

DA MATURIDADE DAS INOVAÇÕES AMBIENTAIS AUTOMOTIVAS PARA REDUZIR GASES DE EFEITO ESTUFA AO SURGIMENTO DAS TECNOLOGIAS DISRUPTIVAS

MARIA TEREZA SARAIVA DE SOUZA

Centro Universitário da FEI, Programa de Pós-Graduação em Administração, Brazil
mtereza@fei.edu.br

ORLANDO DE SALVO JUNIOR

Centro Universitário da FEI, Brazil
orlando.salvo@terra.com.br

RESUMO

A concentração de Gases de Efeito Estufa – GEE na atmosfera tem fomentado investimentos em tecnologias de baixo carbono, principalmente no setor de transporte para reduzir as emissões de CO₂ resultado da queima de combustíveis fósseis. Neste contexto, as montadoras têm produzido automóveis com menor consumo de combustível para atender a demanda crescente de melhoria da eficiência energética. O objetivo deste estudo é analisar a transição das inovações ambientais incrementais automotivas de redução de GEE até o surgimento das novas tecnologias disruptivas. Para atingir este objetivo, o método utilizado é a pesquisa qualitativa descritiva e a coleta de dados foi realizada por meio da pesquisa documental. Os resultados da pesquisa mostram que para cumprir as exigências de aumento de eficiência energética nacional e redução de GEE, os motores ciclo Otto receberam novas tecnologias e o aprimoramento de outras. Entretanto, todas estas inovações ambientais introduzidas no setor automotivo são incrementais, por reduzir parcialmente as emissões de CO₂, até a consolidação das tecnologias disruptivas como as inovações semi-radiciais, veículos híbridos, e as inovações radicais, veículos elétricos e movidos a célula de combustível, que eliminam a emissão direta de CO₂ com esta nova tecnologia de propulsão.

Palavras-chave: Inovação Tecnológica; Inovação Ambiental; Tecnologias Ambientais; Gases de Efeito Estufa; Indústria automobilística.

1 INTRODUÇÃO

A expansão econômica das últimas décadas tem sido acompanhada de crescente preocupação ambiental, disponibilidade de energia e limitação da disponibilidade dos recursos. As ameaças ambientais ao bem-estar social e econômico, em função das mudanças climáticas, têm sido um desafio para as economias na busca de tecnologias para a produção de energia de baixo carbono. A crescente preocupação em reduzir as emissões de GEE tem forçado os governos a buscar soluções e um dos instrumentos tem sido o desenvolvimento de tecnologias ambientais como forma de estímulo econômico (OECD, 2009).

A matriz energética brasileira é ampla e conta com combustíveis renováveis e não renováveis, como os combustíveis fósseis, que são fontes finitas e um dos principais responsáveis por emissões de CO₂ na atmosfera (Silva, Spers, Wright, & Costa, 2013). Para Ribeiro e Abreu (2008) a redução das emissões de dióxido de carbono no Brasil depende da migração do uso de derivados de petróleo, na área de transportes, para as opções disponíveis na matriz de energia do país, e também com a melhoria do rendimento energético dos veículos. Outra oportunidade de redução de GEE é a

renovação da frota, forçando a substituição por veículos novos, com maior eficiência energética. No entanto, esta ação depende da participação do governo, para subsidiar a diferença entre o valor do veículo e o ganho com as emissões de carbono evitadas (Guimarães & Lee, 2010).

A análise e levantamento sobre o regime tecnológico pode esclarecer as dinâmicas que levam ao processo da inovação ambiental (Oltra & Saint Jean, 2009). As inovações ambientais implementadas nos veículos focaram a redução das emissões de CO (monóxido de carbono), NOx (óxidos de nitrogênio) e COV (composto orgânico volátil, que inclui os hidrocarbonetos), e o desafio da atualidade está em reduzir os GEE, mais diretamente a redução de CO₂ dos automóveis. As tecnologias alternativas de sistemas de propulsão elétricos apresentam algumas restrições, seja por motivos técnicos e/ou de infraestrutura, e por este motivo existe grande investimento da indústria automobilística na busca por inovações, para melhoria de eficiência e consequente redução nas emissões dos atuais motores à combustão interna (Ahman, 2001).

A inovação ambiental visa à exploração de um produto ou modelo de negócio que reduza o impacto ambiental, comparado ao que se usa como alternativa para tal fim (Kemp & Pearson, 2007). Engloba este conceito qualquer tipo de inovação com foco no desenvolvimento sustentável, utilizando os recursos naturais de forma mais eficiente (European Commission, 2007). Adicionalmente, inovação ambiental visa o desenvolvimento de novos produtos para satisfazer a necessidade humana e melhoria da qualidade de vida, usando os recursos naturais de forma otimizada e minimizando as emissões (Reid & Miedzinski, 2008). Os fundamentos da inovação ambiental apontam para a otimização de recursos e processos, levando em consideração a eficiência ao longo do ciclo de vida. Soluções nas áreas de geração de energia renovável e automóveis mais eficientes exigem mudanças não somente de produtos e processos, mas também de infraestrutura, e só podem ser concluídos no longo prazo. Planejamento e amplo investimento são exigidos para a melhoria do desempenho ambiental nestas áreas (Rennings, 2000).

