

## **ANÁLISE MORFOLÓGICA DA INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO TRÁFEGO URBANO DE SÃO PAULO**

**Lydia Lopes Correia da Silva**

Programa de Pós-Graduação em Administração

Universidade de São Paulo, USP, Brasil

**“... within the final and true world image everything is related to everything, and nothing can be discarded a priori as being unimportant.”**

Fritz Zwicky: Discovery, invention, research through the morphological approach

### **RESUMO**

Substancialmente tem aumentado as pressões de organismos internacionais e regulamentações governamentais no sentido de redução da dependência de combustíveis fósseis e de emissões poluentes provenientes dos transportes.

Para responder a esses desafios, a indústria automobilística investe vultosos recursos em pesquisa e desenvolvimento em um vasto portfólio de novas tecnologias relacionadas à propulsão veicular. Das alternativas em desenvolvimento, os veículos elétricos, especificamente, têm recebido crescentemente atenção, tanto no Brasil quanto no exterior.

O presente estudo pretende contribuir para a construção de cenários futuros em 2020 relacionados à introdução de veículos elétricos no tráfego urbano de São Paulo, parte integrante de projeto de pesquisa CNPq/FINEP, em desenvolvimento na Universidade de São Paulo (USP/FEA), coordenado pelo Prof. James T. C. Wright.

Por facilitar a estruturação das complexidades tecnológicas e gerenciais do problema proposto, o método de Análise Morfológica foi utilizado, visando identificar as variáveis e relações críticas para a prospecção dos cenários.

As variáveis que influenciam um sistema de transporte urbano foram estruturadas em quatro grupos lógicos: escopo do uso, arquitetura estrutural e sistema de propulsão do veículo, infraestrutura viária e de fornecimento/recarga de energia, modelo de negócio; esses grupos, por sua vez, foram decompostos em distintos níveis, originando outras variáveis. Na sequência, foram geradas formas alternativas que as variáveis selecionadas poderiam assumir.

A matriz multidimensional resultante desse conjunto de possibilidades combinatórias passou, então, por criteriosa análise de viabilidade e consistência, a fim de se identificar as configurações básicas de maior interesse para o esforço de prospecção dos cenários.

**Palavras-chave:** Cenários prospectivos. Análise morfológica. Veículos elétricos.

## **MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF ELECTRIC VEHICLES INTRODUCTION IN URBAN TRAFFIC IN SAO PAULO**

### **ABSTRACT**

Pressures of international organizations and governmental regulations have increased substantially when it comes to the reduction of dependence on fossil fuels and transport pollutants emissions.

To meet these challenges, the automotive industry invests large sums in research and development in a broad portfolio of new technologies related to vehicular propulsion. Considering the alternatives in development, electric vehicles, specifically, have increasingly received attention both in Brazil and abroad.

This study aims to contribute to the construction of future scenarios in 2020 related to the introduction of electric vehicles in urban traffic in Sao

Paulo, part of a CNPq/FINEP research project under development at the University of São Paulo (USP/FEA), coordinated by Prof. James T. C. Wright.

The method of Morphological Analysis was used because it facilitates the structuring of managerial and technological complexities of the proposed problem, aiming the identification of critical variables and their correlation for the prospect of scenarios.

The variables that influence an urban transport system were structured into four logical groups: scope of usage, structural architecture and propulsion system of the vehicle, road and energy supply/recharge infrastructure, business model; these groups, in turn, were broken down into different levels, leading to other variables. After that, alternative forms that the selected variables could assume were generated.

The multidimensional matrix resulting from this set of combinatorial possibilities passed through, then, by careful analysis of feasibility and consistency in order to identify the basic settings of greatest interest to the effort of scenarios prospecting.

**Key words:** Prospective scenarios. Morphological analysis. Electric vehicles.

## 1 INTRODUÇÃO

A mobilidade é reconhecida como um vetor fundamental para o crescimento de uma economia globalizada e para o desenvolvimento do bem-estar sócio-cultural, porém a preocupação com o meio ambiente e com a sustentabilidade da matriz energética atual coloca o setor de transporte na berlinda, como um dos focos centrais da atenção mundial.

O transporte de passageiros e de bens de consumo e produção responde por 52% da demanda por combustíveis no mundo, que na sua quase totalidade – 94% – são derivados do petróleo, abastecendo motores de combustão interna. Nenhum outro setor apresenta tal nível de dependência de uma única fonte de energia primária, ou tal dominância de uma tecnologia de propulsão (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2009).

Ainda segundo o estudo da OECD (2009), a geração de energia e o setor de transporte são os dois maiores emissores mundiais de gases causadores do efeito estufa, contribuindo com 41% e 23%, respectivamente, nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Mais preocupante é a constatação que as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de transportes aumentaram consideravelmente – 28% – durante o período 1990-2006, mesmo com a melhoria da eficiência da frota mundial, enquanto que houve redução de 3% no nível médio de emissões relativo aos demais setores (European Environment Agency [EEA], 2009). Vale lembrar que grande parte das emissões de gases de efeito estufa nesse setor ocorre no transporte individual diário, no qual as pessoas utilizam seus carros no percurso casa-trabalho, em deslocamentos curtos e, geralmente, a baixas velocidades.

Uma vez que a demanda por mobilidade e por energia é crescente, em linha com a elevação esperada do produto interno bruto dos países (Velloso, 2010), têm aumentado substancialmente as pressões de organismos internacionais e regulamentações governamentais no sentido de redução da dependência de combustíveis fósseis e de emissões poluentes provenientes dos transportes. O Conselho da União Européia estabeleceu para os países membros uma redução dos níveis de emissões totais de CO<sub>2</sub> para o ano de 2050, de 60% a 80% do valor verificado em 1990 (Hacker, 2009).

Para responder a esses desafios, a indústria automobilística vem investindo vultosos recursos em pesquisa e desenvolvimento em um vasto portfólio de novas tecnologias relacionadas à propulsão veicular, que incluem desde avanços nos motores convencionais de combustão interna (Welch, 2010), operando com combustíveis fósseis ou renováveis (biocombustíveis), até sistemas de propulsão elétrica, híbrida, células combustíveis, ou mesmo combinações desses.

No entanto, a tecnologia de motorização automotiva a predominar no futuro próximo, continua sendo foco de muito debate e especulação, e ainda pouco consenso (Book, 2009).

