

MARCELO LISBOA FERREIRA FILHO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE MERCADOLÓGICA DE AUTOMÓVEIS
ELÉTRICOS HÍBRIDOS *PLUG-IN* NO BRASIL**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção.

**São Paulo
2009**

MARCELO LISBOA FERREIRA FILHO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE MERCADOLÓGICA DE AUTOMÓVEIS
ELÉTRICOS HÍBRIDOS *PLUG-IN* NO BRASIL**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção.

Orientador:

Prof. Antônio Rafael Namur Muscat

**São Paulo
2009**

*À minha família,
que sempre me apoiou
em todas as circunstâncias*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antônio Rafael Namur Muscat, pelos inúmeros conselhos e sugestões dados ao longo do trabalho.

Aos meus colegas de faculdade, pela companhia, pelo apoio e por me darem sugestões valiosas, e aos meus colegas de trabalho, que me auxiliaram na definição do tema.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Produção, por todos os ensinamentos transmitidos.

À minha família e aos meus amigos, por todo o apoio, carinho e amizade que me foram dados ao longo de minha formação pessoal, profissional e acadêmica.

RESUMO

Este trabalho realiza uma análise de viabilidade mercadológica de uma categoria específica de veículos elétricos ainda não disponíveis no Brasil: os automóveis elétricos híbridos *plug-in*. Esses veículos combinam a flexibilidade dos veículos elétricos híbridos tradicionais, podendo utilizar tanto combustíveis líquidos como energia elétrica, com o potencial de anular completamente as emissões de poluentes, já que o uso do motor de combustão interna é opcional. O objetivo do trabalho é analisar qual seria a participação de mercado dos veículos em questão na venda de automóveis novos no Brasil, caso estivessem disponíveis. A análise é baseada no cálculo do valor presente líquido do investimento adicional para se adquirir um automóvel elétrico híbrido *plug-in*. O raciocínio por trás do cálculo é que o veículo elétrico possui um preço mais elevado, mas proporciona economias operacionais ao longo de sua vida útil. O consumidor adquirirá um automóvel desta categoria de acordo com a riqueza líquida gerada pelo investimento. A fim de tornar a análise realista, o perfil da frota de automóveis do Brasil é segmentado de acordo com a quilometragem anualmente percorrida e com o volume do motor. Além disso, algumas variáveis são consideradas estocásticas, de forma que o potencial de mercado é dado por uma distribuição de probabilidades. O resultado final, obtido através da simulação de Monte Carlo, mostra que a participação de mercado teórica desses automóveis é muito pequena. Entretanto, a evolução tecnológica das baterias bem como políticas governamentais de incentivo podem viabilizar o uso de tais veículos no futuro.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação. Engenharia econômica. Veículos automotores.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of marketing viability of a specific category of electric vehicles not yet available in Brazil: the plug-in hybrid electric cars. These vehicles combine the flexibility of the traditional hybrid electric vehicles, being able to use liquid fuels as much as electricity, with the potential to completely neutralize pollutant emissions, since the use of the internal combustion engine is optional. The objective of this paper is to analyze which would be the market share of the vehicles in study in the sales of new cars in Brazil, in case they were available. The analysis is based on the net present value of the additional investment to purchase a plug-in hybrid electric car. The reasoning behind the calculation is that the electric vehicle has a higher price, but provides operational savings over its lifetime. The consumer will purchase a car of this category according to the wealth generated by investment. In order to make a realistic analysis, the profile of the fleet of cars in Brazil is segmented according to the annual mileage and the volume of the engine. Furthermore, some variables are considered to be stochastic, so that the potential market share is given by a probability distribution. The final result, obtained by a Monte Carlo simulation, shows that the theoretical market share of these vehicles is very small. However, evolution in battery technology as well as government incentives policies can encourage the use of such vehicles in the future.

KEYWORDS: Simulation. Engineering economics. Automotive vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico a bateria.....	47
Figura 4.2: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido na configuração em série.....	48
Figura 4.3: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido na configuração em paralelo	48
Figura 4.4: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido plug-in na configuração em série	49
Figura 4.5: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido plug-in na configuração em paralelo.....	50
Figura 4.6: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico de célula a combustível.....	51
Figura 4.7: Chevrolet Volt (visão frontal)	53
Figura 4.8: Chevrolet Volt (visão traseira)	53
Figura 4.9: Chevrolet Volt (visão interna).....	54
Figura 5.1: Quadro conceitual do modelo	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Evolução da produção de automóveis e comerciais leves no Brasil	40
Gráfico 3.2: Evolução das vendas internas de automóveis e comerciais leves no Brasil.....	41
Gráfico 3.3: Evolução das exportações de automóveis e comerciais leves no Brasil	42
Gráfico 3.4: Comparação das exportações acumuladas no Brasil com a taxa de câmbio	43
Gráfico 3.5: Vendas de veículos leves por tipo de combustível no Brasil	44
Gráfico 3.6: Vendas de automóveis por tipo de combustível no Brasil	45
Gráfico 5.1: Distribuição da quilometragem percorrida por ano pelos veículos pesquisados .	67
Gráfico 5.2: Distribuição percentual da quilometragem percorrida por ano	68
Gráfico 5.3: VPL de referência para motoristas de automóveis com motor maior que 1,0 litro e menor ou igual a 1,6 litro localizados no Acre	99
Gráfico 5.4: Distribuição do market share dos automóveis elétricos híbridos plug-in no Brasil	101
Gráfico 6.1: Distribuição do market share dos automóveis elétricos híbridos plug-in no Brasil considerando créditos fiscais	104
Gráfico 6.2: Distribuição do market share dos automóveis elétricos híbridos plug-in no Brasil considerando redução no preço das baterias.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Evolução da redução de IPI para veículos no Brasil	42
Tabela 4.1: Especificações técnicas do Chevrolet Volt.....	55
Tabela 5.1: Faixas de quilometragem percorrida	66
Tabela 5.2: Distribuição percentual da frota de veículos por motor	70
Tabela 5.3: Frota de automóveis por estado	71
Tabela 5.4: Distribuição da frota de veículos por quilometragem percorrida, por motor e por estado (para o estado do Acre)	72
Tabela 5.5: Preços médios dos combustíveis por estado.....	75
Tabela 5.6: Tarifas médias de energia elétrica por estado.....	76
Tabela 5.7: Evolução do preço do álcool por estado.....	78
Tabela 5.8: Evolução do preço da gasolina por estado.....	79
Tabela 5.9: Evolução das tarifas de energia elétrica por estado.....	80
Tabela 5.10: Performance média da gasolina em automóveis convencionais por categoria de volume de motor.....	85
Tabela 5.11: Eficiência relativa dos combustíveis	85
Tabela 5.12: Performance média dos combustíveis utilizados em veículos convencionais e no Chevrolet Volt	87
Tabela 5.13: Custo médio por km percorrido para o estado do Acre.....	89
Tabela 5.14: Economia média por km percorrido para o estado do Acre	92
Tabela 5.15: Valores limite de investimento adicional na compra de veículos elétricos.....	96
Tabela 5.16: VPL de referência para o estado do Acre	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
BEV	Battery Electric Vehicle
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPU	Unidade Central de Processamento
Denatran	Departamento Nacional de Trânsito
HC	Hidrocarbonetos
HEV	Hybrid Electric Vehicle
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
MCI	Motor de Combustão Interna
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
PBT	Peso Bruto Total
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
TIR	Taxa Interna de Retorno
TIRM	Taxa Interna de Retorno Modificada
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO DE TRABALHO	14
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
1.3 O ESTÁGIO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE INVESTIMENTOS	16
2.1.1 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	17
2.1.2 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)	19
2.1.3 PERÍODO DE <i>PAYBACK</i>	20
2.2 DECISÕES ECONÔMICAS EM SITUAÇÃO DE INCERTEZA	23
2.2.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	23
2.2.2 PONTOS DE EQUILÍBRIO	23
2.2.3 ANÁLISE DE CENÁRIOS	24
2.2.4 MÉTODOS ANALÍTICOS	24
2.2.5 SIMULAÇÃO	24
2.3 SELEÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE PARA VARIÁVEIS DE ENTRADA	30
2.3.1 SELEÇÃO DAS ENTRADAS DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO	30
2.3.2 SELEÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES NA AUSÊNCIA DE DADOS	32
3. O MERCADO BRASILEIRO DE AUTOMÓVEIS	39
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS SEGUNDO A ANFAVEA	39
3.2 PRODUÇÃO DE AUTOMÓVEIS E COMERCIAIS LEVES	40
3.3 VENDAS INTERNAS DE AUTOMÓVEIS E COMERCIAIS LEVES	40
3.4 EXPORTAÇÕES DE AUTOMÓVEIS E COMERCIAIS LEVES	42
3.5 VENDAS INTERNAS DE AUTOMÓVEIS E COMERCIAIS LEVES POR TIPO DE COMBUSTÍVEL	43
4. VISÃO GERAL DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	46
4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	46
4.1.1 VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA	46
4.1.2 VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO	47
4.1.3 VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO <i>PLUG-IN</i>	49
4.1.4 VEÍCULO ELÉTRICO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL	50
4.1.5 VEÍCULO SOLAR	51
4.2 ESCOLHA DO TIPO DE VEÍCULO ELÉTRICO E DO AUTOMÓVEL MODELO	51

5. DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	57
5.1 VISÃO GERAL DO MODELO	57
5.2 DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS	63
5.2.1 ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DA QUILOMETRAGEM PERCORRIDA	63
5.2.2 FROTA DE VEÍCULOS POR MOTOR	68
5.2.3 FROTA DE VEÍCULOS POR ESTADO	70
5.2.4 CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS	72
5.3 VPL (VALOR PRESENTE LÍQUIDO)	73
5.3.1 PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS E DA ENERGIA ELÉTRICA	74
5.3.2 PERFORMANCE DOS COMBUSTÍVEIS E DA ENERGIA ELÉTRICA	82
5.3.3 CÁLCULO DO CUSTO POR KM PERCORRIDO	88
5.3.4 CÁLCULO DA ECONOMIA DO VEÍCULO ELÉTRICO	90
5.3.5 INVESTIMENTO ADICIONAL PARA COMPRA DO VEÍCULO ELÉTRICO	93
5.3.6 CÁLCULO DO VPL	97
5.4 CÁLCULO DA MIGRAÇÃO PARA OS VEÍCULOS ELÉTRICOS	100
6. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	103
6.1 INCETIVOS DO GOVERNO	103
6.2 REDUÇÃO NOS PREÇOS DAS BATERIAS	105
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	107
7.1 INFRA-ESTRUTURA	107
7.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	108
7.3 CONCLUSÃO FINAL	109
7.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	110
REFERÊNCIAS	111

1. Introdução

O mercado automobilístico está atualmente passando por diversas transformações. As recentes altas no preço do petróleo, que atingiu o patamar de cerca de US\$ 147,27 por barril em meados de 2008¹, as questões ambientais que tangem as emissões de poluentes e a atual crise econômica trouxeram à tona discussões a respeito do tipo de força motriz a ser utilizada nos automóveis.

Nesse contexto, os automóveis elétricos híbridos movidos a gasolina e a energia elétrica estão se tornando uma realidade. O Toyota Prius é exemplo de automóvel elétrico híbrido que vem conquistando o consumidor americano. A GM, por outro lado, está desenvolvendo um modelo revolucionário, o Chevrolet Volt, que possui vantagens significativas sobre seus concorrentes.

