogênio	pesado	-	-	-	-	95***	-	-	-		
	Propano	Caminhão leve	18 - 20	-	-	-	-	-	-	-	TIAX LLC (2007)	EUA
	Gás natural comprimido		11 - 23	72	0 - 4	-	-	-	-	-		
	Diesel de baixo enxofre		-	-	-	-	-	-	-	-		
	20% de biodiesel		10 - 13	20,0	3	8,0	-	-	-	10,0		
30% de diesel renovável	20		-	-	-	-	-	-	-			

\*Valores de redução de GEE (%) representam aumento de redução por 10.000 milhas

\*\*Em unidades de energia auxiliares

\*\*\*Projeções para 2050

**Tabela 5 - continuação:** Classificação das alternativas tecnológicas por emissão de poluentes.

Fatores	Alternativa Tecnológica	Tipo de Veículo	Redução GEE (%)	COV	NOx	MP	CO <sub>2</sub>	NOx e HC	HC	CO	Referência Bibliográfica	Local
				Redução (%)								
Desenvolvimento de Novas Fontes de Energia	Biogás proveniente do esgoto	-	97,0	-	-	-	-	-	-	-	Volvo (2012)	EUA
	Diesel sintético da celulose	-	92,0	-	-	-	-	-	-	-		
	Biodiesel de soja e beterraba	-	73,0	-	-	-	-	-	-	-		
	Etanol da celulose	-	86,0	-	-	-	-	-	-	-		
	Etanol de grão	-	66,0	-	-	-	-	-	-	-		
	Biodiesel parafínico de palma	Caminhão pesado	-	-	-	21,3 - 34,2	-	-	13,6 - 23,3	27,2 - 28,3	Lin et al. (2011)	Taiwan
	Gás de petróleo liquefeito (LPG)	-	-	-	-	12,0	-	-	-	Boretti, A. (2013)	Australia	
Aprimoramento de Tecnologia Convencional	Conjunto de melhorias como baixa resistência ao rolamento, redução de peso e a adoção de sistemas inteligentes	Caminhão pesado	-	-	-	-	52,0***	-	-	-	CalHeat (2013)	EUA
	Sistema híbrido-elétrico paralelo, limite de velocidade de 60 milhas/h, melhorias da aerodinâmica e baixa resistência ao rolamento	Caminhão pesado	-	-	-	-	40,0	-	-	-	Pew Center on Global Climate Change (2011-b)	EUA
	Pistão de carbono em motor de combustão interna	-	-	-	-	-	-	-	40,0	55,0	European Commission (2007)	Alemanha

\*\*\*Projeções para 2050

Dentre os outros estudos que avaliaram o aspecto financeiro, o menor custo adicional é de um sistema de propulsão elétrico a pilha combustível em unidades de energia auxiliares em caminhão pesado, que apresentou o custo de US\$1.500,00/unidade, porém com baixa economia de combustível (4%). Esse sistema também apresentou maior redução da emissão de NO<sub>x</sub> (40%). Em contrapartida, o maior custo adicional de implantação de alternativa tecnológica foi do caminhão pesado (guindaste) híbrido diesel-elétrico (US\$55.300,00/unidade), apresentando baixa economia de combustível (2%). Em relação ao desenvolvimento de novas fontes de energia, o maior custo adicional foi do gás natural comprimido aplicado em caminhão pesado para limpeza de rua, com US\$72.500,00/unidade.

Quanto ao aprimoramento de tecnologias convencionais que melhoram a aerodinâmica do veículo, as que apresentaram maior economia de combustível foram as melhorias empregadas no projeto aerodinâmico em um caminhão pesado, com 85% de economia, e um conjunto de melhorias na aerodinâmica em caminhões médios e pesados, com 51% de economia. Em relação a essas tecnologias, pode-se concluir que quanto maiores forem as intervenções para a melhoria da aerodinâmica dos veículos, melhores serão os resultados quanto à economia de combustível, dependendo do regime operacional a que o veículo está submetido. Porém, a adoção de mais mudanças requer um custo adicional maior por unidade (US\$84.600,00 – US\$90.000,00/unidade para o conjunto de melhorias).