## **2 MOTORIZAÇÃO ELÉTRICA**

### **2.1 ASPECTOS TÉCNICOS DA MOTORIZAÇÃO ELÉTRICA**

Os veículos elétricos atuais — em teste, já lançados ou anunciados — usam quatro tipos de tecnologia.

Os híbridos ou Hybrid Electric Vehicle (HEV) combinam a energia de um motor elétrico com a de um motor convencional de combustão interna (MCI), a gasolina, biocombustível, ou flex. Percorrem curtas distâncias iniciais (10 a 15 km) exclusivamente com eletricidade e, quando a bateria se esgota ou quando o veículo atinge uma determinada velocidade, entra em funcionamento o motor de combustão interna, acionando as rodas e também recarregando o conjunto de baterias. O modelo híbrido mais vendido atualmente, o Toyota Prius, foi lançado em 1997 e chegou ao final de 2010 a 2 milhões de unidades vendidas.

A configuração híbrida paralela usa ambos os motores – de combustão interna e o elétrico – para fornecer propulsão mecânica para as rodas, em conjunto ou de forma independente. Na configuração em série, as rodas são mecanicamente conectadas somente ao motor elétrico; o motor de combustão gera eletricidade diretamente para o motor elétrico e para recarregar a bateria.

Os híbridos *plug-in* ou Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) também combinam motor a combustão interna e motor elétrico, sendo esse, porém,

recarregável na rede elétrica; imagina-se que, no futuro, esses veículos poderão até armazenar eletricidade e devolvê-la à rede em horários de pico.

Todos os híbridos no mercado têm um sistema de frenagem regenerativa, que captura a energia cinética do veículo e a transforma em energia elétrica.

Nos veículos elétricos puros ou Electric Vehicle (EV) a bateria deve ser recarregada na rede elétrica (fonte primária de energia), uma vez que um veículo elétrico não tem capacidade a bordo para recarregar o conjunto de células de baterias. Os modelos atuais usam baterias de lítio-íon, que proporcionam entre 120 e 150 km de autonomia. Para que o veículo não fique parado para recarga e como o custo da bateria é muito elevado — cerca de US\$ 10 mil —, uma alternativa de modelo de negócio é montar uma rede de locais para troca de baterias, a que os proprietários teriam acesso por meio de arrendamento (proposta da Renault-Nissan).

Ainda em fase de pesquisas e de testes encontra-se a tecnologia de células a combustível ou Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV), onde a fonte de energia primária é o hidrogênio, convertido na eletricidade que movimenta o motor (Inovação Unicamp, 2009; International Energy Agency [IEA], 2009).

## 2.2 HISTÓRICO DO VEÍCULO ELÉTRICO

No final do século XIX, assistiu-se a uma era de intensa fermentação de tecnologias concorrentes de propulsão automotiva. Nessa época coexistiam, e competiam, motor a vapor de combustão externa, motor de combustão interna operando com combustíveis fósseis e com biocombustíveis, assim como motor elétrico.

A invenção do primeiro motor de combustão interna foi reconhecida a Etienne Lenoir, que em 1860, montou tal motor num triciclo, funcionando com gás de carvão. Embora sua produção em escala industrial tenha vindo pelas mãos de Nikolaus Otto, em 1876, com os motores usando combustíveis gasosos e líquidos – versões gasolina e álcool (Clymer, 1950).

No entanto, nesse período, a maior participação de vendas no mercado era do motor elétrico veicular, inventado em 1834 e pioneiramente montado num carro em 1838 por Robert Davidson (Chan, 2002). Na última década do século XIX havia vários fabricantes de veículos elétricos na Europa e nos Estados Unidos.

Ainda que se caracterizasse pelo manuseio mais simples do que as alternativas concorrentes, pois além de silenciosa não emite gases poluentes, a motorização elétrica logo perdeu espaço para os motores de combustão interna, em parte por motivos como limitações associadas à baixa autonomia das baterias, tempo elevado de recarga dessas, assim como sua reduzida vida útil. Ainda hoje existem gargalos tecnológicos dos veículos elétricos, que praticamente desapareceram de cena desde 1930 (Chan, 2002; Didik, 2001).

No início do século XX (período 1900-1920) foi rápida a difusão dos motores de combustão interna a gasolina, provavelmente não por razões técnicas, mas devido principalmente a fatores propícios no contexto sócio-econômico-organizacional – externalidades à tecnologia. A indústria petrolífera contribuiu com a instalação de uma extensa rede de distribuição de combustível, a intensa atividade de exploração derrubou o preço do petróleo, além da franca expansão verificada da estrutura rodoviária, notadamente nos Estados Unidos (Taminiau, 2006; van der Wal, 2007). E a tecnologia de motores de combustão interna a gasolina reinou absoluta durante todo o século XX.

A história moderna dos veículos elétricos pode-se considerar que iniciou na década de 70, ao dispararem os preços do barril do petróleo, que somaram argumentos às pressões ambientalistas em favor da opção veicular elétrica, com o objetivo de diminuir o consumo desse combustível.

Uma das iniciativas que se tornaram famosas neste período, refere-se ao Ato da Califórnia, Air Resources Board (CARB), de 1990, determinando que a partir de 1998 uma porcentagem crescente de vendas futuras de veículos daquele estado americano fosse de emissão nula. O atendimento ao enorme mercado oferecido por esta regulamentação, e outras similares, teria como candidato natural o veículo elétrico.

A retomada de sua comercialização deu-se em meados da década de 1990, nos Estados Unidos, através da General Motors (GM), que lançou o modelo EV1 em 1996, o primeiro modelo de carro elétrico produzido em massa. A montadora foi seguida pela Ford (Think e Ranger), Honda (EV Plus), Toyota (RAV4) e Nissan (Altra EV). Todos esses modelos eram vendidos apenas através de arrendamento, custando entre 250 e 600 dólares mensais.

Apesar do sucesso entre os usuários, em 1999 o EV1 foi tirado de linha. A GM teria investido US\$ 1 bilhão no desenvolvimento do modelo ao longo dos anos 90, mas decidiu descontinuar o projeto, sob a alegação de que seria impossível obter margem de lucro do arrendamento. O preço equivalente do EV1 seria de US\$ 44 mil para os usuários, mas seu custo de produção para a GM excederia os US\$ 80 mil (Maynard, 2008).

Já no início da década atual, todas as demais montadoras resolveram retirar os carros elétricos de circulação e, por força do mesmo sistema de arrendamento, exigiram que os consumidores os devolvessem.

Nos últimos anos, o conceito da eletromobilidade se ampliou e passou a ser prioridade estratégica de pesquisa e desenvolvimento em todas as montadoras de veículos. A competição quanto aos carros elétricos ganhou velocidade e mais participantes.