1.1 Objetivo de trabalho

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade mercadológica de uma categoria específica de automóveis elétricos no Brasil, que são os automóveis elétricos híbridos *plug-in*. Em outras palavras, pretende-se avaliar qual seria a participação desses automóveis na venda de automóveis novos no mercado brasileiro caso estivessem disponíveis. Esse tipo de análise, normalmente utilizada para avaliar o lançamento de novos produtos, será feita com base num modelo de simulação estocástico estático que simula, através do método de Monte Carlo, o *market share* dos automóveis elétricos baseado no valor presente líquido proporcionado pelo investimento adicional na compra de tais veículos. O automóvel que será utilizado como modelo para análise é o Chevrolet Volt.

¹ De acordo com Exame (2009)

1.2 Organização do trabalho

Segue abaixo o resumo dos capítulos deste trabalho.

O Capítulo 2 trata da revisão da literatura sobre os três principais temas envolvidos neste trabalho, que são: métodos de análise de investimentos, decisões econômicas em ambientes de incerteza e seleção de distribuições de probabilidade para variáveis.

O Capítulo 3 apresenta um panorama geral do mercado automobilístico brasileiro, com foco em dados de produção, vendas e exportação de veículos.

O Capítulo 4 fornece uma visão geral dos veículos elétricos, explicando como eles são classificados, justificando o porquê da escolha dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* como categoria de análise e do Chevrolet Volt como automóvel modelo.

O Capítulo 5 apresenta a definição do problema, mostra como será desenvolvido o modelo e fornece os resultados finais da simulação.

O Capítulo 6 foca na realização de análises de sensibilidade para avaliar o impacto de mudanças no valor de uma das variáveis no resultado final.

O Capítulo 7 apresenta as considerações finais do estudo e as principais conclusões.

1.3 O estágio

A inspiração do presente estudo partiu do estágio realizado na consultoria estratégica A.T. Kearney durante os anos de 2008 e 2009. Durante esse período, o autor desenvolveu modelos específicos para responder às principais perguntas dos clientes. É fundamental enfatizar, entretanto, que o modelo utilizado neste trabalho foi inteiramente desenvolvido pelo autor exclusivamente para este estudo, com base em dados obtidos pelo autor. A única exceção são os dados apresentados na tabela 5.2, no capítulo 5, dados estes que foram obtidos através da A.T. Kearney. Dessa forma, com exceção destes dados, não há qualquer vínculo entre o presente trabalho e a A.T. Kearney a não ser o raciocínio analítico que foi desenvolvido ao longo do período de estágio.

2. Referencial teórico

Nesse capítulo serão abordados os três temas teóricos mais relevantes para este trabalho: métodos de avaliação econômica de investimentos, decisões econômicas em situação de incerteza e seleção de distribuições de probabilidade para variáveis de entrada.

2.1 Métodos de avaliação econômica de investimentos

Os métodos de análise de investimentos são ferramentas muito úteis na tomada de decisão. Os administradores constantemente se deparam com possibilidades de investimento e precisam decidir quais são os que trarão melhores resultados para a empresa.

Segundo Neto (2006, p. 305), “As decisões de investimento de capital são uma área de estudo bastante ampla e complexa, que envolve inúmeros critérios e métodos de análise”. Esse autor classifica os métodos em dois grupos. O primeiro grupo é composto por métodos que não consideram o valor do dinheiro no tempo e o segundo por métodos que avaliam essa variação através do critério do fluxo de caixa descontado. Por serem conceitualmente mais rigorosos e mais relevantes para as decisões de longo prazo, os métodos que pertencem ao segundo grupo são mais estudados. Como exceção, o autor em questão cita o método do tempo de retorno do investimento, também conhecido como período de *payback*. Neto (2006) afirma que esse método, embora esteja enquadrado no primeiro grupo, é relevante na tomada de decisão. Além disso, como será visto mais adiante, é possível sofisticar o cálculo do período de *payback* considerando o valor do dinheiro no tempo.

Torres (2006), de maneira semelhante, também classifica os critérios de análise de investimentos em duas categorias: critérios científicos ou exatos, que incluem no cálculo o valor do dinheiro no tempo e levam em conta todos os valores do fluxo de caixa do projeto, e critérios empíricos ou aproximados, que não consideram o valor do dinheiro no tempo ou não levam em conta certas partes do fluxo de caixa ou possuem ambas as restrições.

Nesse contexto, o objetivo deste item é apresentar, de maneira resumida, os três métodos quantitativos de análise de investimentos mais utilizados, descrevendo seus pontos fortes e suas limitações.

2.1.1 Taxa interna de retorno (TIR)

Neto (2006, p. 309) conceitua a taxa interna de retorno como sendo “[...] a taxa de desconto que iguala, em determinado momento (geralmente usa-se a data de início do investimento – momento zero), as entradas e saídas previstas de caixa”. Isso significa, segundo o autor supracitado, que a taxa interna de retorno representa o retorno sobre o capital investido em termos de taxa de juros composta equivalente periódica. Nota-se que esse método incorpora o valor do dinheiro no tempo. A representação matemática da taxa interna de retorno proposta pelo autor é a seguinte:

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t}$$

Em que:

FC_t = fluxo (benefício líquido) de caixa de cada período;

K = taxa de juros equivalente periódica (TIR);

I_0 = investimento realizado no momento zero;

I_t = investimentos previstos nos períodos subseqüentes.

Neto (2006) diz que para se determinar se um dado investimento é economicamente atraente para a empresa, deve-se confrontar a taxa interna de retorno calculada para o investimento com a taxa mínima de atratividade (TMA), que representa a rentabilidade mínima que a empresa deseja obter em seus investimentos. Dessa forma, o método em questão diz que um investimento é considerado economicamente atrativo se sua taxa interna de retorno for maior ou igual à TMA determinada pela empresa.

Torres (2006) acredita que uma das razões do método da taxa interna de retorno ser popularmente aceito consiste no fato desse método ser calculado exclusivamente com base nos fluxos de caixa do projeto, sem necessidade de utilizar uma taxa mínima de atratividade. Entretanto, embora a TMA não faça parte do cálculo da TIR, ela precisa ser definida para avaliar a atratividade econômica do investimento, como acima explicado.

A seguir, algumas características envolvidas no método da taxa interna de retorno serão abordadas.

TIR em investimentos não convencionais

Segundo Neto (2006), investimentos convencionais são aqueles em que há apenas uma inversão de sinais² na seqüência de fluxos de caixa do investimento. Nesses casos, a taxa interna de retorno sempre existe, é única e apresenta valor positivo. Contudo, é possível que haja mais de uma inversão de sinais no horizonte de certo investimento. Neste tipo de investimento, chamado de investimento não convencional, pode haver problemas algébricos e de interpretação de taxas múltiplas, tornando o método da TIR pouco operacional.

Premissa da TIR

Neto (2006) ressalta que o cálculo da taxa interna de retorno admite implicitamente que todos os fluxos de caixa ao longo do horizonte de investimento são reinvestidos à própria TIR. Em muitos casos essa situação não é verificada na prática. Nem sempre é possível reinvestir os fluxos de caixa intermediários à TIR. A fim de corrigir essa restrição do método da taxa interna de retorno, Neto (2006) sugere o uso da taxa interna de retorno modificada (TIRM), que permite a inclusão dos valores das taxas de reaplicação dos fluxos intermediários.

Torres (2006, p. 54), por outro lado, diz que a TIRM é um critério inadequado e incoerente. Esse autor diz que o critério em questão “[...] é um critério empírico, disfarçado de critério científico”.

² Saídas de caixa são representadas por sinais negativos e entradas de caixa por sinais positivos

2.1.2 Valor presente líquido (VPL)

Neto (2006, p. 319) diz que “A medida do valor presente líquido é obtida pela diferença entre o valor presente dos benefícios líquidos de caixa [...] e o valor presente do investimento (desembolso de caixa)”. A representação matemática do VPL proposta por este autor é a seguinte:

$$VPL = \left[\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} \right] - \left[I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} \right]$$

Em que:

FC_t = fluxo (benefício líquido) de caixa de cada período;

K = taxa de desconto do projeto que representa a rentabilidade mínima exigida (TMA);

I_0 = investimento realizado no momento zero;

I_t = investimentos previstos nos períodos subseqüentes.

O uso desse método pressupõe a definição de uma taxa de desconto mínima requerida. Essa taxa, designada por K na representação matemática acima exposta, será utilizada para atualizar os fluxos de caixa a valores presentes. Assim, Neto (2006) diz que o VPL simboliza a riqueza atualizada do projeto.

Para se determinar a atratividade econômica do investimento o referido autor afirma que basta verificar se o valor presente líquido é maior ou igual a zero. Em caso positivo, o investimento é economicamente atraente. Já em caso negativo, entende-se que o retorno é inferior ao mínimo exigido pela empresa.

Premissa do VPL

Neto (2006) enfatiza que, assim como o método da taxa interna de retorno, o método do valor presente líquido admite o reinvestimento dos fluxos de caixa intermediários à taxa de desconto utilizada no seu cálculo. Entretanto, a taxa utilizada no método do VPL é a taxa mínima de atratividade, que é definida pela própria empresa, ao passo que a taxa utilizada no método da TIR é a própria TIR do projeto. Dessa maneira, o referido autor considera o método do VPL menos duvidoso que o método da TIR.

2.1.3 Período de *payback*

A definição desse método proposta por Neto (2006, p. 305) diz que o período de *payback* “[...] consiste na determinação do tempo necessário para que o dispêndio de capital (valor do investimento) seja recuperado por meio dos benefícios incrementais líquidos de caixa (fluxo de caixa) promovidos pelo investimento”. Em outras palavras, o período de *payback* é o tempo requerido para que o investimento seja pago. Vale ressaltar que no método do *payback* os fluxos de caixa referentes a momentos diferentes são somados sem considerar o valor do dinheiro no tempo.

Torres (2006) enfatiza que o método do *payback* é bastante utilizado graças a sua simplicidade, uma vez que não é necessário definir qualquer tipo de taxa mínima, e a sua fácil interpretação.

Segundo Neto (2006), o cálculo do período de *payback* pode ser feito de duas maneiras: tempo de retorno médio e tempo de retorno efetivo. O autor enfatiza que para fluxos de caixa iguais, as duas maneiras acima descritas fornecerão o mesmo resultado. A decisão de aceitar ou rejeitar certo projeto deverá ser tomada comparando-se o período de *payback* com o tempo limite estabelecido pela empresa.

Tempo de retorno médio (*payback* médio)

O cálculo é baseado na comparação do valor médio dos fluxos de caixa com o investimento realizado. Em primeiro lugar, somam-se os valores de todos os fluxos de caixa, sem considerar o valor do dinheiro no tempo. Em seguida, divide-se o resultado dessa soma pelo número de períodos em questão. O resultado obtido é o valor médio dos fluxos de caixa. Por último, divide-se o valor do investimento pelo valor médio dos fluxos de caixa, obtendo-se o número médio de períodos necessários para recuperar o investimento através dos benefícios incrementais líquidos de caixa.

Uma vez que o tempo de retorno médio não considera a distribuição dos fluxos de caixa ao longo dos períodos, o resultado pode ser distorcido.

Tempo de retorno efetivo (*payback* efetivo)

Nesse caso, considera-se a distribuição dos fluxos de caixa ao longo dos períodos. Para se calcular o tempo de retorno efetivo, deve-se somar os valores dos fluxos de caixa de cada período, a partir do primeiro período, até que a soma acumulada seja maior ou igual ao investimento realizado. Se a soma acumulada for igual ao investimento num certo período, o tempo de retorno efetivo será exato e corresponderá ao período em questão. Em contrapartida, se a soma acumulada dos fluxos de caixa num certo período for maior do que o valor do investimento e a soma acumulada no período imediatamente anterior for menor do que o investimento, o tempo de retorno efetivo estará entre esses dois períodos.

Neto (2006) enfatiza que o *payback* efetivo reflete de maneira mais realista o comportamento dos fluxos de caixa, considerando os períodos de ocorrência. Assim, segundo esse autor, esse método é tecnicamente superior ao *payback* médio.