Por outro lado, os menores custos adicionais são encontrados na adoção de apenas uma única medida, como adotar uma extensão da cabine para ligá-la direto ao implemento (US\$300,00 – US\$500,00/unidade), adotar um teto aerodinâmico na cabine (US\$500,00 – 1.000,00/unidade) e uma “cauda” no veículo (US\$1.500,00 – US\$2.000,00/unidade). Porém, adotando apenas essas medidas unicamente, verifica-se uma baixa economia de combustível (entre 2% e 10%).

Vale ressaltar também que a revisão bibliográfica narrativa identificou casos com uma alta economia de combustível combinado com custos adicionais de implantação de alternativa tecnológica não muito altos, como o que foi apresentado pelas pesquisas de um caminhão pesado (caçamba) híbrido diesel-elétrico (US\$30.000,00/unidade e promovendo uma economia de combustível de 40%) e um conjunto de melhorias na aerodinâmica num veículo comercial leve (US\$14.710,00/unidade com 45% de economia de combustível) e num caminhão pesado (US\$49.870,00/unidade com 50% de economia de combustível). Porém, nesses casos não foram avaliadas as emissões de poluentes atmosféricos.

Quanto aos estudos que avaliaram os aspectos ambientais, as tecnologias que promoveram uma maior redução da emissão de GEE foram o sistema híbrido diesel-hidráulico com uso de gás natural comprimido, aplicado em um caminhão pesado (27%) e o sistema híbrido diesel-elétrico aplicado em veículo comercial leve (20% – 25%). Dentre as novas fontes de energia, as que reduzem mais emissão são o biogás proveniente do esgoto (97%) e o diesel sintético de celulose (92%), sendo que o biogás apresenta a maior economia de combustível dentre as novas fontes de energia pesquisadas (36%).

Em relação à redução de emissão de poluentes atmosféricos, o veículo elétrico a bateria e a pilha a combustível e o uso de hidrogênio como nova fonte de energia foram os que apresentaram maior redução de CO<sub>2</sub> (99%, 98% e 95%, respectivamente). Esse estudo estima essa redução para 2050 e não considera todo o ciclo de vida do veículo e do combustível. Além desses sistemas, destaca-se o híbrido diesel-elétrico em paralelo com melhorias da

aerodinâmica e baixa resistência ao rolamento (40%). Este conjunto também apresentou maior redução da emissão de CO (55%), porém é o mais caro para adoção, custando U\$90.000,00/unidade.

O biodiesel parafínico de palma é o que apresenta maior redução da emissão de MP (21,3 - 34,2%) e o gás natural comprimido apresenta maior redução da emissão de COV (72%). Por último, um pistão de carbono adicionado num motor de combustão interna é o que apresenta maior redução de HC (40%), porém apresentando também uma baixa economia de combustível (5%).

A partir desta revisão observa-se dificuldade em encontrar uma alternativa tecnológica que consiga atingir os três atributos: (1) baixo custo adicional de implementação da tecnologia; (2) alta economia de combustível e (3) alta redução de emissão de poluentes atmosféricos simultaneamente. Por meio da revisão bibliográfica narrativa realizada para este artigo conclui-se que é possível conciliar dois desses três atributos considerados, como é o caso do sistema elétrico a pilha combustível em unidades de energia auxiliares em caminhão pesado, do sistema híbrido diesel-elétrico num caminhão pesado (caçamba), do propano aplicado em veículos comerciais leves e um conjunto de melhorias no projeto e aerodinâmica do veículo.

## 5. CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica narrativa mostrou-se uma metodologia adequada para elaboração deste artigo, possibilitando o alcance dos objetivos propostos neste estudo. Por meio dela, foi possível a identificação das alternativas tecnológicas para o transporte rodoviário de carga brasileiro que visem a redução do consumo de combustível e a redução das emissões de poluentes atmosféricos e GEE, sendo verificadas nas Tabelas 1 e 2 deste artigo.

Recomenda-se, para estudos futuros, que seja feita outra modalidade de revisão bibliográfica, que considere um número maior de estudos em locais diferenciados, e que se possa estabelecer um critério de avaliação desses trabalhos, garantindo assim a qualidade do material selecionado. Recomenda-se também que seja usada uma técnica de análise mais aprofundada que vise classificar e hierarquizar os resultados.