A Toyota, líder de vendas mundiais, que até o momento vinha concentrando esforços em modelos híbridos, anunciou vultosos investimentos no desenvolvimento de propulsão totalmente elétrica, ao apresentar no final de 2010 o protótipo RAV4 EV, com início de produção previsto para 2012 (Vinhos, 2010). Já a Nissan iniciou em outubro de 2010, no Japão, a produção do modelo elétrico Leaf em grandes volumes – inicialmente, 50 mil unidades/ano –, com previsão de uma segunda planta nos Estados Unidos, em 2012.

No Brasil, o ano de 2010 marcou a introdução da comercialização de carros elétricos, com o lançamento no mercado interno do modelo Ford Fusion Hybrid, produzido no México (Mora, 2010).



### **3 METODOLOGIA DE PESQUISA – ASPECTOS CONCEITUAIS**

#### **3.1 A ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS**

Cenário é um retrato rico e detalhado de um mundo futuro plausível, que permite ao planejador poder claramente identificar e compreender os problemas, os desafios e as oportunidades que tal ambiente poderia apresentar, segundo definição do The Future Group (Glenn, 1999).

Já para A. Porter et al. (1991), cenários são esboços parciais de alguns aspectos do futuro cuja estruturação pode consistir em formas puramente narrativas, ou até modelos detalhados com dados quantitativos. E, na visão de Godet (1993), o cenário deve incluir a ação dos principais atores e a probabilidade estimada de eventos incertos, articulados de tal forma a descrever a passagem da situação de origem para uma situação em um momento futuro de forma coerente.

Devido ao grande número de variáveis presentes no mundo real e à complexidade das suas interações, torna-se mais atraente trabalhar com várias possibilidades de futuros, ou cenários múltiplos.

Todavia, é de consenso entre os principais autores, a idéia de apresentar, ao final dos estudos, poucos cenários. Na visão de M. Porter (2002), uma proliferação de cenários pode tornar a análise tão onerosa que as questões estratégicas poderiam perder o foco; três ou quatro cenários seriam suficientes para diminuir as incertezas e estimular os tomadores de decisão a empreender novos desafios, em busca da melhor construção do conjunto de cenários, que cubra as possibilidades de realização futura das variáveis relevantes, analisadas de forma sistêmica e por meio de hipóteses coerentes (Sturari, 2008).

Como pensar em estratégia, remete a olhar para o longo prazo, a prospecção de cenários futuros pode ser entendida como um valioso instrumento de apoio às decisões empresariais de investimentos, inteligência competitiva, novos produtos, mercados, etc.

Mason (1994) afirma que o planejamento baseado em cenários é olhar para frente de forma criativa e aberta, em busca de padrões emergentes, levando a um processo de aprendizagem sobre o futuro. Schoemaker (1995)

reforça a importância de se estruturar (disciplinar) as diversas metodologias para se pensar o futuro, para que erros comuns não sejam cometidos, como superestimar ou subestimar o ritmo e o impacto de mudanças. Ringland (1998) também enfatiza a melhora na qualidade das decisões e a compreensão de suas implicações para a estratégia competitiva das organizações, a partir de um bom planejamento por cenários.

Portanto, a elaboração de cenários futuros, considerando alternativas múltiplas e incertas, não se trata de um exercício em busca de exatidão na predição, mas sim de um esforço para se fazer descrições consistentes e plausíveis de possíveis situações futuras, se constituindo em uma ferramenta fundamental para o processo de planejamento estratégico de instituições públicas e privadas, conforme apresentado por Wright e Spers (2006).

Vários métodos para desenvolvimento de cenários têm sido reportados na literatura. Cada situação em que se utilizam cenários enseja uma nova oportunidade de enriquecer o método com técnicas e procedimentos mais elaborados ou simplesmente buscar uma abordagem mais adequada à situação em estudo (Nóbrega e Stollenwerk, 1999).

No método de elaboração de cenários de longo prazo desenvolvido pelo Programa de Estudos do Futuro da Fundação Instituto de Administração (FIA/USP) prevê uma sequência de atividades que incluem: identificação e estruturação das variáveis, tendências e eventos críticos dos cenários; projeção dos estados futuros das variáveis, com suas probabilidades de ocorrência; identificação de temas motrizes distintos para cada cenário, esses temas (variáveis ou incertezas críticas) são os elementos que acionam o mapa dos cenários, que determinam o desenrolar da história. Independentemente da metodologia de construção de cenários, a etapa seguinte consiste em se combinar os estados futuros previstos para as variáveis fundamentais, de forma consistente, utilizando técnicas de análise morfológica, etapa que precede a redação e validação dos cenários futuros (Wright & Spers, 2006).

No presente trabalho, enfatiza-se o método de Análise Morfológica para estruturar e avaliar as combinações dos parâmetros (variáveis) críticos, e as diferentes formas (alternativas) apresentadas por essas, para compor os cenários futuros.

### 3.2 ANÁLISE MORFOLÓGICA

A análise morfológica é uma técnica não-quantitativa de estruturação e avaliação do conjunto de relações inerentes a um complexo problema multidimensional, proposta por Fritz Zwicky na década de 60 (Zwicky, 1969). A. Porter (1991) a classifica como uma metodologia de prospecção estrutural, por considerar explicitamente as inter-relações entre as variáveis tecnológicas e os demais elementos contextuais.

O método de elaboração de cenários de Godet estrutura-se em três grandes fases. Inicia-se com a construção da base analítica e histórica do sistema atual, incluindo a identificação das variáveis e suas relações, assim como o posicionamento das partes interessadas face às variáveis. E, precedendo a fase da elaboração dos cenários – possíveis estados intermediários e finais –, vêm as atividades de exploração das possíveis evoluções que, através de uma análise morfológica, decompõe o problema estudado em dimensões essenciais, definindo e analisando aquelas mais prováveis (Ribeiro, 1997).

A hipótese básica do método é a de que um problema complexo pode ser decomposto em variáveis fundamentais (principais elementos e funções básicas), que passam por uma análise sistemática das formas alternativas que essas possam assumir, gerando assim um conjunto de estados ou valores.

O fracionamento do problema tem sua lógica, que é lidar com questões menos complexas do que o sistema original, possibilitando uma análise mais profunda das partes (subsistemas com formas e funções distintas). Os critérios pelos quais os fracionamentos se baseiam são variados, podendo ser pelas atividades ou funções desenvolvidas pelos subsistemas, pelos atributos dos objetos, conceitos ou tecnologias.