Restrições ao método de *payback*

Segundo Neto (2006), o método de *payback* apresenta duas importantes restrições:

(1) Não considera os valores dos fluxos de caixa e sua distribuição nos períodos anteriores ao período de *payback*;

(2) Não considera os fluxos de caixa existentes após o período de *payback*.

De acordo com Neto (2006), a consequência da restrição (1) é que o método não é capaz de identificar diferenças entre os fluxos de caixa que ocorrem antes do período de *payback*. Assim, por não levar em consideração o valor do dinheiro no tempo, o método do *payback* pode indicar que duas alternativas distintas em termos dos fluxos de caixa anteriores ao período de *payback* sejam equivalentes.

Além disso, de acordo com a restrição (2), Neto (2006) enfatiza que os fluxos de caixa que ocorrem após o período de *payback* não são levados em conta. Logo, alternativas distintas em termos dos fluxos de caixa posteriores ao período de *payback* podem ser consideradas equivalentes pelo método.

Uma maneira de corrigir a restrição (1) proposta por Neto (2006) é introduzir ao método o critério do fluxo de caixa descontado, atualizando os fluxos de caixa para o momento inicial com o uso de uma taxa de desconto que reflita o valor do dinheiro no tempo. O fluxo de caixa acumulado deve ser comparado com o investimento inicial a fim de se determinar em que momento esse investimento é pago.

Entretanto, por considerar método do *payback* um critério empírico, Torres (2006, p. 61), acredita que “[...] é ilusório tentar melhorá-lo usando valores atualizados, como fazem alguns, pois a maior objeção refere-se ao desprezo do restante do fluxo de caixa”.

De qualquer maneira, Neto (2006) ressalta que a atualização dos fluxos de caixa para o momento inicial não anula a restrição (2), ou seja, os fluxos de caixa após o período de *payback* continuam não sendo considerados.

Em face a essas restrições, Neto (2006) recomenda o uso do método de *payback* como uma ferramenta acessória, sendo esse método, na opinião do autor, inferior aos métodos da

taxa interna de retorno (TIR) e do valor presente líquido (VPL). Torres (2006) ressalta que o método de *payback* pode não ser coerente com os critérios científicos.

2.2 Decisões econômicas em situação de incerteza

Um elemento geralmente presente na tomada de decisão é a incerteza:

“As decisões financeiras de uma empresa não são geralmente tomadas em ambientes de total certeza com relação a seus resultados previstos. Por estarem essas decisões fundamentalmente voltadas para o futuro, é imprescindível que se introduza a variável incerteza como um dos mais significativos aspectos do estudo”. (NETO, 2006, p. 339)

Com relação aos valores adotados na construção dos fluxos de caixa, Torres (2006, p. 93), diz que “Na realidade, estes valores geralmente são estimativas, cheias de incerteza, dos valores mais prováveis [...]”.

Torres (2006) propõe métodos quantitativos e qualitativos para avaliar a incerteza. A seguir, cada um deles será examinado.

2.2.1 Análise de sensibilidade

Torres (2006, p. 94) propõe que “A análise de sensibilidade consiste em variar um ou mais fatores que influenciam o fluxo de caixa do projeto, mantendo os demais em seu nível de referência, e calcular o efeito na variável de decisão”. O objetivo é determinar a influência ou o impacto de cada fator no resultado final.

2.2.2 Pontos de equilíbrio

Segundo Torres (2006), esse método consiste em calcular quais são os valores máximos ou mínimos que cada variável pode assumir a partir dos quais o projeto torna-se economicamente inviável. Esses valores são conhecidos como pontos de equilíbrio.

2.2.3 Análise de cenários

Semelhante ao método da análise de sensibilidade, este método consiste na definição de cenários. Segundo Torres (2006, p. 97): “Um cenário é um conjunto de valores das variáveis que modela uma situação particular”. O autor em questão diz que geralmente utiliza-se um cenário pessimista e um otimista para comparação com o cenário-base (também chamado de cenário de referência, que representa o cenário mais provável).

2.2.4 Métodos analíticos

Torres (2006) diz que os métodos analíticos consistem em definir os fluxos de caixa como sendo variáveis aleatórias, de maneira que o resultado final será uma distribuição de probabilidades. O cálculo da média e da variância do resultado final, que pode ser o VPL de um projeto, por exemplo, baseia-se nas propriedades das variáveis aleatórias.

2.2.5 Simulação

De acordo com Torres (2006, p. 100), essa técnica “Consiste em usar um modelo do projeto para analisar o seu comportamento ou desempenho em condições aleatórias”.

Winston (2004, p. 1145, tradução nossa) diz que “simulação é uma técnica científica de gestão muito poderosa e largamente utilizada em estudos e análises de sistemas complexos”. Esse autor afirma que, muitas vezes, por conta da complexidade e das relações estocásticas, é difícil modelar analiticamente problemas do mundo real. Para modelar analiticamente tais problemas, às vezes é necessário recorrer a tantas simplificações que a resposta final fica comprometida. Nesses casos, o uso da simulação pode ser a única alternativa.

O autor supracitado define simulação como sendo:

“[...] a técnica que imita a operação de sistemas do mundo real à medida que evolui ao longo do tempo [...] Isso é normalmente feito através de um modelo de simulação. Um modelo de simulação geralmente consiste em um conjunto de premissas sobre a operação de um sistema, expressas através de relações matemáticas ou lógicas entre as variáveis. Ao contrário das soluções matemáticas exatas disponíveis através da maioria dos modelos analíticos, o processo de simulação envolve a execução do modelo ao longo do tempo, geralmente utilizando um computador, para gerar amostras representativas de medidas de desempenho”. (WINSTON, 2004, p. 1145, tradução nossa)

De acordo com Winston (2004), a técnica de simulação apresenta vantagens e desvantagens. Segundo este autor, a maior vantagem está relacionada ao fato de a simulação ser considerada por ele uma teoria bastante direta, sendo mais fácil de ser aplicada do que os métodos analíticos. Outro ponto positivo apontado pelo autor é que, ao contrário dos métodos analíticos, que requerem uma série de premissas simplificadoras, a simulação não adota tais restrições, o que lhe confere mais flexibilidade na representação do sistema real. Isso significa que, depois de construído, é possível utilizar o modelo de simulação para avaliar várias políticas ou parâmetros diferentes. Em contrapartida, ao contrário dos métodos analíticos, o autor supracitado diz que a simulação não é uma técnica de otimização. Segundo ele, a otimização através da simulação, embora possível, pode ser um processo demorado. Outro ponto negativo apontado pelo autor é que a simulação pode ser custosa. Todavia, os avanços na computação têm permitido que o custo se torne um fator menos importante.

Naylor et al. (1971) apresentam diversas razões que justificam o uso da simulação:

- A simulação permite o estudo de interações complexas de um sistema;
- A simulação permite o estudo dos impactos no comportamento do sistema decorrentes de alterações no modelo;
- Através da simulação pode-se melhor entender o sistema, de maneira que seja mais fácil enxergar alternativas de melhoria;
- É possível utilizar a simulação pedagogicamente para ensinar estudantes e profissionais;
- Os jogos operacionais, que são simulações que envolvem conflitos de interesse entre os participantes, despertam o interesse dos jogadores e são considerados muito úteis para as pessoas que deles participam;

- É possível testar os efeitos das variações num sistema antes que elas sejam implementadas no sistema real;
- Através da simulação é possível identificar as variáveis mais relevantes e entender como elas interagem;
- É possível utilizar a simulação para testar novas experiências sobre as quais não se possui muita informação;
- Pode-se utilizar a simulação para analisar novas políticas antes que elas sejam postas em prática;
- A simulação permite a subdivisão de um sistema complicado em subsistemas;
- O método de Monte Carlo, que será visto mais à frente, pode ser a única alternativa na resolução de certos tipos de problemas estocásticos cuja sequência de eventos é importante;
- Através da simulação de Monte Carlo pode-se testar soluções analíticas;
- Através da simulação é possível estudar sistemas dinâmicos em tempo real, reduzido ou dilatado;
- A simulação é uma boa ferramenta para testar os efeitos da introdução de novos componentes num sistema, a fim de identificar gargalos ou outros tipos de problema que possam aparecer;
- A simulação fornece uma boa visão geral do problema, de maneira que os analistas possam enxergá-lo de forma holística.

A seguir, serão apresentadas algumas definições envolvidas no processo de simulação.

Classificações das variáveis

- **Variáveis exógenas**

Naylor et al. (1971, p. 20) dizem que “Variáveis exógenas são as variáveis independentes ou de entrada do modelo e são consideradas como tendo sido previamente determinadas e fornecidas [...]”. Este tipo de variável não é influenciada pelo sistema, podendo ser tratada como parâmetro ou, no caso das variáveis estocásticas, sendo gerada por computador.

- **Variáveis de estado**

Segundo Naylor et al. (1971, p. 20), “As variáveis de estado descrevem o estado de um sistema ou de um de seus componentes, quer no início de um determinado período de tempo, quer no seu término, ou ainda durante o decorrer de um certo período”. Este tipo de variável interage com as variáveis exógenas e endógenas.

- **Variáveis endógenas**

De acordo com Naylor et al. (1971, p. 21), “As variáveis endógenas são as variáveis dependentes ou de saída do sistema e são geradas pela interação das variáveis exógenas e de estado, de acordo com as características operacionais do sistema”.

Classificações dos modelos de simulação

Naylor et al. (1971) classificam os modelos de simulação nas seguintes categorias:

- **Modelos determinísticos e estocásticos**

- **Determinísticos**

As variáveis exógenas e endógenas não são aleatórias, de forma que as características operacionais não são probabilísticas. Embora seja possível utilizar a análise de Monte Carlo, técnicas analíticas costumam funcionar bem com esse tipo de modelo.

- **Estocásticos**

Contêm pelo menos uma variável aleatória, representada por uma função de probabilidade. Técnicas analíticas são muito limitadas quando utilizadas na solução deste tipo de modelo. Nesses casos a simulação é fortemente recomendada.

- **Modelos estáticos e dinâmicos**

- **Estáticos**

São os modelos que não incorporam a variável tempo, ou seja, representam um sistema num determinado momento. Os autores em questão enfatizam que grande parte dos estudos voltados à área de pesquisa operacional utiliza modelos estáticos.

- **Dinâmicos**

Incorporam a variável tempo, ou seja, representam um sistema à medida que ele evolui ao longo do tempo.

Simulação de Monte Carlo

Torres (2006) diz que a análise de Monte Carlo é uma das técnicas mais utilizadas. O método consiste em executar o projeto diversas vezes, a fim de se obter uma distribuição de probabilidades das variáveis.

Winston (2004) define a simulação de Monte Carlo como sendo o processo de geração de variáveis aleatórias a partir de certa distribuição de probabilidades.

Naylor et al. (1971) recomendam o uso da análise de Monte Carlo quando se está lidando com problemas probabilísticos ou estocásticos. Entretanto, os referidos autores dizem que a técnica em questão também pode ser aplicada em problemas determinísticos que são difíceis de serem resolvidos através de métodos analíticos.