## AGRADECIMENTOS

Para o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Confederação Nacional do Transporte (CNT) Ao Serviço Social do Transporte (SEST), o Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SENAT), e também para o Instituto de Transporte e Logística (ITL) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becheikh, N., Landry, R.; Amara, N. (2006) *Lessons from innovation empirical studies in the manufacturing sector: A systematic review of the literature from 1993-2003*. Technovation, V. 26, p. 644-664.
- Boretti, A. (2013) *Conversion of a heavy duty truck diesel engine with an innovative power turbine connected to the crankshaft through a continuously variable transmission to operate compression ignition dual fuel diesel-LPG*. Fuel Processing Technology 113, p. 97-108.
- CalHeat (2010) *California Hybrid, Efficient and Advanced Truck Research Center*. Estados Unidos.
- CalHeat (2013) *CalHEAT Technology Roadmap*. CalHEAT Forum, Estados Unidos.
- CNT (2012) *A Fase P7 do PROCONVE e o Impacto no Setor de Transporte*. Despoluir – Programa Ambiental do Transporte. Confederação Nacional do Transporte.
- D'Agosto, M. A., Ribeiro, S. K. and Souza, C. D. R. (2013) *Opportunity to reduce greenhouse gas by the use of alternative fuels and technologies in urban public transport in Brazil*. Current Opinion in Environmental Sustainability 5, p.177-183

- European Commission (2006) Directorate-General for Energy and Transport. Road Transport Policy – Open roads across Europe.
- European Commission (2007) Directorate-General for Energy and Transport. EU Research in Road Transport.
- Greenpeace (2013) *Energy [R]evolution: Brazilian Scenario*. Obtido em: [http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/image/2013/Agosto/Revolucao\\_Energetica.pdf](http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/image/2013/Agosto/Revolucao_Energetica.pdf)
- ITF (2013) *Statistics Brief – Trends in the Transport Sector*. International Transport Forum.
- Lin, Y. C., Liu, S. H., Chen, Y. M. and Wu, T. Y. (2011) *A new alternative paraffinic–palmbiodiesel fuel for reducing polychlorinated dibenzo-p-dioxin/dibenzofuran emissions from heavy-duty diesel engine*. Journal of Hazardous Materials 185, p.1–7.
- Lutsey, N., Brodrick, C. J. and Lipman, T. (2007) *Analysis of potential fuel consumption and emissions reductions from fuel cell auxiliary power units (APUs) in long-haul trucks*. Energy 32, p. 2428–2438.
- McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M. and Whiteing A. (2010) *Green Logistics – Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. Kogan Page, Reino Unido.
- MME (2012) *Plano Decenal Brasileiro de Energia 2021*. Ministério de Minas e Energia, Brasil.
- Pew Center on Global Climate Change (2011-a) *Medium- and Heavy-Duty Vehicles*. Climate TechBook. Estados Unidos,
- Pew Center on Global Climate Change (2011-b) *Reducing Greenhouse Gas Emissions*. Estados Unidos.
- Ribeiro, S. K., Kobayashi, S., Beuthe, M., Gasca, J., Greene, D., Lee, D. S., Muromachi, Y., Newton, P. J., Plotkin, S., Sperling, D., Wit, R. and Zhou, P. J. (2007) *Transport and its infrastructure, in Climate Change 2007: Mitigation*, ed B Metz, OR Davidson, PR Bosch, R Dave and LA Meyer, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge
- Sindigás (2007) *GLP no Brasil – Perguntas frequentes*. Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Gás Liquefeito de Petróleo, Rio de Janeiro, Brasil.
- The National Academies Press (2010) *Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles*. Estado Unidos.
- The National Academies Press (2012) *Review of the 21st Century Truck Partnership*. Second Report. Estados Unidos.
- TIAX LLC (2007) *Full Fuel Cycle Assessment: Well-To-Wheels Energy Inputs, Emissions, And Water Impacts*. Consultant Report. Estados Unidos.
- Volvo (2009) *A Volvo Trucks e o Meio Ambiente*. Volvo Truck Corporation. Brasil.
- Volvo (2012) *Alternative fuels for heavy duty Vehicles*. Volvo Group Truck Technology Presentation. Estados Unidos.
- Windecker, A. e Ruder, A. (2013) *Fuel economy, cost, and greenhouse gas results for alternative fuel vehicles in 2011*. Transportation Research Part D, 23, p.34–40.