Combinando todos esses estados podemos enumerar o universo completo das possibilidades que a questão pode apresentar. As combinações intrinsecamente inconsistentes, tecnicamente inviáveis e economicamente insustentáveis são descartadas, gerando selecionados grupos de alternativas – matriz multidimensional –, que formam as bases para o desenvolvimento dos cenários. Inovações surgem da recombinação de subsistemas viáveis (já existentes ou ainda conceituais) em novas opções a serem exploradas.

As dimensões da matriz morfológica gerada são definidas pelos elementos, funções ou parâmetros e pelas formas alternativas, podendo assumir “n” dimensões, conforme a complexidade do problema e a ambição do grupo pesquisador.

Como a análise morfológica se trata de uma técnica que promove a previsão do conjunto pela análise das partes, as soluções interdisciplinares e a especulação criativa (Johnson et al., 1987), acaba por favorecer a geração de idéias acerca de alternativas inovadoras e novas ligações entre os subsistemas técnicos e do ambiente. Assim, o método estimula a criatividade e provoca o inédito, ao apresentar para avaliação combinações de situações que seriam negligenciadas, ou mesmo rejeitadas, pelo raciocínio linear (Nóbrega & Stollenwerk, 1999).

#### **4 ANÁLISE MORFOLÓGICA DA INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO TRÁFEGO URBANO DE SÃO PAULO**

Por facilitar a estruturação de questões complexas, envolvendo opções tecnológicas que impactam o contexto sócio-econômico-ambiental, como o desafio de prospectar tecnologias alternativas para os modos de transporte no município de São Paulo – foco nos veículos elétricos –, a técnica de análise morfológica foi utilizada, visando identificar as variáveis e relações críticas para as etapas seguintes de construção e análise de cenários futuros.

##### **4.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO**

O presente estudo pretende contribuir para o projeto de pesquisa CNPq/FINEP “Introdução de Veículos Elétricos no Tráfego Urbano de São Paulo: Análise de Impactos em Múltiplos Cenários e Contribuições para a Mobilidade Urbana Sustentável”, em desenvolvimento por grupo de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP/FEA), coordenado pelo Prof. James T. C. Wright.

A pesquisa tem o problema central prospectar tecnologias alternativas para os modos de transporte e analisar os impactos sociais, econômicos e ambientais de sua adoção no município de São Paulo, e, especificamente, para a alternativa de veículos elétricos no cenário futuro para 2020.

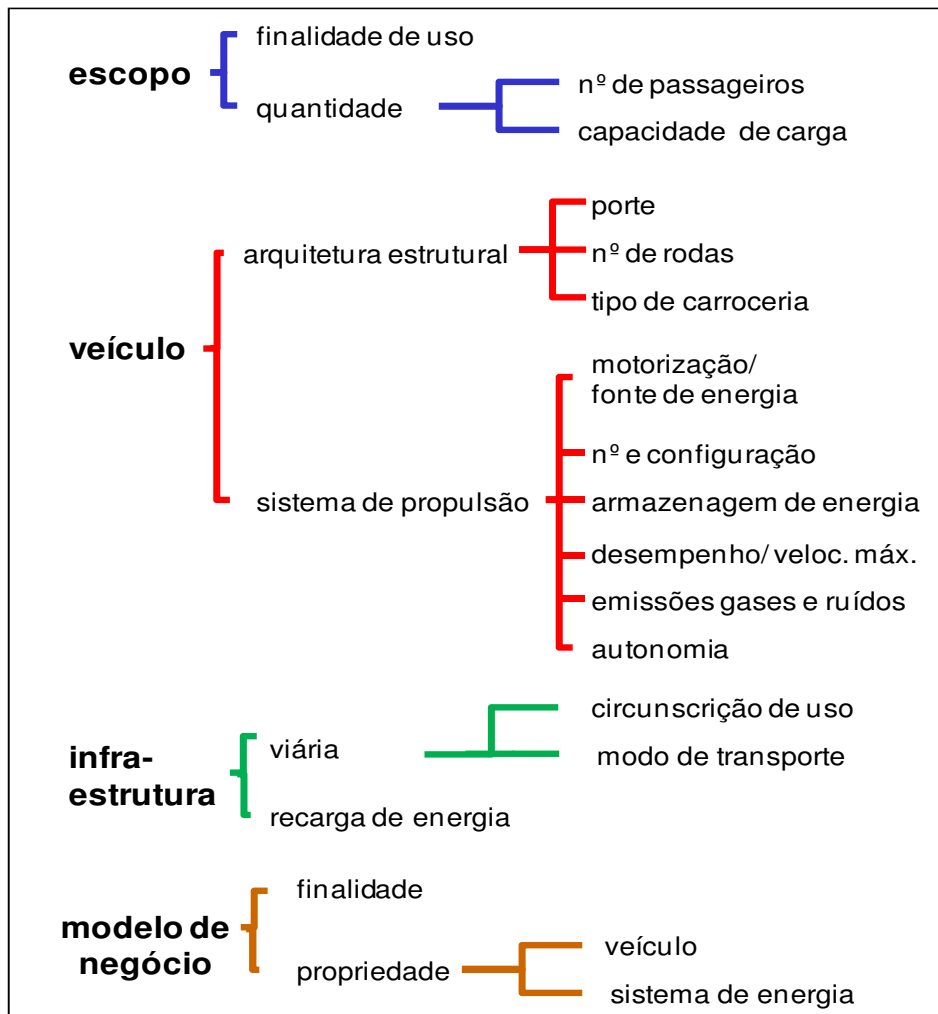
Para analisar o impacto da introdução de veículos elétricos no tráfego urbano de São Paulo é necessária a aplicação de um conjunto de metodologias específicas, cuja visão geral é apresentada a seguir (Wright & Spers, 2000).

Para a elaboração de cenários de médio e longo prazo, a proposta é seguir uma sequência de atividades, que incluem a identificação das variáveis críticas dos cenários, construídas por meio da técnica de análise e estruturação de modelos; a prospecção de tendências das variáveis (extrapolação de tendências e aplicação da técnica Delphi), estruturadas, por meio de análise morfológica, com o intuito de elaborar uma matriz dos cenários, que fornecem as informações para análise das tendências impactadas (Martino, 1993; Schoemaker, 1995).