Neste cenário, as montadoras têm implementado inovações tecnológicas ambientais em seus produtos, difundindo estas melhorias para os diversos países onde atuam. Estas inovações são predominantemente incrementais, mas também inovações semi-radicais, como o veículo híbrido, e mesmo a inovação radical, como o veículo elétrico e a célula de combustível. Em função do impacto das emissões dos automóveis, este estudo tem como objetivo analisar a transição das inovações ambientais incrementais automotivas de redução de GEE até o surgimento das novas tecnologias disruptivas. Dessa forma, este estudo busca contribuir para a estruturação de informações sobre as tecnologias ambientais automobilísticas relacionadas ao sistema de propulsão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica discorre sobre os conceitos de eco-inovação e inovação ambiental; os fatores determinantes para a inovação ambiental. Trata ainda de pesquisa sobre inovação ambiental tecnológica no setor automotivo, com o objetivo de analisar os tipos de inovação introduzidos no motor ciclo Otto.

2.1 Discutindo conceitos de eco-inovação e inovação ambiental

Segundo Kemp e Pearson (2007), na década de 1990 alguns dados sobre investimento em inovação ambiental na Europa foram identificados nas áreas de controle de poluição e tecnologias mais

limpas. Kemp e Pontoglio (2011) mostram que a distinção entre inovação incremental e radical é de grande relevância na avaliação de inovação tecnológica para a redução das emissões de carbono. A inovação em tecnologia ambiental ou eco-inovação, segundo a definição do relatório do *Institute for Environmental Studies (IVM)* (2006), desempenha um papel no sentido de otimizar o uso de recursos naturais e redução de impacto ambiental.

Os tipos de inovação podem ser descritos como: incremental, que proporciona pequenas melhorias no produto atual, aproveitando o máximo da plataforma existente, otimizando desta forma os custos, e este é o tipo mais utilizado pelas empresas; semi-radical, que confere mudança significativa na tecnologia atual ou no modelo de negócio em vigor; radical, que muda significativamente a tecnologia e o modelo de negócio, simultaneamente. O setor automobilístico usa com frequência a inovação incremental para oferecer novos modelos de veículo aos clientes. O uso balanceado dos três tipos proporciona um portfólio que melhor se adequa à necessidade de cada empresa, permitindo o uso de cada um conforme a estratégia de negócio e a opção de tecnologia (Davila et al., 2007). A Figura 1 apresenta a matriz da inovação, ilustrando os tipos de inovação e a relação com as mudanças tecnológicas e do modelo de negócio.

Figura 1. Matriz da inovação

Tecnologia	Nova	Semi-radical	Radical
	Semelhante à atual	Incremental	Semi-radical
		Semelhante ao atual	Novo
		Modelo de Negócio	

Fonte: Davila, Epstein e Shelton (2007)

Kemp e Pontoglio (2011) apontaram as formas de avaliar a relação entre inovação ambiental e políticas. Com base neste estudo, os autores formularam algumas proposições sobre os resultados da inovação em função dos instrumentos da política ambiental. A primeira diz respeito à distinção entre inovação incremental e radical, que é de grande relevância para o caso de solução tecnológica inovativa para a redução das emissões de carbono. Para este caso é relevante distinguir o que é novo para o mundo, que pode ser medido por patentes, e os demais casos que se classificam como adoção da inovação. A segunda proposição aborda a relação entre legislador e empresas, que deve ser bidirecional, visando o exercício de influência positiva de um sobre o outro.

Para Zapata e Nieuwenhuis (2010), as demandas em função de mudanças climáticas têm buscado ajustes no setor automobilístico por meio de inovação, que pode ser radical ou de ruptura. A mudança radical oferece algo novo e desconhecido para os consumidores, podendo gerar uma nova demanda, enquanto a ruptura se refere a uma nova tecnologia, com destaque da inovação para os valores que superam o modelo dominante de mercado.

2.2 Fatores determinantes para inovação ambiental

Para os consumidores, a aquisição de um automóvel com maior eficiência energética representa aumento no valor do produto, o que desfavorece a aquisição de tais tecnologias. A melhora na eficiência dos motores permite tanto a economia de combustível como também a aplicação de motores menores em veículos maiores, neste último caso mantendo o consumo (Plotkin, 2009).

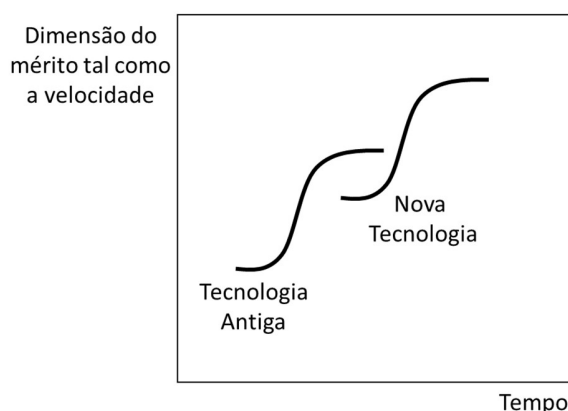
A inovação ambiental pode ter como origem a legislação, mas a inovação também pode ocorrer antes da legislação e assim influenciar o processo político para consolidar a regulamentação. Outro entendimento está relacionado a como a política é traçada, qual aspecto tem maior influência sobre a inovação e o tipo de instrumento aplicado, o que pode ser interpretado na forma como o instrumento político é desenhado. Este entendimento pode ser ainda complementado com a flexibilidade da política, o que pode fomentar a sua difusão e ampliar os benefícios. A combinação entre instrumentos de política pode potencializar a inovação em relação à regulamentação (Kemp & Pontoglio, 2011).