Planejamento do processo de simulação

Winston (2004) propõe oito passos principais para planejar um processo de simulação. O autor enfatiza que nem todas as experiências de simulação incluem todos esses passos ou seguem exatamente a ordem que ele sugere. Há, também, sobreposição entre alguns passos. Seguem abaixo os passos propostos por Winston (2004):

i) Formulação do problema

O primeiro passo consiste em formular o problema, definindo-se os objetivos que se pretende alcançar. Neste momento deve-se definir qual pergunta se deseja responder.

ii) Coleta de dados e desenvolvimento do modelo

Esta etapa representa o processo de recolhimento dos fatos disponíveis que serão utilizados no processo de simulação e também a construção do modelo propriamente dita. Com relação à coleta de dados, Naylor et al. (1971) atentam para o fato de que a maneira como os dados estão registrados nem sempre é a mais adequada para uso na simulação. A respeito da construção do modelo, Winston (2004) diz que é uma das etapas mais difíceis de todo o processo, sendo uma mistura de ciência e arte. É preciso definir as variáveis e as relações lógicas entre elas.

iii) Desenvolvimento de um programa de computador

Após o desenvolvimento do modelo, é preciso definir uma linguagem de programação para que ele possa ser analisado pelo computador.

iv) Verificação do modelo de computador

Uma vez que o programa foi construído, é preciso verificar se ele está funcionando corretamente. A dificuldade desta etapa está no fato de, em geral, não se ter resultados com os quais a resposta da simulação possa ser comparada.

v) Validação do modelo de simulação

Nesta etapa deve-se avaliar o quão realista e confiável é o modelo, ou seja, quão bem ele representa a realidade que se está estudando. Analogamente à etapa de verificação, este passo também é complicado pelos mesmos motivos.

vi) Desenho do experimento

Com o modelo validado, parte-se para o desenho do experimento, que consiste em definir como a simulação será realizada.

vii) Realização da simulação

Esta etapa consiste na realização do experimento propriamente dito. As informações geradas pelo modelo devem ser coletadas, processadas e analisadas.

viii) Documentação e implementação

Por último, deve-se documentar os resultados e implementar a solução.

2.3 Seleção de distribuições de probabilidade para variáveis de entrada

Nos itens anteriores foi dito que em situações de incerteza algumas variáveis do problema que se está estudando são aleatórias. Nesse contexto, o objetivo deste item é apresentar técnicas para seleção das entradas de um modelo de simulação, com foco em estratégias de atribuição de distribuições de probabilidades a variáveis aleatórias quando se dispõe de poucos dados a respeito de seu comportamento.

2.3.1 Seleção das entradas de um modelo de simulação

Banks; Carson e Nelson (1996) atentam para o fato de que as saídas de um modelo de simulação podem levar a recomendações equivocadas caso as entradas do modelo não sejam adequadas. Esses autores propõem quatro passos no desenvolvimento de um modelo para dados de entrada:

i) Coletar dados do sistema real que se está estudando

Em geral, esta etapa consome bastante tempo. Os autores acima mencionados ressaltam que nem sempre é possível colher dados. Técnicas utilizadas em situações em que há poucos ou nenhum dado serão estudadas mais adiante.

ii) Identificar uma distribuição de probabilidades para representar a variável de entrada

Nesta etapa, nos casos em que há disponibilidade de dados, geralmente se constrói um histograma dos dados. De acordo com o histograma e com o conhecimento que se tem do processo é possível selecionar uma família de distribuições. Algumas distribuições conhecidas podem ser utilizadas (elas geralmente representam uma boa aproximação).

iii) Escolher os parâmetros que determinam um exemplo específico da família de distribuição de probabilidades

Nos casos em que há disponibilidade de dados, estes dados podem ser utilizados para estimar os parâmetros.

iv) Avaliar o grau de adequação da distribuição escolhida e dos parâmetros a ela associados

Há duas maneiras de avaliar o grau de adequação: através de métodos gráficos ou através de testes estatísticos, como o teste qui-quadrado e o Kolmogorov-Smirnov. Se a distribuição não for adequada, deve-se voltar ao **passo ii)** e repetir o processo. Se esta etapa for repetida muitas vezes sem sucesso, pode-se utilizar uma distribuição empírica.

Law e Kelton (1991) dizem que, quando há disponibilidade de dados a respeito de uma variável aleatória de entrada (o exemplo utilizado pelos autores é baseado na variável aleatória “tempo de serviço”, mas poderia ser utilizado com outros tipos de variáveis aleatórias), esses dados podem ser utilizados em uma das seguintes abordagens para especificar uma distribuição de probabilidades:

i) Utilizar os próprios dados diretamente na simulação

Neste caso os próprios dados são utilizados na simulação. Se os dados representam tempos de serviço, escolhe-se um dos valores disponíveis e este valor será utilizado toda vez que for requerido o uso da variável que representa o tempo de serviço na simulação.

ii) Utilizar os dados para definir uma função de distribuição empírica

Nesta abordagem, se os dados representam tempos de serviço, poder-se-ia utilizar uma distribuição empírica construída a partir dos dados sempre que for necessário utilizar tempos de serviço na simulação.

iii) Utilizar técnicas de inferência estatística para ajustar uma distribuição teórica aos dados e realizar testes de hipótese para determinar o grau de adequação

Se for possível selecionar uma distribuição teórica que represente adequadamente os dados de tempos de serviço, então essa distribuição poderia ser utilizada sempre que for necessário simular tempos de serviço.

2.3.2 Seleção de distribuições de probabilidades na ausência de dados

Nota-se que as abordagens dos autores mencionados no item anterior partem do pressuposto da existência de dados a respeito da variável em estudo. Entretanto, como foi dito, os dados nem sempre estão disponíveis. Situações como essas podem acontecer quando se está estudando processos que ainda não existem ou processos cujos dados são difíceis de serem obtidos. É possível, também, que a obtenção dos dados seja dificultada por limitações de tempo ou por aspectos legais. Nesses casos, é possível utilizar alguns métodos para definir a distribuição de probabilidades de certa variável de entrada.

Law e Kelton (1991) propõem dois procedimentos heurísticos para escolher uma distribuição de probabilidades quando não há disponibilidade de dados. Esses autores admitem como premissa que a quantidade aleatória de interesse é uma variável aleatória contínua, denominada X . Embora os autores admitam que X é o tempo de execução de uma tarefa, o método também funciona com outros tipos de variáveis aleatórias. O primeiro passo, independentemente do procedimento a ser adotado, é a identificação de um intervalo $[a,b]$, em que a e b são números reais e $a < b$, em que se acredita que X pode ser encontrado com probabilidade próxima de 1. Em outras palavras, $P(X < a) = P(x > b) \approx 0$. Law e Kelton (1991) recomendam que as estimativas subjetivas de a e b sejam obtidas com base na opinião de especialistas, que devem ser perguntados sobre quais seriam estimativas otimistas e

pessimistas do valor que a variável pode assumir. Uma vez identificado o intervalo $[a,b]$, o próximo passo consiste em alocar uma função densidade de probabilidade ao intervalo, função esta que deve ser representativa de X .

O primeiro procedimento heurístico definido por Law e Kelton (1991), intitulado de abordagem triangular, consiste em solicitar aos especialistas, além das estimativas pessimista e otimista, uma estimativa de um valor mais provável, denominado c , que é a moda da distribuição de X . Após definidos a , b e c , admite-se que a variável X possui distribuição triangular no intervalo $[a,b]$, com moda c . Os referidos autores dizem que uma das maiores dificuldades da abordagem triangular é a necessidade de se fazer estimativas dos valores mínimo e máximo que a variável pode assumir.

O segundo procedimento proposto por Law e Kelton (1991) consiste em assumir que a variável aleatória X segue distribuição beta no intervalo $[a,b]$, com parâmetros α_1 e α_2 . Embora essa abordagem seja mais flexível, posto que a função densidade beta pode assumir várias formas, é difícil escolher os parâmetros α_1 e α_2 para especificar a distribuição. Law e Kelton (1991) sugerem duas estratégias para estimar os parâmetros α_1 e α_2 . A primeira é supor que é igualmente provável que X assuma qualquer valor entre a e b . Nesse caso, define-se $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, obtendo-se a distribuição uniforme $U(0,1)$, que é um caso particular da distribuição beta. Utiliza-se esse modelo quando a única informação que se conhece sobre X é seu intervalo de ocorrência $[a,b]$. A segunda estratégia é assumir que a função de densidade de X é enviesada para a direita (cauda alongada na parte direita da distribuição). De acordo com os autores supracitados, funções de densidade relacionadas ao tempo de execução de uma tarefa apresentam essa forma, que corresponde a $\alpha_2 > \alpha_1 > 1$.

Banks; Carson e Nelson (1996) também propõem algumas estratégias para se obter informação sobre processos nas situações em que não há disponibilidade de dados:

i) Dados da engenharia

Geralmente é possível obter índices de desempenho de certo produto ou processo através do fabricante. Pode-se utilizar esses dados como valores centrais, sendo eles o ponto de partida para a estimativa.

ii) Opção do especialista

Consiste em entrevistar especialistas que possuam experiência com o processo em questão. Eles podem ajudar fornecendo estimativas pessimistas, mais prováveis e otimistas, bem como indicando se o processo é constante ou muito variável.

iii) Limitações físicas ou convencionais

Deve-se estar atento a limitações físicas de um processo, ou seja, limites máximos e mínimos de performance.

iv) A natureza do processo

De acordo com a natureza do processo, pode-se escolher uma família de distribuições de probabilidade que geralmente é adequada para representá-lo.

Banks; Carson e Nelson (1996) dizem que as distribuições uniforme, triangular e beta geralmente são utilizadas quando não se tem dados sobre um processo. Segundo esses autores, a distribuição uniforme é bastante limitada, uma vez que assume que os limites máximo e mínimo possuem a mesma probabilidade de ocorrência dos valores centrais, o que raramente é visto na prática. Nos casos em que além de um valor máximo e um valor mínimo é possível também definir um valor mais provável, os autores em questão dizem que é possível utilizar a distribuição triangular, distribuição esta que aloca grande parte da probabilidade de ocorrência em torno do valor mais provável. Em relação à distribuição beta, os referidos autores dizem que sua função densidade precisa ser definida com cuidado, posto que essa distribuição possui várias formas.

Winston (2004) também ressalta a importância da distribuição triangular na simulação. Assim como Banks; Carson e Nelson (1996) e Law e Kelton (1991), ele diz que essa distribuição geralmente é utilizada quando se está lidando com fenômenos sobre os quais há pouca ou nenhuma informação.

A seguir serão apresentadas as principais características das três distribuições de probabilidades citadas nos itens acima.

Distribuição uniforme

Como dito anteriormente, Banks; Carson e Nelson (1996) e Law e Kelton (1991) acreditam que a distribuição uniforme, denominada $U(a,b)$, pode ser utilizada quando pouco se conhece a respeito do comportamento de uma variável. Law e Kelton (1991) dizem que essa distribuição é um primeiro modelo de quantificação de variáveis aleatórias pouco conhecidas. Naylor et al. (1971) dizem que a distribuição uniforme pode ser utilizada quando se estuda erros de arredondamento de valores registrados com certa precisão. As principais características dessa distribuição seguem abaixo:

$$\text{Função densidade de probabilidade: } f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\text{Função densidade acumulada: } F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{se } b < x \end{cases}$$

Parâmetros: números reais a e b , com $a < b$; a é conhecido como parâmetro de localização e b como parâmetro de escala

Intervalo: $[a,b]$

$$\text{Média: } \frac{a+b}{2}$$

$$\text{Variância: } \frac{(b-a)^2}{12}$$

Moda: pode ser qualquer valor em $[a,b]$

Comentários: a distribuição $U(0,1)$ é um caso especial da distribuição beta, quando $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$

Distribuição beta

De acordo com Banks; Carson e Nelson (1996) e Law e Kelton (1991), a distribuição beta, conhecida como $\text{beta}(\alpha_1, \alpha_2)$, também é utilizada quando não se conhece muito bem o comportamento de uma variável. Outros exemplos de uso incluem a proporção de itens defeituosos num carregamento e o tempo para se completar uma tarefa. Abaixo seguem as principais informações sobre essa distribuição:

$$\text{Função densidade de probabilidade: } f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha_1-1} (1-x)^{\alpha_2-1}}{B(\alpha_1, \alpha_2)} & \text{se } 0 < x < 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Em que $B(\alpha_1, \alpha_2)$ é a função beta, definida por:

$$B(z_1, z_2) = \int_0^1 t^{z_1-1} (1-t)^{z_2-1} dt$$

Para quaisquer números reais $z_1 > 0$ e $z_2 > 0$

Função densidade acumulada: em geral não há forma fechada. Se α_1 ou α_2 for um inteiro positivo, é possível utilizar uma expansão binomial para obter $F(x)$. Nesse caso, $F(x)$ será um polinômio em x e as potências de x serão, normalmente, números reais positivos que variam de 0 a $\alpha_1 + \alpha_2 - 1$