#### 4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS FUNDAMENTAIS

A etapa foi elaborada com o apoio de levantamento e análise de bibliografia especializada em engenharia e negócios automobilísticos, prescindindo, nessa fase inicial de exploração da metodologia, da colaboração de grupo de especialistas no tema. Embora se reconheça a valiosa contribuição desses, no que tange à geração de idéias e cruzamento de conhecimentos e experiências variadas.

As variáveis que influenciam um sistema de transporte urbano foram estruturadas em quatro grupos lógicos: Escopo, referente ao propósito de uso, se para transporte de passageiros e/ou carga; Veículo, relacionado à arquitetura estrutural e sistema de propulsão: conjunto motor-propulsor e sistema de armazenagem e fonte de energia; Infraestrutura viária e de fornecimento/recarga de energia; Modelo de Negócio. Esses grupos, por sua vez, foram decompostos em distintos níveis, originando outras variáveis – no presente exercício exploratório totalizaram 18 parâmetros, ou variáveis, a serem analisados. Buscou-se, nesse momento, não restringir as sugestões. A estruturação das variáveis pode ser visualizada na Figura 1.

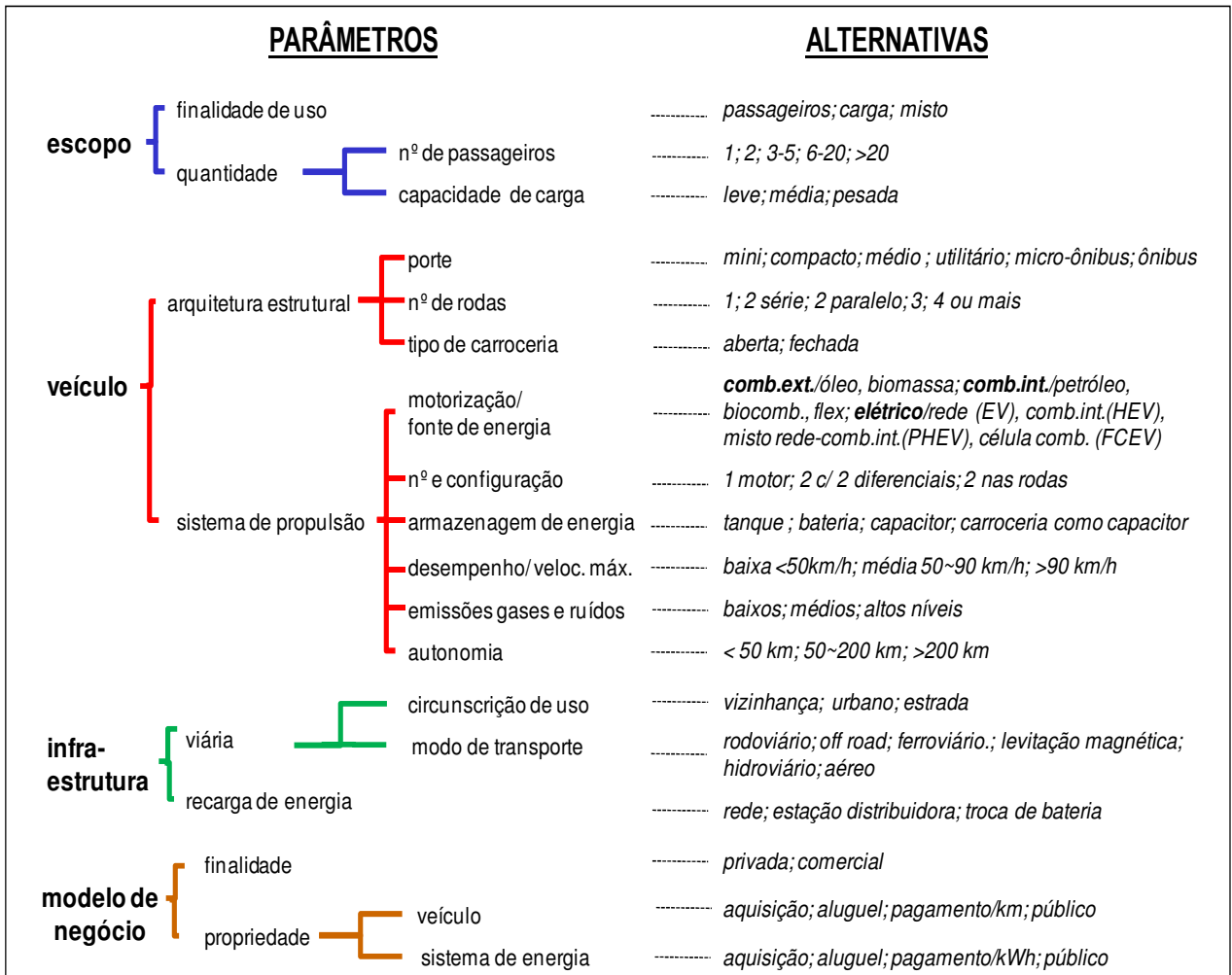


**Figura 1: Estrutura dos parâmetros (variáveis) selecionados**

Fonte: elaborada pela autora

#### 4.3 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ MULTIDIMENSIONAL PARA SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO

Na sequência, procedeu-se a uma sessão de geração de propostas e sugestões de formas alternativas que as variáveis selecionadas poderiam assumir. Como mencionado, o exercício exploratório foi realizado pela autora, embora se pretenda ampliar para a participação de especialistas na área. O conjunto de alternativas, ou estados possíveis, ligados aos parâmetros (variáveis) se encontra representado na Figura 2.



**Figura 2: Conjunto de parâmetros e alternativas sugeridas**

Fonte: elaborada pela autora

Como pode ser observada, a totalização de possibilidades levantadas fornece um número notavelmente alto, já esperado para sistemas complexos:

Escopo =  $3 \times 5 \times 3 = 45$  combinações

Veículo =  $6 \times 5 \times 2 \times 8 \times 3 \times 4 \times 3 \times 3 \times 3 = 155.520$  combinações

Infraestrutura =  $3 \times 6 \times 3 = 54$  combinações

Modelo de Negócio =  $2 \times 4 \times 4 = 32$  combinações

SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO =  $45 \times 155.520 \times 54 \times 32 = 12.093.235.200$

A partir da análise morfológica, chega-se a pouco mais de 12 bilhões de configurações possíveis. A matriz multidimensional gerada a partir desse conjunto de parâmetros e alternativas se encontra na Figura 3.

O próximo passo tratou de se proceder a uma análise criteriosa de viabilidade e consistência das configurações geradas para o problema proposto.