A análise dos padrões da mudança tecnológica pode ser feito com base em levantamento de patentes. A mudança tecnológica pode atender a legislação, mas também confere uma oportunidade competitiva às empresas mercado (Lee & Lee, 2013). As novas demandas por maior eficiência dos automóveis (Jin et al., 2015) abrem espaço para uma realidade com novas tecnologias, que vão desde a melhoria do motor a combustão interna até os veículos elétricos (Oshiro & Masui, 2015). A velocidade da mudança de cada tecnologias irá determinar quais irão prevalecer, em um ambiente que demanda melhoria para cumprir a legislação e atender a necessidade do público. Estas incertezas geram riscos e oportunidades para montadoras investirem nas estratégia de novas tecnologias e modelo de negócio (Kemp & Pearson, 2007) que atendam as estas novas demandas de mercado (Lee & Lee, 2013).

A indústria automobilística tem respondido aos quesitos ambientais com mudanças tecnológicas sobre a base de motorização atual, mas também desenvolve novas soluções para responder às necessidades de longo prazo. Este segmento da indústria mantém uma base de conhecimento acumulada, a qual fortalece o processo de inovação e assim se resguarda diante de novos competidores. (Oltra & Saint Jean, 2009).

Uma tecnologia disruptiva apresenta propriedades com diferenças relevantes em relação ao padrão dominante do mercado. A fase inicial de mercado apresenta participação reduzida, com ampliação conforme a evolução do produto. Esta condição leva as empresas a decidirem entre investir no processo regular ou partir para tecnologias com potencial disruptivo. A dificuldade em identificar tecnologias disruptivas ocorre em função deste atributo ser identificado após implementação (Zapata & Nieuwenhuis, 2010). Autores que estudam tecnologias por vezes se concentram no atributo mais relevante do produto para o público no momento que a inovação vai para o mercado. A dinâmica de transição entre tecnologias com base no tempo direcionou o estudo do conceito sobre a forma-S, que analisa a diferença de velocidade da evolução entre duas tecnologias. A entrada de uma nova tecnologia no mercado apresenta baixa taxa de evolução, enquanto a tecnologia vigente está em evolução. Quando esta tendência se inverte, a nova tecnologia passa a apresentar rápida evolução enquanto a tecnologia usual apresenta estagnação. Este comportamento na evolução de diferentes tecnologias é explicado pela sobreposição, que só acontece uma vez, continua de curvas-S (Hauser, Tellis, & Griffin, 2006). Baseado neste conceito a Figura 2 apresenta a relação de evolução das tecnologias ao longo do tempo.

Figura 2. Curvas-S idealizadas para evolução tecnológica



Fonte: Hauser, J., Tellis, G. J., & Griffin, A. (2006)

Como exemplo de mudança disruptiva, o hidrogênio pode alimentar um motor a combustão ou uma célula de combustível, com um grau de ruptura mais significativa no segundo caso, caracterizada como mudança radical (Zapata & Nieuwenhuis, 2010). Um produto disruptivo usualmente apresenta desempenho inferior ao produto de mercado, mas com alguns atributos valorizados por parte do mercado (Carrillo-Hermosilla, Del Río, & Konnola, 2010). As pesquisas sobre o momento da evolução tecnológica visa o entender a dinâmica da mudança do mercado, de como é o ciclo de vida de produtos das tecnologias concorrentes (Hauser et al., 2006).

2.3 Tecnologias ambientais para a mitigação das emissões de GEE dos automóveis

A indústria automobilística tem evoluído na redução de emissões de CO₂, para atender a metas de redução de GEE, principalmente no que tange ao uso de combustão de fonte fóssil. Em função da crescente demanda por mobilidade, o desenvolvimento de iniciativas eco-inovadoras visa o aumento da eficiência energética dos automóveis, por meio de avanços tecnológicos via modificações e *re-design*.

O levantamento de patentes realizado por Oltra e Saint Jean (2009) no setor automotivo da França identificou que 40% dos registros estão relacionados ao desempenho ambiental. As inovações em motores a combustão interna são nas áreas de melhoria de eficiência, pós-tratamento de poluentes e combustíveis alternativos (biocombustível). O estudo com foco nas políticas ambiental e de inovação permitiu uma análise de como estas se influenciam e se combinam para se adequar às exigências e demandas do mercado (Oltra & Saint Jean, 2009). Em revisão científica sobre motores a combustão interna realizada na Inglaterra, Taylor (2008) identificou que os desafios para a melhoria energética destes motores têm as seguintes motivações: atuar na redução de GEE (Dióxido de carbono, CO₂, e óxido nítrico, N₂O); desenvolver novos combustíveis; e melhoria do processo de combustão dos motores. (Taylor, 2008).

A redução do número de cilindros é conhecida como *downsizing* e geralmente estes motores são equipados com turbo (sobrealimentado) e injeção direta. O motor mais comum no mercado brasileiro (mais de 90%) é o de quatro cilindros, e o *downsizing* para o mercado local seria o motor de três cilindros (Posada & Façanha, 2015).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) programa visava a melhoria de consumo dos veículos, e algumas tecnologias ambientais estavam disponíveis em veículos nacionais antes do PBEV. A aplicação de novas tecnologias depende de um cenário propício ao equilíbrio financeiro para serem utilizadas nos veículos brasileiros, e, para as montadoras, um indutor de tecnologias ambientais para os veículos brasileiros seria seguir a tendência mundial de motores com baixas emissões. O desenvolvimento de produto das montadoras no Brasil utiliza inovação incremental, e as inovações radicais têm sido implementadas prioritariamente nos países de origem e difundidas para as filiais (Bastin, Szklo, & Rosa, 2010). Nas duas últimas décadas os motores têm recebido diversas inovações com o intuito de melhorar a eficiência energética (Plotkin, 2009).