Parâmetros: parâmetros de forma $\alpha_1 > 0$ e $\alpha_2 > 0$

Intervalo: $[0,1]$

$$\text{Média: } \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

$$\text{Variância: } \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 (\alpha_1 + \alpha_2 + 1)}$$

$$Moda: \begin{cases} \frac{\alpha_1 - 1}{\alpha_1 + \alpha_2 - 2} & \text{se } \alpha_1 > 1 \text{ e } \alpha_2 > 1 \\ 0 \text{ e } 1 & \text{se } \alpha_1 < 1 \text{ e } \alpha_2 < 1 \\ 0 & \text{se } (\alpha_1 < 1, \alpha_2 \geq 1) \text{ ou se } (\alpha_1 = 1, \alpha_2 > 1) \\ 1 & \text{se } (\alpha_1 \geq 1, \alpha_2 < 1) \text{ ou se } (\alpha_1 > 1, \alpha_2 = 1) \\ \text{qualquer valor} & \text{se } \alpha_1 = \alpha_2 = 1 \end{cases}$$

Comentários: como dito anteriormente, as distribuições uniforme $U(0,1)$ e $\text{beta}(1,1)$ são a mesma

Distribuição triangular

Segundo com Law e Kelton (1991), Banks; Carson e Nelson (1996) e Winston (2004), a distribuição triangular, designada $\text{triang}(a,b,c)$, é outra distribuição que pode ser útil quando não há dados sobre certo processo ou variável. Outros exemplos citados por Banks; Carson e Nelson (1996) são tempos de processamento de uma unidade central de processamento (CPU) e número de peças rejeitadas (embora o número de peças rejeitadas seja discreto é possível aproximar essa variável pela distribuição triangular, que é contínua). Logo abaixo seguem as informações mais importantes sobre a distribuição triangular.

$$\text{Função densidade de probabilidade: } f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{se } a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{se } c < x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\text{Função densidade acumulada: } F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} & \text{se } a \leq x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} & \text{se } c < x \leq b \\ 1 & \text{se } b < x \end{cases}$$

Parâmetros: números reais a , b e c , com $a < c < b$; a é conhecido como parâmetro de localização, $b - a$ como parâmetro de escala e c como parâmetro de forma

Intervalo: $[a,b]$

$$\text{Média: } \frac{a+b+c}{3}$$

$$\text{Variância: } \frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}{18}$$

Moda: c

Comentários: as situações limite em que $c \rightarrow b$ e $c \rightarrow a$ são chamadas de distribuição triangular à direita e distribuição triangular à esquerda, respectivamente; quando $a = 0$ e $b = 1$, as distribuições triangulares à direita e à esquerda são casos especiais da distribuição beta

3. O mercado brasileiro de automóveis

Dado que o tema deste trabalho está inserido no mercado automobilístico, o objetivo deste capítulo é apresentar informações básicas sobre esse mercado, como dados históricos de produção, vendas e exportação, além das projeções para o setor.

3.1 Classificação dos veículos segundo a Anfavea

A Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) classifica os veículos em quatro categorias: automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus.

O cálculo de viabilidade dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* será realizado com base em dados exclusivamente da categoria “automóveis” (a explicação detalhada dos tipos de veículos elétricos bem com o motivo da escolha da categoria “híbridos *plug-in*” se encontram no capítulo 4).

A categoria “comerciais leves” inclui camionetas, picapes derivadas de carros de passeio, vans, furgões e utilitários esportivos, desde que possuam peso bruto total (PBT) não superior a 3,5 toneladas. Embora a existência de veículos comerciais leves elétricos seja possível no futuro, os principais fabricantes estão concentrando seus esforços na produção de automóveis elétricos. Assim, como foi dito acima, dados da categoria “comerciais leves” não serão utilizados no cálculo de viabilidade de veículos elétricos híbridos *plug-in*. Contudo, uma vez que as estatísticas de automóveis e veículos comerciais leves são geralmente divulgadas de maneira conjunta, serão apresentados nos próximos itens informações referentes a essas duas categorias.

As categorias caminhões e ônibus não fazem parte do escopo deste trabalho.

3.2 Produção de automóveis e comerciais leves

O gráfico abaixo mostra a evolução da produção de automóveis e comerciais leves no Brasil entre os anos de 1999 e 2009. O valor referente ao ano de 2009 é estimado.

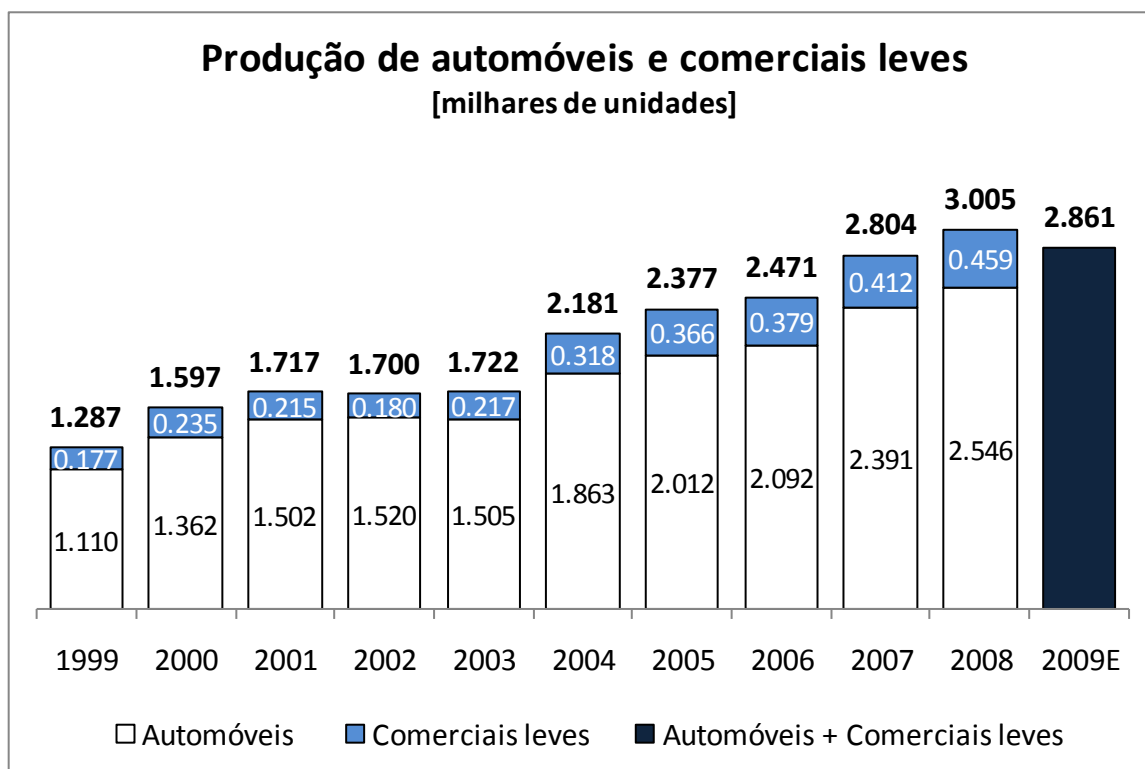


Gráfico 3.1: Evolução da produção de automóveis e comerciais leves no Brasil

Fonte: Anfavea – Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2009)

A taxa de crescimento anual composta calculada entre os anos de 1999 e 2008 é de 9,9% a.a., o que indica que a produção brasileira cresceu de maneira acelerada nesse período. O recorde de produção de mais de 3 milhões de veículos foi atingido em 2008. Nota-se que o valor esperado para 2009 é menor do que o recorde.

3.3 Vendas internas de automóveis e comerciais leves

Segue abaixo a evolução das vendas internas de automóveis e comerciais leves entre os anos de 1999 e 2009. Os dados dos anos de 1999 até 2001 são referentes a vendas internas

no atacado, que representam as vendas para as concessionárias. A partir de 2002, os dados referem-se a licenciamentos de veículos novos. O valor referente ao ano de 2009 é estimado.

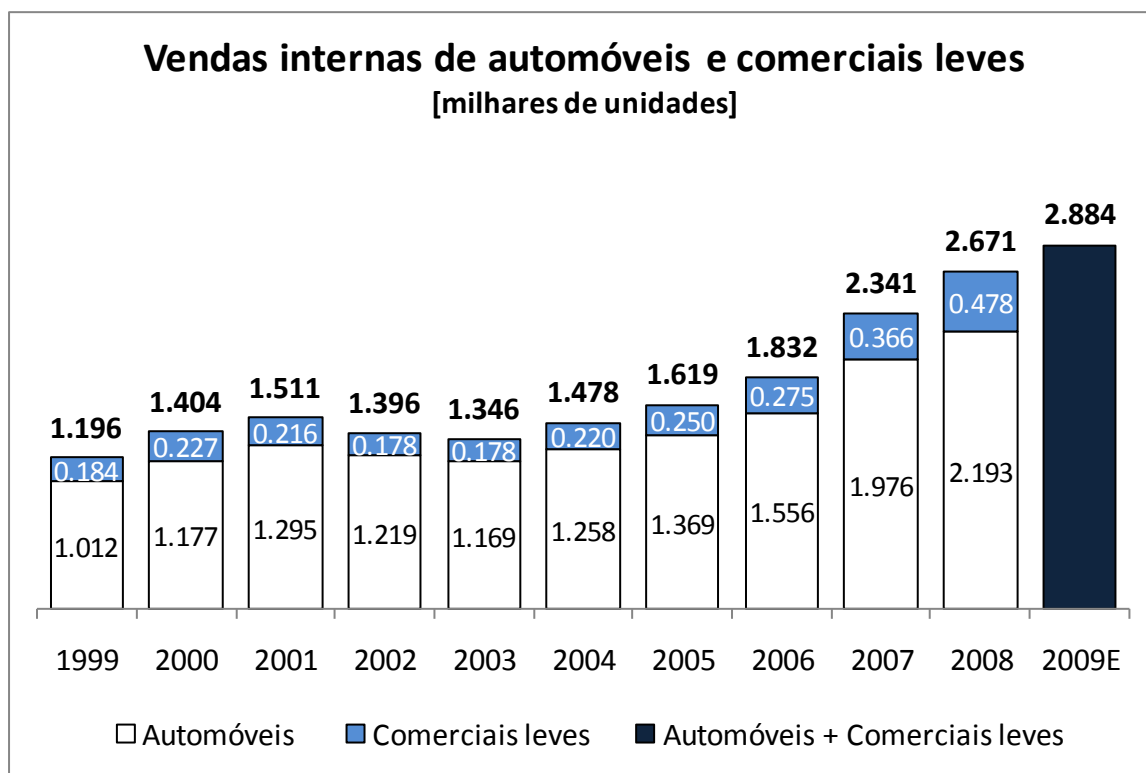


Gráfico 3.2: Evolução das vendas internas de automóveis e comerciais leves no Brasil

Fonte: Anfavea – Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2009)

Assim como a produção, as vendas internas de automóveis e comerciais leves cresceram de maneira expressiva no período em estudo, atingindo o pico no ano de 2008. A taxa de crescimento anual composta calculada entre os anos de 1999 e 2008 é de 9,3% a.a. A projeção para o ano de 2009 indica que as vendas internas tendem a aumentar ainda mais. Um dos fatores que explica esse aumento do volume projetado para 2009 é a redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI), que se iniciou em dezembro de 2008. O governo anunciou inicialmente que a redução se estenderia até março de 2009. Em seguida, prorrogou a redução até junho do mesmo ano. Logo após, decidiu adiar o prazo de término para setembro de 2009. Segue abaixo uma tabela com a evolução da redução do IPI.