ANÁLISE MORFOLÓGICA - Sistema de Transporte Urbano																			
PARÂMETROS	ESCOPO			VEÍCULO - arquitetura e propulsão										INFRA-ESTRUTURA			MODELO de NEGÓCIO		
	finalidade	n. passag.	carga	porte	n. rodas	carroceria	motor/energia	config.motor	armaz.energia	veloc.max	emissões	autonomia	circunscricção	modo	recarga	finalidade	prop.veículo	prop.energia	
alternativa 1	passageiros	1	leve	mini	1	aberta	comb. ext/ biomassa	1 motor	tanque	baixa <50 km/h	baixas	<50 km	vizinhança	rodovia	postos distribuidores	privada	aquisição	aquisição	
alternativa 2	carga	2	média	compacto	2 série	fechada	comb. int./ petróleo	2 c/ 2 cilér.	bateria	média 50-90 km/h	médias	50-200 km/h	urbano	off road	rede em postos	comercial	aluguel	aluguel	
alternativa 3	misto	3-5	pesada	médio	2 paralelo		comb. int./ biocomb.	2 nas rodas	capacitor	alta > 90 km/h	altas	> 200 km/h	estrada	ferrovia	rede em casa		pagam./ km	pagam./ kWh	
alternativa 4		6-20		utilitário	3		comb. internal/ flex		carroc. como capacitor					levitação magnética	troca bateria		tarifa pública	tarifa pública	
alternativa 5		> 20		micro-ônibus	4 ou mais		elétrico/ rede EV							hidrovia					
alternativa 6				ônibus			elétrico/ petrol. HEV							aéreo					
alternativa 7							elétrico/ misto PHEV												
alternativa 8							elétrico/ car. comb. FCEV												

**Figura 3: Matriz multidimensional de um sistema de transporte urbano**

Fonte: elaborada pela autora



#### 4.4 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADES PARA INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO TRÁFEGO URBANO DE SÃO PAULO

Considerando o grupo de variáveis relacionadas ao ESCOPO, optou-se por restringir a avaliação, num primeiro momento, à introdução de carros de passageiros e motocicletas elétricas, lembrando que veículos de carga e misto já estão sujeitos à circulação restrita em grande parte da região metropolitana de São Paulo.

No grupo VEÍCULO, deixou-se aberto um grande leque de alternativas relacionadas à arquitetura estrutural do veículo, uma tendência em se tratando de veículos elétricos em circulação na Europa e Estados Unidos (Clemenger, 2008). Já para o sistema de propulsão automotiva, para o relativo curto prazo de uma década, o estudo se concentrará no uso de tecnologia de motorização elétrica, com geração e abastecimento da energia através da rede elétrica, e com possibilidade de propulsão complementar pelo motor convencional nos sistemas híbridos plug-in, sendo o sistema de armazenagem de energia baseado em baterias.

Para a infraestrutura viária foi considerada apenas a alternativa rodoviária, deixando-se mais aberta a escolha de alternativas de recarga das baterias elétricas, por se prever um período de fermentação com inúmeras opções de ofertas técnicas e empresariais para um eventual gargalo de abastecimento dessa nova fonte de energia veicular.

O mesmo raciocínio foi empregado ao se deixar bem ampla a matriz de possibilidades de MODELOS de NEGÓCIOS, baseados na introdução do inovador modo de transporte na cidade de São Paulo.

As alternativas selecionadas estão representadas na matriz da Figura 4.

Após as considerações anteriores, chegou-se a uma nova totalização de pouco mais de um milhão de possibilidades, ainda elevada:

Escopo =  $1 \times 3 = 3$  combinações

Veículo =  $3 \times 5 \times 2 \times 2 \times 3 \times 1 \times 3 \times 2 \times 2 = 2.160$  combinações

Infraestrutura =  $3 \times 1 \times 3 = 9$  combinações

Modelo de Negócio =  $2 \times 3 \times 3 = 18$  combinações

---

Programa de VEÍCULOS ELÉTRICOS em SÃO PAULO =  $3 \times 2.160 \times 9 \times 18 = 1.049.760$

ANÁLISE MORFOLÓGICA - Introdução de VEÍCULOS ELÉTRICOS no Tráfego Urbano de SÃO PAULO																	
PARÂMETROS	ESCOPO		VEÍCULO - arquitetura e propulsão									INFRA-ESTRUTURA			MODELO de NEGÓCIO		
	finalidade	n. passag.	porte	n. rodas	carroceria	motor/energia	config.motor	armaz.energia	veloc.máx	emissões	autonomia	circunscrição	modo	recarga	finalidade	prop.veículo	prop.energia
alternativa 1	passageiros	1	mini	1	aberta	elétrico/rede EV	1 motor	bateria	baixa <50 km/h	baixas	<50 km	vizinhança	rodovia	rede em postos	privada	aquisição	aquisição
alternativa 2		2	compacto	2 série	fechada	elétrico/misto PHEV	2 cl/ 2 difer.		média 50-90 km/h	médias	50-200 km/h	urbano		rede em casa	comercial	aluguel	aluguel
alternativa 3		3 - 5	médio	2 paralelo			2 nas rodas		alta > 90 km/h			estrada		troca bateria		pagam./ km	pagam./ kWh
alternativa 4				3													
alternativa 5				4 ou mais													

**Figura 4: Matriz multidimensional indicando alternativas selecionadas**

Fonte: elaborada pela autora

#### 4.5 ANÁLISE DE CONFIGURAÇÕES SELECIONADAS

A título de ilustração, algumas das possibilidades de configurações podem ser identificadas e individualizadas na matriz da Figura 4.

Na situação atual, a grande maioria da frota de sete milhões de veículos transitando na região metropolitana de São Paulo se concentra nas configurações de automóveis (5,1 milhões) e motocicletas (0,9 milhões); a primeira pode ser descrita através do conjunto de alternativas selecionadas na matriz da Figura 5, ou seja, automóveis de passageiros de portes compacto e médio, com motorização convencional abastecida por combustíveis líquidos (gasolina ou bioetanol).

Sob a ótica da análise morfológica, ao se avaliar o automóvel elétrico híbrido (PHEV) Chevrolet Volt lançado em 2010, com previsão de produção de 10.000 unidades/ano para 2011, visualiza-se a configuração apresentada na matriz da Figura 7. A arquitetura do veículo e do conjunto propulsor é fechada, podendo ser consideradas algumas alternativas de comercialização do automóvel e/ou da recarga de energia elétrica. O modelo Chevrolet Volt, assim como o modelo Nissan Leaf, está entre os três finalistas para o prêmio Carro do Ano 2011, pela Associação da Imprensa Automotiva norte-americana (Figura 6).