As tecnologias abordadas são relativas ao sistema de propulsão do veículo, e a eficiência energética pode ser melhorada com tecnologias em outras partes do automóvel (não propulsão), que contribuem para o ganho geral de eficiência. Essas tecnologias melhoram a eficiência em função de reduzir o consumo de energia do sistema de propulsão. Além da redução do peso, tecnologias como a aerodinâmica, pneus de baixo atrito, direção assistida e sistema de ar condicionado podem proporcionar a redução de consumo exigido do sistema de propulsão a direção elétrica proporciona a redução de emissões de CO₂, comparada ao sistema hidráulico (National Research Council [NRC], 2015).

3 MÉTODO DE PESQUISA

O método utilizado é a pesquisa qualitativa descritiva e a coleta de dados foi realizada por meio da pesquisa documental, buscando as tecnologias de propulsão determinantes para o aumento de eficiência energética dos automóveis para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A busca de dados secundários externos contribui para ampliar o entendimento da questão em estudo, entender como outros pesquisadores abordaram este assunto e avaliar estudos que possam ser mensurados. A exploração pode iniciar com buscas *on-line*, livros e estudos para identificar os padrões e terminologias do assunto em questão e os principais autores. As fontes secundárias representam estudos e publicações que interpretaram dados primários, que são trabalhos com dados originais, ou brutos, como por exemplo dados de desempenho de um determinado setor da indústria e regulamentações (Cooper & Schindler, 2003).

Para validar os resultados a serem utilizado no estudo, o pesquisador precisa descrever as etapas aplicadas ao estudo de forma a verificar a credibilidade dos resultados. A validade para a pesquisa qualitativa representa a precisão dos resultados verificada pelo pesquisador e a confiabilidade qualitativa aponta para uma consistência entre demais pesquisadores e projetos (Creswell, 2010). Para assegurar a confiabilidade dos procedimentos usados neste estudo os dados foram minuciosamente documentados e organizados em tabelas. Enquanto a estratégia de validade utilizada foi a triangulação das diversas fontes para estabelecer convergência dos dados.

A coleta de dados foi realizada por meio da pesquisa documental, investigando as tecnologias introduzidas nos automóveis para a redução de GEE, em fontes como: artigos científicos, ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores), *European Commission*, IVM (*Institute for Environmental Studies*), NRC (*National Research Council*), OECD (*Organisation for Economic Co-Operation and Development*). Este estudo levou em consideração as tecnologias do sistema de propulsão que incluem o motor (combustão interna por centelha - ciclo Otto) e a transmissão.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA

No Brasil, a regulamentação ainda é determinante para a inovação ambiental com vistas à redução das emissões dos automóveis. A legislação e a inovação ambiental caminham na mesma direção no curto prazo (Kneller & Manderson, 2012), e a regulamentação aparece como maior indutor da inovação quando a mudança é ambiental (Horbach, 2008), em função da baixa influência do mercado (*Institute for Environmental Studies [IVM], 2006*). Estas inovações proporcionam melhoria na tecnologia ambiental dos automóveis, conferindo aumento no desempenho, com manutenção ou mesmo redução das emissões, e algumas têm origem nos veículos de competição (Zapata & Nieuwenhuis, 2010).

Na Tabela 1, as tecnologias ambientais, discutidas no referencial teórico, para a redução de emissões automotivas foram classificadas em categorias de inovação ambiental tecnológica de produto incremental, semi-radical e radical, pela análise do tipo de inovação definido por Davila, Epstein e Shelton (2007).

Tabela 1. Categorias de Inovação Tecnológica Ambiental para redução de emissões automotiva de GEE

Categorias de Análise	Elementos	Definições	Autores
Inovação Ambiental Incremental	Turbo compressor	Sobrealimentação	Zapata e Nieuwenhuis (2010); Taylor (2008); Posada e Façanha (2015); Bastin, Szklo, & Rosa (2010); Plotkin (2009); Simmons, Shaver, Tyner e Garimella (2015); National Research Council (NRC) (2015);
	Comando de válvulas variável (VVT)	Comando de válvulas variável	Zapata e Nieuwenhuis (2010); Ahman, (2001); Dijk e Yarime (2010); Posada e Façanha (2015); Bastin et al. (2010); Plotkin, (2009); Simmons et al. (2015); Taylor (2008)
	Redução do tamanho dos motores	Redução do tamanho dos motores, com diminuição da quantidade de cilindros (<i>downsizing</i>)	Taylor (2008); Zapata e Nieuwenhuis, (2010); Posada e Façanha (2015); Bastin et al. (2010); Plotkin (2009); Simmons et al. (2015); NRC (2015);
	Injeção direta de combustível	Injeção de combustível diretamente na câmara de combustão	Taylor (2008); Dijk e Yarime (2010); Posada e Façanha (2015); Bastin et al. (2010); Plotkin, (2009); Simmons et al. (2015)
	Redução do peso do veículo	Redução do peso do veículo por meio de uso de materiais mais leves	Plotkin (2009); Simmons et al. (2015); NRC, (2015); OECD (2009)
	Direção com assistência elétrica	Direção assistida por sistema elétrico	NRC, (2015)
	Taxa de compressão elevada	Aumento da taxa de compressão do motor	Ahman, (2001); Taylor (2008)
	Sistema start-stop	Desligamento do motor em marcha lenta (veículo no congestionamento)	Ahman, (2001); Taylor (2008)
	Transmissão continuamente variável (CVT)	Transmissão com variação contínua de velocidade	Ahman, (2001); Taylor (2008); Bastin et al. (2010); Simmons et al. (2015)