Tabela 3.1: Evolução da redução de IPI para veículos no Brasil

Tipo de veículo	Alíquota do IPI [%]			
	até dez/08	dez/08 - mar/09	abr/09 - jun/09	jul/09 - set/09
Automóveis 1.0	7%	0%	0%	0%
Automóveis 1.1 – 2.0 (gasolina)	13%	6,5%	6,5%	6,5%
Automóveis 1.1 – 2.0 (<i>flex fuel</i>)	11%	5,5%	5,5%	5,5%
Picapes 1.0	8%	1%	1%	1%
Picapes 1.1 – 2.0	8%	4%	4%	4%

Fonte: Globo (2009), O Estado de São Paulo (2009)

3.4 Exportações de automóveis e comerciais leves

Logo abaixo pode-se observar o gráfico da evolução das exportações de automóveis e comerciais leves entre os anos de 1999 e 2009. Novamente é importante ressaltar que o valor referente ao ano de 2009 é estimado.

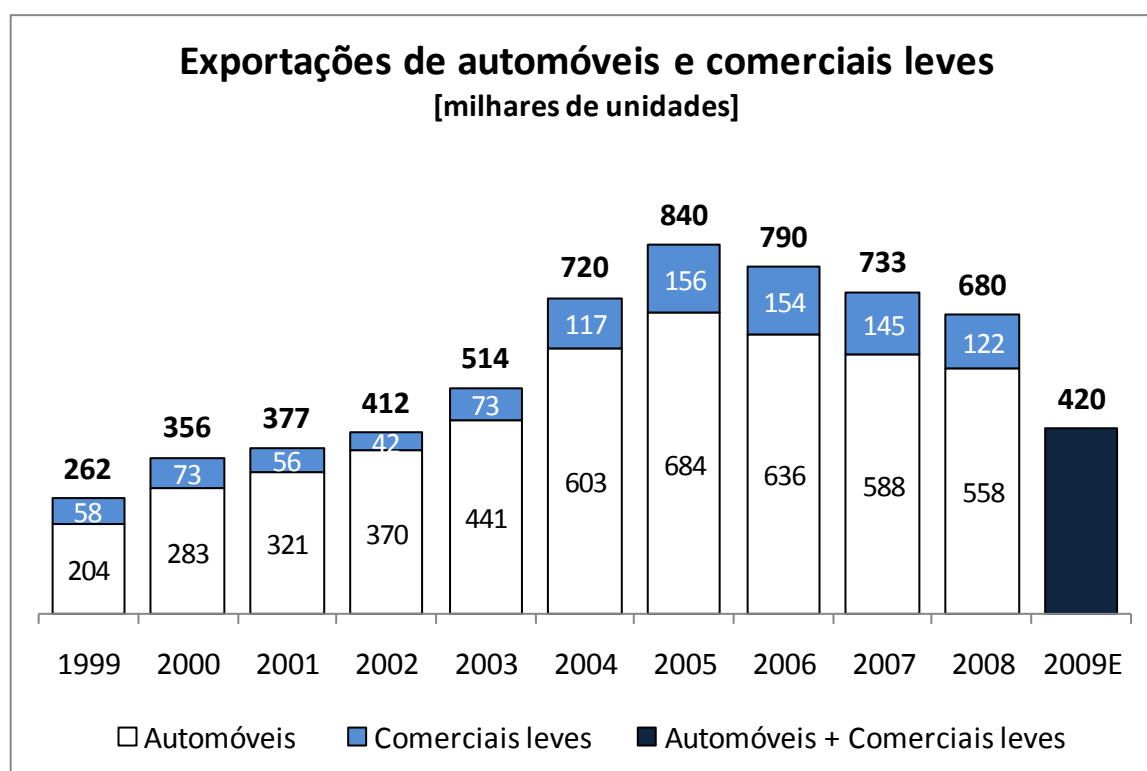


Gráfico 3.3: Evolução das exportações de automóveis e comerciais leves no Brasil

Fonte: Anfavea – Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2009)

Diferentemente da produção e da venda, as exportações de automóveis e comerciais leves atingiram o pico no ano de 2005. A partir desse ano, os valores começaram a cair, atingindo em 2008 um patamar abaixo do ano de 2004. A taxa de crescimento anual composta calculada entre 1999 e 2008 é de 11,2% a.a., o que sinaliza que o declínio iniciado em 2005 não foi capaz de anular o crescimento anual composto no período em estudo. Um dos fatores que influenciou fortemente essa queda nas exportações a partir de 2005 foi a apreciação do real (R\$) em relação ao dólar (US\$) entre os anos de 2005 e 2008. No final de 2008, a tendência de apreciação do real inverteu-se fortemente. Entretanto, em parte devido à crise mundial, as exportações de veículos continuaram caindo. O gráfico abaixo compara as exportações acumuladas de automóveis e comerciais leves nos últimos 12 meses com o valor mensal do real frente ao dólar entre os anos de 2005 e 2008.

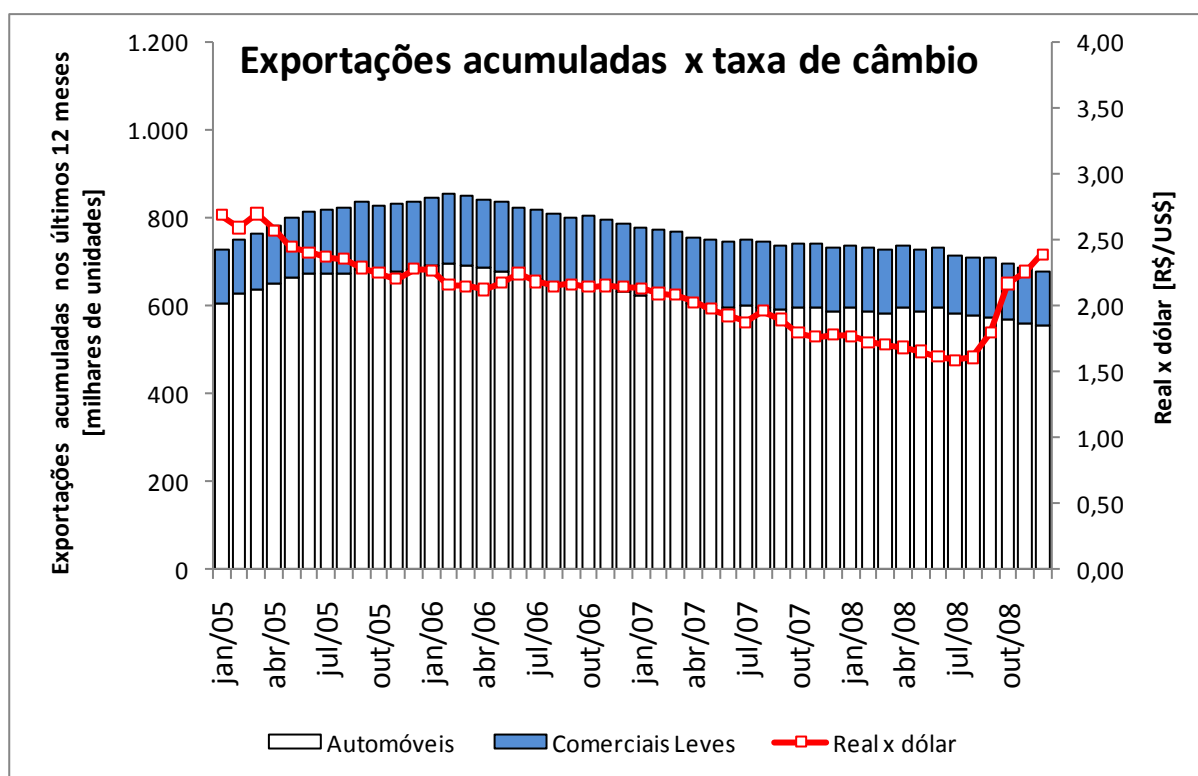


Gráfico 3.4: Comparação das exportações acumuladas no Brasil com a taxa de câmbio

Fonte: Anfavea – Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2009), Banco Central do Brasil (2009)

3.5 Vendas internas de automóveis e comerciais leves por tipo de combustível

Considerando que o presente estudo pretende analisar a viabilidade dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* no Brasil, automóveis estes ainda indisponíveis, é interessante

avaliar a evolução das vendas de automóveis de acordo com o tipo de combustível, já que o início da disponibilização dos motores *flex fuel* (veículos bicomcombustível) em 2003 representou a entrada no mercado de um novo tipo de tecnologia de motorização. Segue o gráfico de evolução das vendas internas por tipo de combustível para o mercado de veículos leves como um todo (automóveis e comerciais leves agrupados).

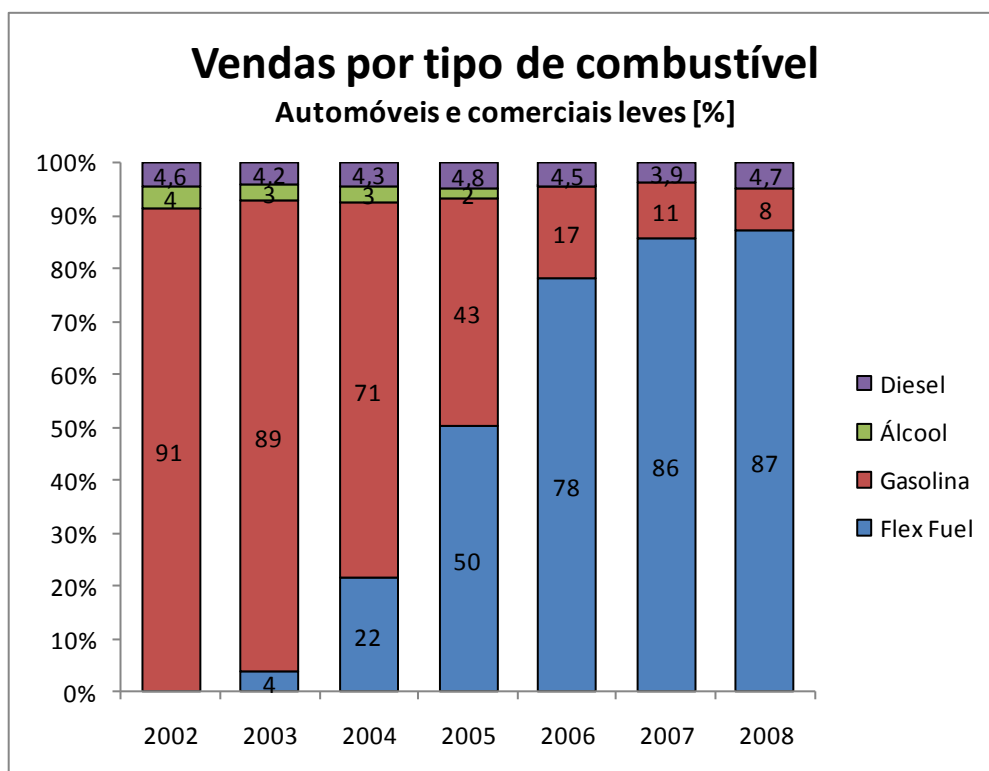


Gráfico 3.5: Vendas de veículos leves por tipo de combustível no Brasil

Fonte: Anfavea – Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2009)

Observa-se que a penetração dos veículos bicomcombustível se deu de maneira bastante acelerada. Em apenas 5 anos de existência, o *market share* das vendas desses veículos atingiu níveis próximos de 90%. Logo abaixo segue o gráfico específico para o mercado de automóveis, que é o mercado-alvo deste estudo.