ANÁLISE MORFOLÓGICA - CARROS CONVENCIONAIS no Tráfego Urbano de SÃO PAULO																		
PARÂMETROS	ESCOPO		VEÍCULO - arquitetura e propulsão									INFRA-ESTRUTURA			MODELO de NEGÓCIO			
	finalidade	n. passag.	porte	n. rodas	carroceria	motor/energia	config.motor	armaz.energia	veloc.máx	emissões	autonomia	circunscrição	modo	recarga	finalidade	prop.veículo	prop.energia	
alternativa 1	passageiros	1	mini	1	aberta	elétrico/rede EV	1 motor	bateria	baixa <50 km/h	baixas	<50 km	vizinhança	rodovia	rede em postos	privada	aquisição	aquisição	
alternativa 2		2	compacto	2 série	fechada	elétrico/misto PHEV	2 cl/2 difer.	tanque	média 50-90 km/h	médias	50-200 km/h	urbano		rede em casa	comercial	aluguel	aluguel	
alternativa 3		3-5	médio	2 paralelo		comb.interna / flex ou gasolina	2 nas rodas		alta > 90 km/h			estrada		troca bateria		pagam./km	pagam./ kWh	
alternativa 4				3										postos distribuidores				
alternativa 5				4 ou mais														

**Figura 5: Matriz multidimensional indicando situação atual: automóveis com motorização convencional.**

Fonte: elaborada pela autora



**Figura 6: Carros Chevrolet Volt PHEV (esquerda) e Nissan Leaf EV (direita).**

Fonte: elaborada pela autora

Considerando o modelo elétrico (EV) Nissan Leaf, já em produção no Japão – inicialmente 50 mil unidades/ano e previsão de 200 mil/ano a partir de 2012 –, sua configuração é apresentada na matriz da Figura 8. O automóvel atinge a velocidade máxima de 140 km/h, alimentado por baterias de íons de lítio. Com autonomia de 160 km, o modelo leva oito horas para ser recarregado em uma tomada convencional de 220 volts ou 30 minutos em um posto de recarga rápida. Entre as tecnologias apresentadas no Leaf está o sistema de frenagem regenerativa e um captador solar localizado sobre a tampa do porta-malas que fornece energia para pequenas funções no interior do veículo. Várias

alternativas de comercialização do automóvel, do sistema de armazenagem e de recarga de energia elétrica foram deixadas em aberto para sinalizar as oportunidades de negócio a serem exploradas.

ANÁLISE MORFOLÓGICA - Introdução de VEÍCULOS ELÉTRICOS no Tráfego Urbano de SÃO PAULO																	
PARÂMETROS	ESCOPO		VEÍCULO - arquitetura e propulsão									INFRA-ESTRUTURA			MODELO de NEGÓCIO		
	finalidade	n. passag.	porte	n. rodas	carroceria	motor/energia	config.motor	armaz.energia	veloc.máx	emissões	autonomia	circunscrição	modo	recarga	finalidade	prop.veículo	prop.energia
alternativa 1	passageiros	1	mini	1	aberta	elétrico/rede EV	motor elétr. e MCI	bateria e tanque	baixa <50 km/h	baixas/nulas	<50 km	vizinhança	rodovia	rede em postos	privada	aquisição	aquisição
alternativa 2		2	compacto	2 série	fechada	elétrico/misto PHEV	2 cl/ 2 difer.		média 50-90 km/h	médias	50-200 km/h	urbano		rede em casa	comercial	aluguel	aluguel
alternativa 3		3-5	médio	2 paralelo			2 nas rodas		alta > 90 km/h			estrada		troca bateria		pagam./ km	pagam./ kWh
alternativa 4				3													
alternativa 5				4 ou mais													

**Figura 7: Matriz multidimensional para o automóvel elétrico híbrido (PHEV) Chevrolet Volt.**

Fonte: elaborada pela autora

ANÁLISE MORFOLÓGICA - Introdução de VEÍCULOS ELÉTRICOS no Tráfego Urbano de SÃO PAULO																	
PARÂMETROS	ESCOPO		VEÍCULO - arquitetura e propulsão									INFRA-ESTRUTURA			MODELO de NEGÓCIO		
	finalidade	n. passag.	porte	n. rodas	carroceria	motor/energia	config.motor	armaz.energia	veloc.máx	emissões	autonomia	circunscrição	modo	recarga	finalidade	prop.veículo	prop.energia
alternativa 1	passageiros	1	mini	1	aberta	elétrico/rede EV	1 motor	bateria	baixa <50 km/h	baixas/nulas	<50 km	vizinhança	rodovia	rede em postos	privada	aquisição	aquisição
alternativa 2		2	compacto	2 série	fechada	elétrico/misto PHEV	2 cl/ 2 difer.		média 50-90 km/h	médias	50-200 km/h	urbano		rede em casa	comercial	aluguel	aluguel
alternativa 3		3-5	médio	2 paralelo			2 nas rodas		alta > 90 km/h			estrada		troca bateria		pagam./ km	pagam./ kWh
alternativa 4				3													
alternativa 5				4 ou mais													

**Figura 8: Matriz multidimensional para o automóvel elétrico (EV) Nissan Leaf**

Fonte: elaborada pela autora

#### 4.6 AVALIAÇÃO DE CONSISTÊNCIAS E SELEÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE INTERESSE

A próxima fase, na sequência do processo de análise morfológica, lida com a avaliação de consistência das combinações resultantes da matriz multidimensional parâmetros-alternativas. Um exemplo de inconsistência seria um veículo configurado com apenas uma roda, acionada por dois motores elétricos – parâmetros interligando arquitetura do veículo com sistema propulsor.

No aspecto tecnológico seria incompatível um veículo totalmente elétrico produzindo emissões gasosas pelo sistema de exaustão (inexistente), ou um veículo com propulsão híbrida (motor a gasolina e motor elétrico) desenvolvendo velocidade máxima de 50 km/h e/ou com autonomia menor que 50 km.

Uma avaliação técnica criteriosa indicaria a inviabilidade de muitos outros conjuntos de alternativas. Outras tantas configurações tecnicamente difíceis, embora possíveis, poderiam ser objeto de uma verificação de benefícios potenciais versus complexidade técnica.