	Combustível alternativo	Biocombustível, etanol celulósico, biometanol	Zapata e Nieuwenhuis, (2010); Oltra e Saint Jean (2009); Bastin et al. (2010)
Inovação Ambiental semi-radical	Veículo híbrido	Veículo híbrido funciona com motor a combustão e ou motor elétrico	Zapata e Nieuwenhuis (2010); Carrillo-Hermosilla, Del Río, & Konnola (2010); Christensen (2011); Dijk e Yarime (2010); Simmons et al. (2015); Plotkin (2009); Oltra e Saint Jean (2009); Ahman, (2001); Oshiro e Masui (2015); Al-Alawi e Bradley (2013).
Inovação Ambiental Radical	Veículo elétrico	Veículo com motores elétrico e bateria.	Christensen (2011); Dijk e Yarime (2010); Oltra e Saint Jean (2009); Ahman, (2001); Oshiro e Masui (2015); Al-Alawi e Bradley (2013).
	Célula de combustível a hidrogênio	Célula de combustível a hidrogênio para gerar eletricidade e movimentar motor elétrico.	Zapata e Nieuwenhuis (2010); Christensen (2011); Oltra e Saint Jean (2009); Ahman (2001); Oshiro e Masui (2015)

Os artigos discutidos acima apresentam aplicações de inovação ambiental relacionada à tecnologia automotiva para redução das emissões de escapamento e evaporativa. Esses artigos abordam os estudos sobre P&D realizados nos últimos anos no setor automotivo, com foco na otimização de consumo e consequente redução de GEE.

A introdução de uma nova tecnologia fica por vezes vinculada à perspectiva de retorno do investimento (Zapata & Nieuwenhuis, 2010). Analisando as inovações dos últimos vinte anos, pode ser observado que muitas convergem na redução de emissões de poluentes e de consumo de energia (Ahman, 2001; Al-Alawi & Bradley, 2013; Plotkin, 2009; OECD, 2009; Oltra & Saint Jean, 2009; de Carrillo-Hermosilla et al., 2010; Oshiro & Masui, 2015; Simmons, Shaver, Tyner & Garimella, 2015; Bastin, et al., 2010; Dijk & Yarime, 2010), e a exigência regulatória (Yalabik & Fairchild, 2011; Zapata & Nieuwenhuis, 2010; Kneller & Manderson, 2012; Horbach, 2008) tem potencializado esta demanda. O processo de inovação tem focado ainda o aspecto ambiental (Kemp & Pearson, 2007; Reid & Miedzinski, 2008; Rennings, 2000; Kemp & Pontoglio, 2011; IVM, 2006; Yalabik & Fairchild, 2011; Kneller & Manderson, 2012; Horbach, 2008), em função das exigências dos mercados (Oltra & Saint Jean, 2009), e a experiência internacional tem cruzado fronteiras (Dechezleprêtre, Neumayer & Perkins, 2015) permitindo maior difusão da inovação no cumprimento das metas ambientais (Kemp & Pontoglio, 2011; Oshiro & Masui, 2015; Simmons et al., 2015). Estas dinâmicas impostas pela legislação e demanda dos mercados têm orientado as montadoras nas decisões estratégicas das novas tecnologias (Lee & Lee, 2013).

4.1 Inovação tecnológica ambiental incremental

As inovações tecnológicas ambientais incrementais introduzidas no motor a combustão convencional, visando o aumento de eficiência energética e redução de GEE, são: turbocompressor, VVT, downsizing, injeção de direta de combustível, aumento da taxa de compressão. Além destas, outras soluções foram incorporadas em outras partes do veículo como: a direção elétrica e a redução de peso do veículo.

A tecnologia *downsizing* (Taylor, 2008; Zapata & Nieuwenhuis, 2010; Posada & Façanha, 2015; Bastin et al., 2010; Plotkin, 2009; Simmons et al., 2015; NRC, 2015) para a redução do tamanho dos motores caracteriza-se por um número menor de cilindros, com consequente redução do número de componentes móveis, favorecendo a redução do atrito (NRC, 2015) e peso, para a

redução de emissões de GEE. O motor multiválvulas demonstra melhoria na eficiência quando usado em conjunto com o VVT.

A frota brasileira utiliza tradicionalmente a transmissão manual. Atualmente os veículos têm cinco velocidades, e alguns modelos já são equipados com seis. Para conferir maior conforto, mantendo baixo o custo de aquisição, os fabricantes oferecem a transmissão automatizada (Taylor, 2008). Outro dispositivo com ampliação de uso no Brasil é o sistema de direção elétrico, ou eletro-hidráulico, que utiliza assistência elétrica, e elimina a correia ligada ao motor (NRC, 2015).

Como forma de redução dos GEE, o Brasil conta com o etanol (Bastin et al., 2010; Silva et al., 2013). Este combustível renovável permite a mitigação de CO₂ durante o crescimento da planta, proporcionando uma condição favorável para a redução do aquecimento global. Em função de algumas barreiras para os veículos com propulsão elétrica, e pela disponibilidade do etanol em todo o território nacional (Bastin et al., 2010), o motor a combustão interna se mantém como alternativa viável no Brasil em médio prazo. Para que este tipo de propulsão melhore a contribuição ambiental, existe a necessidade do aumento da eficiência energética (Bastin et al., 2010), com a introdução de inovações tecnológicas ambientais incrementais, de maneira a melhorar o rendimento térmico e reduzir as emissões de GEE em em cada um dos combustíveis.