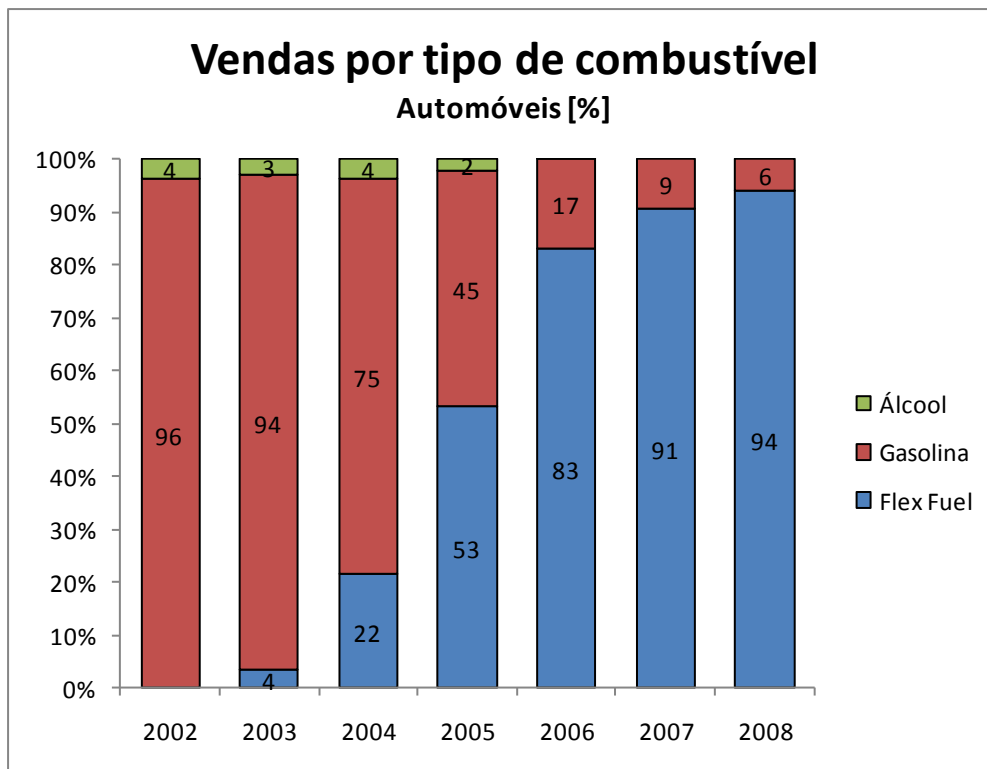


Gráfico 3.6: Vendas de automóveis por tipo de combustível no Brasil

Fonte: Anfavea – Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2009)

Fica claro que quando se separa os automóveis dos comerciais leves, o *market share* das vendas de veículos *flex fuel* é ainda maior, alcançando patamares próximos de 95% em 2008. Como não é permitido o uso de diesel em automóveis no Brasil e automóveis a álcool deixaram de ser comercializados nos últimos anos, o único concorrente dos veículos *flex fuel* são os veículos a gasolina.

4. Visão geral dos veículos elétricos

De acordo com a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), veículos elétricos são veículos automotores que possuem pelo menos um motor elétrico cuja função é acionar as rodas. Suas principais vantagens são a eficiência energética, o baixo nível de emissões de poluentes, podendo ser nulo, e o baixo nível de ruído. O foco deste capítulo é apresentar uma visão geral dos veículos elétricos, explicando como são classificados, quais são suas principais características, qual será a categoria de veículo elétrico a ser analisada neste estudo e qual será o veículo representante dessa categoria que será utilizado como modelo no cálculo da viabilidade mercadológica de automóveis elétricos híbridos *plug-in* no Brasil. Vale dizer que todas as informações contidas no item 4.1 e em todos os seus subitens (salvo casos em que a fonte for explicitada) foram obtidas no sítio da ABVE (ver referências).

4.1 Classificação dos veículos elétricos

A ABVE classifica os veículos elétricos de acordo com a fonte de energia elétrica que abastece o motor e também de acordo com o arranjo dos componentes do sistema de tração elétrica. As categorias são: veículo elétrico a bateria, veículo elétrico híbrido, veículo elétrico híbrido *plug-in*, veículo elétrico de célula a combustível, trólebus e veículo solar. A seguir será apresentada uma breve descrição dessas categorias, com exceção da categoria “trólebus”, que trata de ônibus elétricos, não fazendo parte do escopo deste trabalho, que trata apenas de automóveis.

4.1.1 Veículo elétrico a bateria

Conhecido também como *battery electric vehicle* (BEV) o veículo elétrico a bateria é um tipo de veículo elétrico cujo motor elétrico utiliza energia química armazenada em baterias recarregáveis instaladas no próprio veículo. É possível recarregar periodicamente as baterias através da rede elétrica ou de outra fonte de energia elétrica externa ao veículo.

Veículos que se enquadram nessa categoria podem incluir um sistema de frenagem regenerativa, que possibilita que a energia cinética do veículo seja armazenada na bateria durante o processo de frenagem.

A ABVE ressalta o grande potencial de economia de energia e de redução de emissões que o veículo elétrico a bateria apresenta. Quando não utilizam extensores de autonomia, a emissão desses veículos é literalmente nula. Dado que cerca de 80% da energia elétrica gerada no Brasil é de origem hídrica, a redução de emissões totais, que inclui desde a etapa de geração da energia elétrica até a etapa de uso da energia no veículo, é bastante significativa comparada com o veículo equivalente convencional. Em termos médios, a eficiência energética³ dos veículos elétricos a bateria é de 70%, cerca de cinco vezes a eficiência de um veículo convencional, que é de 14 a 18%. Abaixo segue um diagrama de funcionamento de um veículo elétrico a bateria.

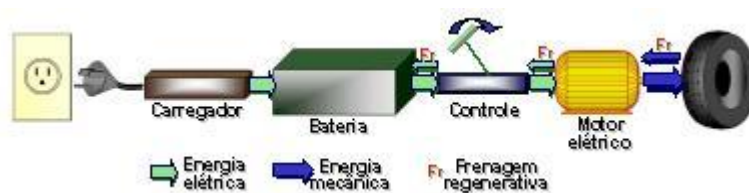


Figura 4.1: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico a bateria

Fonte: ABVE (2009)

4.1.2 Veículo elétrico híbrido

O veículo elétrico híbrido, também chamado em inglês de *hybrid electric vehicle* (HEV) e em português de VEH, utiliza um motor elétrico que é alimentado por um gerador e por uma bateria, ambos instalados a bordo. A denominação “híbrido” decorre do fato de o veículo possuir ao menos um motor elétrico e um motor de combustão interna (MCI), que pode ser alimentado por algum tipo de combustível líquido, como álcool, gasolina ou diesel, e/ou por algum tipo de combustível gasoso, como o gás natural. O MCI e o gerador de eletricidade abastecem o motor elétrico e são capazes de recarregar a bateria. Esta categoria também permite o uso de frenagem regenerativa.

³ Eficiência energética de um veículo é a porcentagem da energia que gera potência para as rodas dos veículos, ou seja, a parcela de energia que não é transformada em calor

É importante dizer que há duas configurações de veículos elétricos híbridos: em série e em paralelo. Na configuração em série, as rodas são acionadas apenas pelo motor elétrico. Já na configuração em paralelo, o MCI também aciona as rodas do veículo paralelamente ao motor elétrico. Segue abaixo os diagramas de funcionamento das configurações em série e em paralelo:



Figura 4.2: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido na configuração em série

Fonte: ABVE (2009)

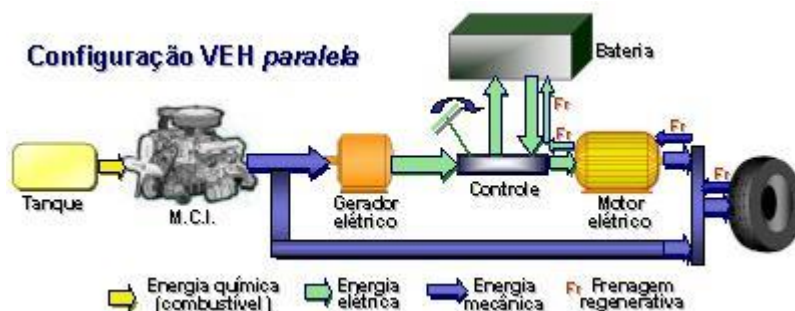


Figura 4.3: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido na configuração em paralelo

Fonte: ABVE (2009)

A ABVE afirma que as economias de combustível são de 10 a 50% comparando-se com o veículo equivalente com motor de combustão interna. Além disso, a mesma entidade diz que é possível reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2) em até 50% e as emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x) em até 90%.

Veículos desta categoria já estão disponíveis no mercado. Entre eles, pode-se destacar o Toyota Prius, que, de acordo com a Toyota, foi lançado no Japão em 1997 e é considerado o primeiro veículo híbrido produzido em massa. Foi introduzido à Europa, Estados Unidos e

outros mercados em 2000 e atualmente é comercializado em mais de quarenta países. Os principais mercados são a América do Norte e o Japão. Ainda de acordo com a Toyota, as vendas acumuladas do Toyota Prius ultrapassaram a marca de um milhão de veículos vendidos em meados de 2008.

4.1.3 Veículo elétrico híbrido *plug-in*

Este tipo de veículo, denominado em inglês *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV) e em português VEH *plug-in*, é um tipo de veículo elétrico híbrido (em série ou paralelo) que possui bateria de maior capacidade que pode ser recarregada na rede elétrica. Abaixo seguem os diagramas de funcionamento dos veículos elétricos híbridos *plug-in* nas configurações em série e também em paralelo.



Figura 4.4: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido *plug-in* na configuração em série

Fonte: ABVE (2009)

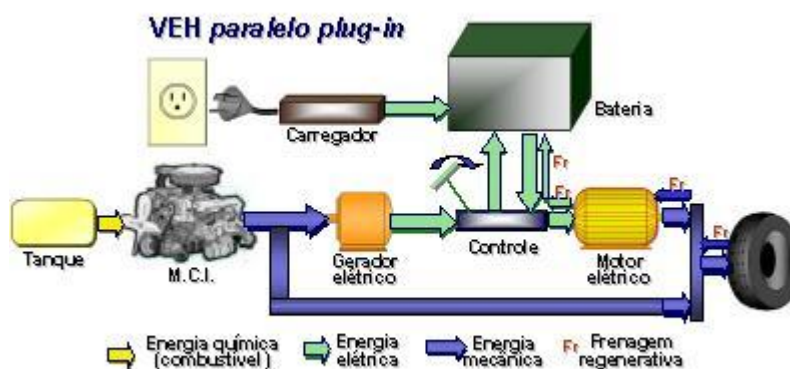


Figura 4.5: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico híbrido plug-in na configuração em paralelo

Fonte: ABVE

A idéia por trás desta categoria de veículo elétrico é que o trajeto diário seja percorrido com o uso exclusivo do motor elétrico, anulando qualquer emissão de poluentes, uma vez que não se está utilizando o motor de combustão interna. Durante a noite, o veículo pode ser recarregado na rede elétrica, para que seja novamente utilizado no próximo dia. Nos casos em que a autonomia do veículo proporcionada pela bateria for insuficiente, é possível acionar o MCI e o veículo passa a funcionar como um veículo elétrico híbrido tipo série ou paralelo. Nesta categoria também é possível utilizar a frenagem regenerativa para recarregar a bateria.

Um exemplo de veículo que se enquadra nesta categoria é o Chevrolet Volt. Mais detalhes sobre esse automóvel serão apresentados mais adiante ainda neste capítulo.