Uma complementar avaliação de viabilidade econômica poderia descartar diversas outras configurações, como a construção de um veículo de médio porte/4 rodas, com complexa motorização híbrida (dois motores) para apenas um passageiro.

O resultado dessas avaliações, sob distintas abordagens, é a redução do espaço multidimensional, que inicialmente considerava todas as possibilidades combinatórias, identificando as configurações básicas de maior interesse para o esforço de previsão durante a subsequente etapa de construção dos cenários.

Nesse ponto, considerou-se imprescindível a participação de outros especialistas no tema, para enriquecer a discussão com conhecimentos específicos, outras distintas experiências e visões.

### **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A construção de cenários prospectivos, proporcionando uma visão geral dos desafios e oportunidades inerentes aos problemas complexos, promove uma forma otimizada de se compreender as articulações entre as inúmeras variáveis presentes que, por sua vez, impactam as situações futuras.

Espera-se que, ao lidar com a complexidade tecnológica e gerencial relacionada à introdução de veículos elétricos no tráfego urbano de São Paulo, o processo de Análise Morfológica possa instigar a criatividade na sugestão e desenvolvimento de novas soluções. E que contribua no esforço de se sistematizar a geração de conhecimentos para uma melhor avaliação das questões críticas relativas às distintas configurações que se apresentarem.

## REFERÊNCIAS

- BOOK, M. et al. (2009, Jan.). The Comeback of the Electric Car? How Real, How Soon, and What Must Happen Next. BCG The Boston Consulting Group.
- CHAN, C. C. (2002). The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE, 90 (2), 247-275.
- CLYMER, F. (1950). Treasury of early American automobiles: 1877-1925. New York: Ed. McGraw-Hill. In: US Department of Energy's. (2008). Clean cities fact sheet – low level ethanol fuel blends.
- CLEMENGER, S. (2008, Dec.). The World of electric vehicles: winter 2008 – 2009 review. EV World Publ.
- DIDIK, F. (2001). History and directory of electric cars from 1834-1987. Recuperado em novembro de 2010, de [http://www.didik.com/ev\\_hist.htm](http://www.didik.com/ev_hist.htm).
- European Environment Agency (EEA). (2009). Transport at a crossroads – TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union. Copenhagen: EEA-Report.
- GLENN, J. C. (editor). (1999). Futures research methodology - version 1.0. American Council for the United Nations University – The Millennium Project, EUA.
- GODET, M. (1993). Manual de prospectiva estratégica: da antecipação à ação. Lisboa: Publicações Dom Quixote.
- HACKER, F. et al. (2009, July). Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe – critical review. The European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC) Technical Paper 2009/4, European Environmental Agency.
- INOVAÇÃO UNICAMP. (2009, nov.). Baterias e recarga são gargalos tecnológicos para disseminação de carros elétricos. Campinas: Boletim Inovação Tecnológica.

- International Energy Agency (IEA). (2009). Technology Roadmap: electric and plug-in hybrid electric vehicles. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- JOHNSON, B.; WRIGHT, J.; GUIMARÃES, P. (1987, out.). Prognósticos tecnológicos como atividade complementar do planejamento: a experiência do CENPES em águas profundas. São Paulo: Fundação Instituto de Administração (FIA).
- MARTINO, J. P. (1993). Technological forecasting for decision making. 3.Ed. New York: Mc Graw-Hill Inc.
- MASON, D. H. (1994, Mar.-Apr.). Scenario-based planning: decision model for the learn organization. Planning Review.
- MAYNARD, M. (2008, nov.27). Carro elétrico é esperança da GM contra falência. The New York Times.
- MORA, R. (2010, nov.20). Fusion apresenta tecnologia híbrida ao Brasil. Portal ig.
- NÓBREGA, R. G.; STOLLENWERK. M. F. L. (1999, out.). Cenários múltiplos e aprendizagem organizacional: relato de uma experiência no Serpro. Rio de Janeiro: Anais FINEP I Workshop Brasileiro de Inteligência Competitiva e Gestão do Conhecimento.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2009). World Energy Outlook 2009. The International Energy Agency (IEA).
- PORTER, A. L., et al. (1991). Forecasting and management of technology. New York: Wiley Interscience.
- PORTER, M. E. (2002). A nova era da estratégia. In: Estratégia e planejamento: autores e conceitos imprescindíveis. Coletânea HSM Management. São Paulo: Publifolha, 21-38.
- RIBEIRO, J. M. F. (org.) (1997). O método de cenários de Michel Godet e a prospectiva estratégica. Série Prospectiva: métodos e aplicações, n.1, Lisboa: DSP-DPP (MF).
- RINGLAND, G. (1998). Scenario Planning: managing for the future. New York: John Wiley & Sons.
- SCHOEMAKER, P. J. H. (1995, winter). Scenario planning: a tool for strategic thinking. Sloan Management Review, 36 (2), 25-40.
- STURARI, R. (2008, ago.). Metodologia de descrição de cenários. SAGRES Política e Gestão Estratégica Aplicadas.
- TAMINIAU, Y. (2006). Beyond known uncertainties: interventions at the fuel-engine interface. Research Policy, 35, 247-265.



- VAN der WAL, S. Y. (2007). Evolutionary change in automotive technology: long term developments, artifacts, producers and consumers. European Commission Dynamics of Institution and Markets in Europe. Germany: Innovation Conference 2007.
- VELLOSO, J. P. R. (coordenador). (2010). Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil. Instituto Nacional de Altos Estudos (INAE), Rio de Janeiro Cadernos: Fórum Nacional 10.
- VINHOLES, T. (2010, nov.19). Toyota revela RAV4 EV por inteiro. Portal ig.
- WELCH, D.; CLOTHIER, M. (2010, Aug.2). The combustion engine gets downsized: Ecomotors promises 50 percent better mileage at a low cost. Bloomberg Business week Magazine.
- WRIGHT, J. T. C.; SPERS, R. A. (2000). Delphi: uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. In São Paulo: Caderno de Pesquisas em Administração, 1 (12).
- WRIGHT, J. T. C.; SPERS, R. G. (2006, jan.-abr.). O país no futuro: aspectos metodológicos e cenários. Estudos Avançados, 20 (56), 13-28,
- ZWICKY, F. (1969). Discovery, invention, research: through the morphological approach. Toronto: The Macmillan Company. Apud: RITCHEY, T. (1998). General morphological analysis: a general method for non-quantified modeling. Adapted from the paper Fritz Zwicky, Morphologie and Policy Analysis, Brussels: 16th EURO Conference on Operational Analysis.