4.2 Inovação tecnológica ambiental semi-radical

Como forma de oferecer uma solução de transição entre a inovação incremental e a inovação radical, a inovação tecnológica ambiental semi-radical permite maior flexibilidade e facilidade de uso por combinar o motor convencional e a propulsão elétrica, exigindo menor infraestrutura e proporcionando autonomia por se comportar como um veículo convencional no abastecimento. No caso do híbrido *plug-in* (Al-Alawi & Bradley, 2013; Simmons et al., 2015; Oshiro & Masui, 2015), a autonomia do veículo é ampliada em função da possibilidade de carregar a bateria. A tecnologia que tem se difundido no território brasileiro é o veículo híbrido (Zapata & Nieuwenhuis, 2010; Carrillo-Hermosilla et al., 2010; Christensen, 2011; Dijk & Yarime, 2010; Simmons *et al.*, 2015; Plotkin, 2009; Oltra & Saint Jean, 2009; Ahman, 2001), seja convencional ou *plug-in*, mas ambos permitem o abastecimento pelo tanque de combustível, e, no caso do *plug-in*, o abastecimento também ocorre para a bateria, que é feito por meio de equipamento para a carga.

4.3 Inovação tecnológica ambiental radical

As inovações tecnológicas que apontam como solução para atender a legislação cada vez mais restritiva é a inovação radical, que deverá se perpetuar nas próximas décadas, como os veículos elétrico e movidos a célula de hidrogênio, pelo fato de terem emissão zero.

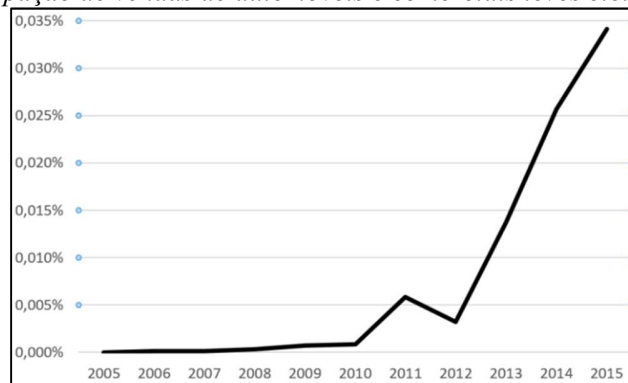
Os veículos elétricos (Christensen, 2011; Dijk & Yarime, 2010; Oltra & Saint Jean, 2009; Ahman, 2001) dependem de uma infraestrutura para o abastecimento, tempo para a carga da bateria e a autonomia está vinculada à capacidade de armazenamento da bateria.

No caso dos veículos movidos a célula de hidrogênio, o processo de obtenção do hidrogênio demanda muita energia (Zapata & Nieuwenhuis, 2010; Oltra & Saint Jean, 2009; Oshiro & Masui, 2015). Para este tipo de veículo o desafio ainda é maior, pois depende de infraestrutura para a distribuição e abastecimento, além de inovações tecnológicas para o processo de extração do hidrogênio (Zapata & Nieuwenhuis, 2010; Christensen, 2011; Oltra & Saint Jean, 2009; Ahman,

2001). Semelhante ao veículo elétrico, esta tecnologia não é desenvolvida no Brasil, e por enquanto não existem veículos circulando na frota.

Em diferentes etapas na linha do tempo, as três tecnologias - híbrido, elétrico e célula de combustível - aparecem como o futuro da propulsão automobilística, mas cada uma depende de soluções para atender à demanda do público (Dijk & Yarime, 2010; Bastin et al., 2010) quanto ao preço, autonomia e facilidade de abastecimento. Além destas melhorias, por se tratar de tecnologias diferentes do motor a combustão interna, a manutenção destes veículos exige atendimento especializado, com equipamentos especiais e treinamento de pessoas para lidar com manutenção dos sistemas elétricos, e instalações de dispositivos nas residências para a carga de bateria (Carrillo-Hermosilla et al., 2010). Na figura 3 pode ser observado o volume de vendas dos veículos elétricos no mercado brasileiro, que engloba versões de fonte elétrica interna ou externa e híbridos.

Figura 3 – Participação de vendas de automóveis e comerciais leves elétricos (2005 a 2015)



Fonte: ANFAVEA, 2016

4.4 Métrica de eficiência energética da frota nacional

O cálculo de emissões de CO₂ dos veículos tem como variável o peso do veículo, o que aponta para uma relação entre peso e consumo de combustível. Em função desta relação, uma das soluções utilizadas pela indústria automobilística é a redução do peso dos veículos (Plotkin, 2009; Simmons et al., 2015; NRC, 2015; OECD, 2009), aplicando materiais mais leves em alguns componentes, simplificando mecanismos ou substituindo-os por dispositivos que desempenhem a mesma função, mas com menos componentes (Simmons et al., 2015). No Brasil, o investimento na redução de peso e em outras melhorias, como aerodinâmica e resistência ao rolamento, ainda recebem investimento inferior em relação às matrizes para o desenvolvimento destas tecnologias (Bastin et al., 2010).

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo é analisar a transição das inovações ambientais incrementais automotivas de redução de GEE até o surgimento das novas tecnologias disruptivas. Os resultados dessa pesquisa mostraram que a inovação tecnológica ambiental passa a fazer parte das estratégias das montadoras, com investimentos em P&D para o aumento da eficiência energética dos automóveis e redução de GEE, incluindo mudanças no sistema de propulsão e demais partes do veículo, para atender principalmente os requisitos da regulamentação.

Esse estudo possibilitou classificar as tecnologias ambientais automotivas para mitigar as emissões de GEE em três tipos abordados na teoria: inovação incremental, inovação semi-radical e inovação radical.

As inovações tecnológicas incrementais no sistema de propulsão estão relacionadas ao motor e à transmissão, que já eram conhecidas pela indústria nacional. A inovação, neste caso, ocorreu em função da adequação para o aumento da eficiência energética, anteriormente utilizada para o aumento de potência dos veículos. Tecnologias como turbocompressor e comando de válvulas variável, desde a década de 1990 equipavam poucos modelos, mas com a atual regulamentação essas tecnologias evoluíram e passaram a equipar modelos de entrada.

Além da motorização, a transmissão também tem influência no consumo de combustível. Para oferecer maior conforto aos usuários, o leque de modelos tem se ampliado, com transmissões sem pedal de embreagem, como a automática, de dupla embreagem, automatizada e CVT. Todas estas transmissões apresentam algum nível de perda de energia em relação à transmissão manual, a mais utilizada no Brasil.

A regulamentação fomentou a inovação tecnológica nacional, com a introdução do *downsizing* e injeção direta, e também a difusão de tecnologias conhecidas, como o turbocompressor e o comando de válvulas variável, todas estas são inovação incremental. Como a introdução de novas tecnologias em veículos de entrada tem como barreira o aumento no preço final do produto, a regulamentação atua como moderador tecnológico, promovendo a entrada destas tecnologias antes restritas aos modelos mais caros, de forma a favorecer a eficiência energética com a disponibilidade de veículos mais econômicos.

Sobre as mudanças tecnológicas nos automóveis, as inovação ambiental tem ocorrido continuamente no veículo com motor a combustão, que envolve introdução e substituição de tecnologias da motorização, melhoria na eficiência do sistema de transmissão, ambas recebendo diversos dispositivos com assistência eletrônica. Na estrutura do veículo também tem ocorrido redução de peso, melhoria na aerodinâmica e resistência ao rolamento, todas estas soluções visam a redução do consumo de combustível.

As tecnologias intermediárias do ciclo Otto, híbridos ou híbrido *plug-in*, promovem a inovação tecnológica ambiental semi-radical, com tecnologias disruptivas. As tecnologias de motorização elétrica oferecem a maior redução de GEE, mas ainda possuem barreiras à difusão. Em função destas questões os veículos eletrificados ainda não são produzidos no Brasil.

Somente as inovações tecnológicas ambientais radicais, como os modelos elétricos ou com célula de combustível a hidrogênio eliminam as emissões diretas de CO₂ por não utilizarem combustíveis fósseis, mas a restrição ainda é o baixo volume de vendas, em função do custo de aquisição e manutenção. As maiores limitações são o abastecimento, seja elétrico, pela limitada autonomia, ou a célula combustível, pelo alto custo do processo de obtenção do hidrogênio e da baixa escala de produção.

Estabelecendo uma relação entre o estreitamento da regulamentação e as tecnologias automotivas para atenderem estas exigências, pode-se identificar que a inovação tecnológica ambiental incremental deverá cumprir as metas até os próximos anos, até o encerramento do Ciclo Otto. A inovação tecnológica ambiental semi-radical terá o papel de transitar do modelo incremental até a consolidação das inovações radicais, com o fim das barreiras atuais que impedem a difusão destas tecnologias.

A inovação tecnológica ambiental radical está relacionada aos carros elétricos e células de hidrogênio, que mesmo assim altera parcialmente o modelo de negócio da cadeia, mudando apenas a cadeia de abastecimento do hidrogênio e os carros elétricos passam a ser abastecidos nas residências.

REFERÊNCIAS

- Ahman, M. (2001). Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles. *Energy*, 26(x), 973–989.
- Al-Alawi, B. M., & Bradley, T. H. (2013). Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 190–203. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.048>
- ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. (2016). *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*. Recuperado de <http://www.anfavea.com.br/anoario.html>
- Bastin, C., Szklo, A., & Rosa, L. P. (2010). Diffusion of new automotive technologies for improving energy efficiency in Brazil' s light vehicle fleet. *Energy Policy*, 38(7), 3586–3597. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.036>
- Carrillo-Hermosilla, J., Del Río, P., & Könnölä, T. (2010). Diversity of eco-innovations: Reflections from selected case studies. *Journal of Cleaner Production*, 18(10–11), 1073–1083. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.014>
- Christensen, T. B. (2011). Modularised eco-innovation in the auto industry. *Journal of Cleaner Production*, 19(2–3), 212–220. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.015>
- Cooper, D. R., & Schindler P. S. (2003). *Métodos de pesquisa em administração*. Porto Alegre: Bookman.
- Creswell, J. W. (2010). *Projeto de Pesquisa: métodos qualitativos, quantitativos e misto*. Porto Alegre: Artmed.
- Davila, T.; Epstein, M. J.; Shelton, R. (2007). *As regras da Inovação: Como gerenciar, como medir e como lucrar*. Porto Alegre: Bookman.
- Dechezleprêtre, A., Neumayer, E., & Perkins, R. (2015). Environmental regulation and the cross-border diffusion of new technology : evidence from automobile patents February 2012 Centre for Climate Change Economics and Policy. *Research Policy*, 44(85), 244–257. <http://doi.org/10.1016/j.respol.2014.07.017>
- Dijk, M., & Yarime, M. (2010). Technological Forecasting & Social Change The emergence of hybrid-electric cars : Innovation path creation through co- evolution of supply and demand. *Technological Forecasting & Social Change*, 77(8), 1371–1390. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.05.001>
- European Commission. (2007). *Competitiveness and Innovation Framework Programme 2007 to 2013*. Brussels. Recuperado de http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/legal_basis/fp/h2020-eu-establact_en.pdf.
- Guimarães, L. E., & Lee, F. (2010). Levantamento do perfil e avaliação da frota de veículos de passeio brasileira visando racionalizar as emissões de dióxido de carbono. *Sociedade & Natureza*, 22(3), 577–592.
- Hauser, J., Tellis, G. J., & Griffin, A. (2006). Research on Innovation: A Review and Agenda for Marketing Science. *Marketing Science*, 25(6), 687–717. <http://doi.org/10.1287/mksc.1050.0144>

- Horbach, J. (2008). Determinants of environmental innovation—New evidence from German panel data sources. *Research Policy*, 37(1), 163–173. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.respol.2007.08.006>
- IVM - Institute for Environmental Studies. (2006). *Innovation dynamics induced by environmental policy: final report*. Recuperado de http://ec.europa.eu/environment/enveco/policy/pdf/2007_final_report_conclusions.pdf
- Jin, Y.-F., Wang, Z., Gong, H.-M., Zheng, T.-L., Bao, X., Fan, J.-R., ... Guo, M. (2015). Review and evaluation of China's standards and regulations on the fuel consumption of motor vehicles. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(5), 735–753. <http://doi.org/10.1007/s11027-015-9636-1>
- Kemp, R., & Pearson, P. (2007). Final report MEI project about measuring eco- innovation. *European Environment*. Recuperado de <http://www.oecd.org/env/consumption-innovation/43960830.pdf>
- Kemp, R., & Pontoglio, S. (2011). The innovation effects of environmental policy instruments - A typical case of the blind men and the elephant? *Ecological Economics*, 72, 28–36. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.09.014>
- Kneller, R., & Manderson, E. (2012). Environmental regulations and innovation activity in UK manufacturing industries. *Resource and Energy Economics*, 34(2), 211–235. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2011.12.001>
- Lee, K., & Lee, S. (2013). Patterns of technological innovation and evolution in the energy sector : A patent-based approach. *Energy Policy*, 59, 415–432. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.054>
- NRC – National Research Council. (2015). *Cost, effectiveness, and deployment of fuel economy technologies for light-duty vehicles*. Washington, DC: National Academy Press.
- OECD - Organisation for Economic Co-Operation and Development. (2009). *Sustainable manufacturing and eco-innovation: framework, practices and measurement*. Paris. Recuperado de <http://www.oecd.org/innovation/inno/43423689.pdf>.
- Oltra, V., & Saint Jean, M. (2009). Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(4), 567–583. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.03.025>
- Oshiro, K., & Masui, T. (2015). Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO2 emission reduction in Japan. *Energy Policy*, 81, 215–225. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.010>
- Plotkin, S. E. (2009). Examining fuel economy and carbon standards for light vehicles. *Energy Policy*, 37(10), 3843–3853. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.013>
- Posada, F., & Façanha, C. (2015). *Brazil Passenger Vehicle Market Statistics - International comparative assessment of technology adoption and energy consumption*. ICCT. Washington DC. Recuperado de <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil PV Market Statistics Report.pdf>
- Reid, A., & Miedzinski, M. (2008). *Eco-innovation: final report for sectoral innovation watch*. Technopolis. Recuperado de [www.technopolis-group](http://www.technopolis-group.com).
- Rennings, K. (2000). Redefining innovation—eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 32(2), 319–332. Recuperado de [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800999001123\(FI 2,720\)](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800999001123(FI 2,720))
- Ribeiro, S. K., & de Abreu, A. A. (2008). Brazilian transport initiatives with GHG reductions as a co-benefit. *Climate Policy*, 8(2), 220–240. Recuperado de <http://doi.org/10.3763/cpol.2007.0431>

- Silva, A. T. B., Spers, R. G., Wright, J. T. C., & Costa, P. R. (2013). Cenários prospectivos para o comércio internacional de etanol em 2020. *Revista de Administração*, 48(4), 727–738. Recuperado de <http://doi.org/10.5700/rausp1117>
- Simmons, R. A., Shaver, G. M., Tyner, W. E., & Garimella, S. V. (2015). A benefit-cost assessment of new vehicle technologies and fuel economy in the U.S. market. *Applied Energy*, 157, 940–952. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.068>
- Taylor, A. M. K. P. (2008). Science review of internal combustion engines. *Energy Policy*, 36(2008), 4657–4667. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.001>
- Yalabik, B., & Fairchild, R. J. (2011). Customer, regulatory, and competitive pressure as drivers of environmental innovation. *International Journal of Production Economics*, 131(2), 519–527. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.020>
- Zapata, C., & Nieuwenhuis, P. (2010). Exploring innovation in the automotive industry: new technologies for cleaner cars. *Journal of Cleaner Production*, 18(1), 14–20. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.020>