4.1.4 Veículo elétrico de célula a combustível

Neste tipo de veículo a energia elétrica é obtida a bordo a partir de um processo eletroquímico em que a energia do hidrogênio, que é o combustível, transforma-se diretamente em eletricidade. Essa energia gerada desempenha duas funções: alimentar o motor elétrico e recarregar a bateria. É também possível utilizar a frenagem regenerativa neste tipo de configuração. Segundo a ABVE, os especialistas estimam que essa tecnologia só esteja disponível dentro de 10 a 15 anos. A entidade acima referida também ressalta que ainda

existem dúvidas a respeito do desempenho energético e ambiental global dos veículos que utilizam célula a combustível.

Abaixo segue o diagrama de funcionamento deste tipo de veículo elétrico.

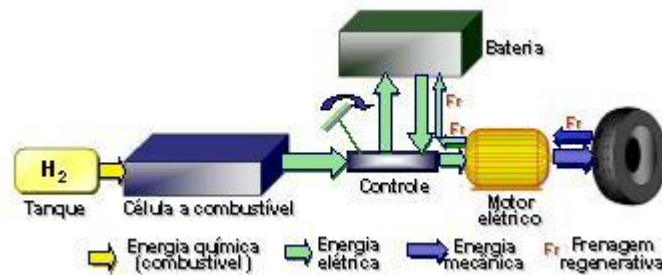


Figura 4.6: Diagrama de funcionamento de um veículo elétrico de célula a combustível

Fonte: ABVE (2009)

4.1.5 Veículo solar

Veículos desta categoria funcionam a base de energia solar obtida através de painéis que são posicionados geralmente no teto do veículo. A energia solar é convertida em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas. A ABVE diz que os veículos solares não são atualmente soluções de transporte práticas no dia-a-dia. Os modelos atuais se resumem a veículos de demonstração ou competição e exercícios de engenharia. As limitações estão relacionadas ao custo dos painéis solares, à sua vida útil e à própria natureza do projeto, que exige que as placas solares recebam energia solar, o que não é possível quando o veículo se encontra num local fechado, como uma garagem, ou quando o clima não é favorável.

4.2 Escolha do tipo de veículo elétrico e do automóvel modelo

De acordo com o acima exposto, nota-se que veículos de célula a combustível podem se tornar viáveis nas próximas décadas, mas não parecem ser uma solução de curto ou médio prazo. De maneira análoga, as limitações dos veículos solares impedem que eles sejam uma alternativa adequada para os próximos anos. Assim, dentre as categorias de veículos elétricos,

somente os veículos elétricos a bateria, os veículos elétricos híbridos tradicionais e os veículos elétricos híbridos *plug-in* são atualmente factíveis.

Dentre eles, os mais versáteis são os veículos elétricos híbridos *plug-in*. Eles compartilham os benefícios dos veículos elétricos movidos a bateria, podendo funcionar apenas com o uso de energia elétrica proveniente da rede elétrica, anulando qualquer tipo de emissão de poluentes, e mantêm a flexibilidade dos veículos elétricos híbridos tradicionais, podendo utilizar um motor de combustão interna para alimentar o motor elétrico ou diretamente as rodas quando necessário. Vale ressaltar que os veículos elétricos híbridos tradicionais, embora reduzam a emissão de poluentes, não são capazes de anulá-la completamente, como o fazem os veículos elétricos a bateria e os veículos elétricos híbridos *plug-in* (quando usam apenas o motor elétrico). Assim sendo, este estudo propõe que esta última categoria de veículo elétrico tem grande potencial de se tornar a alternativa mais promissora, transformando-se na referência futura no mercado de veículos elétricos.

Decidiu-se, pelas razões acima mencionadas, escolher um veículo elétrico híbrido *plug-in* para ser utilizado como modelo no cálculo da viabilidade de automóveis elétricos no Brasil. Isso significa que o cálculo apresentado no capítulo 5 deste estudo será realizado com base nos dados de desempenho de um veículo elétrico híbrido *plug-in* de referência, veículo este que será o representante da categoria como um todo. O resultado refletirá, portanto, o potencial de mercado especificamente desta categoria de veículo elétrico, não sendo representativo do potencial de mercado dos veículos elétricos a bateria nem dos veículos elétricos híbridos tradicionais. Como dito anteriormente, a razão da escolha desta categoria específica de veículos elétricos baseia-se na hipótese de que eles se tornem a referência, o padrão entre os veículos elétricos como um todo.

O próximo passo é selecionar um automóvel que se enquadre nessa classificação, para que suas especificações técnicas possam ser utilizadas neste estudo. Vale dizer que, no momento em que este trabalho é escrito, não há nenhum modelo de automóvel elétrico híbrido *plug-in* produzido em grande escala no mercado. Embora seja possível converter o Toyota Prius para a categoria de híbrido *plug-in*, a produção em escala da versão *plug-in* ainda não foi iniciada. Assim como a Toyota, outras marcas como General Motors, Honda e Volkswagen já estão promovendo alguns modelos que devem estar disponíveis a partir de 2010. Dentre os modelos a serem lançados, um dos mais comentados é o Chevrolet Volt, fabricado pela GM, com lançamento previsto para o final do ano de 2010. Ele se enquadra na

categoria veículo elétrico híbrido *plug-in* na configuração em série. Abaixo seguem duas figuras do Chevrolet Volt.



Figura 4.7: Chevrolet Volt (visão frontal)

Fonte: Autozine (2009)



Figura 4.8: Chevrolet Volt (visão traseira)

Fonte: Autozine (2009)

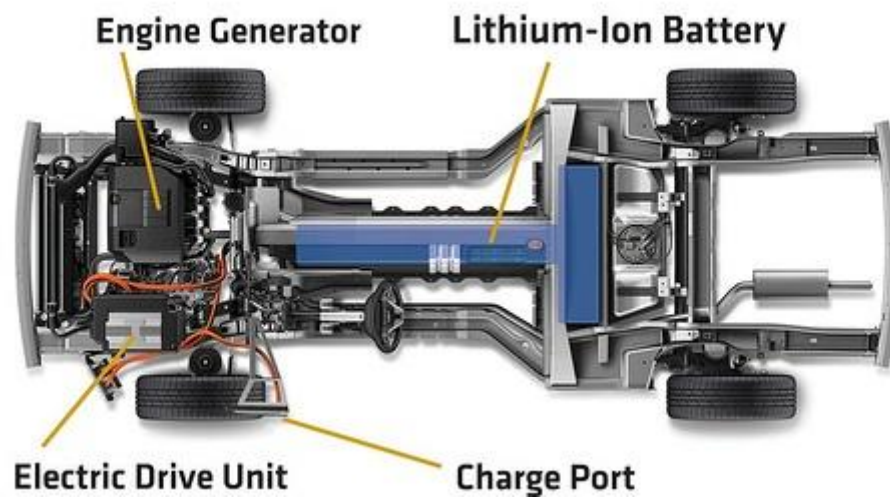


Figura 4.9: Chevrolet Volt (visão interna)

Fonte: Autozine (2009)

Além do apelo estético, o Volt apresenta especificações técnicas de desempenho bastante interessantes, como pode ser observado na tabela abaixo.

Tabela 4.1: Especificações técnicas do Chevrolet Volt

Especificações técnicas		
<i>Geral</i>	Tipo do veículo	sedã de 5 portas com tração frontal
	Categoria	veículo elétrico híbrido <i>plug-in</i> em série
	Número de assentos	4
<i>Performance</i>	Velocidade máxima [km/h]	160
	Autonomia elétrica (sem uso do motor de combustão) [km]	64
	Autonomia utilizando o motor de combustão interna (utilizando gasolina tipo A) [km]	640
	Desempenho do motor de combustão interna (utilizando gasolina tipo A) [km/l]	21,3 ⁴
<i>Sistema de bateria</i>	Tipo das células	íon-lítio
	Número de células	220
	Capacidade energética [kWh]	16
	Peso [kg]	170
	Carga máxima [%]	85
	Carga mínima [%]	30
	Capacidade energética efetiva [kWh]	8,8
<i>Dimensões</i>	Comprimento [mm]	4404
	Largura [mm]	1798
	Altura [mm]	1430
<i>Motor elétrico</i>	Potência [hp]	150
	Torque [Nm]	370
<i>Motor de combustão interna</i>	Número de cilindros	4
	Cilindradas [l]	1,4
	Tipo de combustível	etanol ou gasolina
<i>Plug elétrico</i>	Tipo da interface	SAE J1772

Fonte: GM (2009), The Ultimate Renaissance (2009)

Uma informação que chama atenção é a autonomia elétrica do veículo, de 64 km, que representa a distância que o Volt é capaz de percorrer apenas com uso da energia armazenada na bateria. Essa distância atende a necessidade de 75% dos americanos, que percorrem, em média, 53 km por dia⁵. O perfil dos motoristas brasileiros será analisado mais adiante, no

⁴ Considerando 50 milhas por galão (mpg) como sendo 100km por 4,7 litros

⁵ De acordo com Chevrolet (2009)

capítulo 5. Vale enfatizar que nos momentos em que o motor de combustão interna não é ativado o nível de emissão de poluentes é nulo.

De acordo com a GM, a bateria de íon-lítio tem capacidade de 16 kWh. Contudo, ela só é carregada até que se atinja 85% da sua carga máxima. Além disso, quando se atinge 30% da carga, o motor de combustão interna é ativado, de forma a manter a carga em torno desse nível. Assim, dos 16 kWh, apenas 8,8 kWh são efetivamente utilizados. São esses 8,8 kWh que permitem que o Volt percorra 64 km. O motor de combustão interna, que possui 4 cilindros e funciona com gasolina e/ou com etanol, permite que a autonomia do Volt se estenda para até 640 km com o uso de apenas um tanque de gasolina. Entretanto, a fim de se evitar o uso do MCI, é possível recarregar a bateria na rede elétrica (120-240V) de uma residência comum, através do *plug* SAE J1772, não havendo necessidade de recarregá-la numa central elétrica. O tempo de carga é de cerca de 3 horas numa rede de 240V e de 8 horas numa rede de 120V. O conceito por trás do projeto é que o motorista deixe o veículo carregando durante a noite, evitando ao máximo o uso do motor de combustão interna.

Por último, uma vez que não seria útil apresentar um automóvel com design moderno e ótimo desempenho sem que ele fosse ofertado em quantidade razoável, é importante mencionar que o Volt deverá ser produzido em escala para o mercado americano. O plano da GM é produzir 10.000 unidades do veículo em 2011, 60.000 unidades em 2012 e, a partir de 2013, aumentar a produção anual para 70.000 unidades.

Conclui-se que o Volt é um veículo esteticamente atraente, possui excelentes especificações técnicas e será produzido em escala. Essas três características permitem que ele seja escolhido como modelo para este trabalho. Além disso, praticamente todas as especificações técnicas deste veículo já se encontram disponíveis, o que não é verdade para outros veículos elétricos híbridos *plug-in*. É importante frisar que não se está admitindo que o Volt será o único veículo elétrico híbrido *plug-in* do mercado, nem que ele é melhor que todos os outros modelos em todos os quesitos. A idéia é escolher um automóvel que seja um bom representante dos veículos elétricos híbridos *plug-in*, tendo grandes chances de se tornar uma referência não só de design, mas também de performance, de maneira que os futuros veículos sigam suas tendências. O Chevrolet Volt atende a essa finalidade.

5. Desenvolvimento e aplicação do modelo de simulação

A grande pergunta que este trabalho se propõe a responder é: qual seria a participação dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* nas vendas de veículos novos no Brasil caso estivessem disponíveis? A resposta, que será dada em termos percentuais, representa potencial de vendas deste tipo de veículo elétrico no Brasil, ou seja, simboliza o tamanho potencial do mercado dessa categoria de automóvel. Esse tipo de estudo é conhecido como estudo de viabilidade mercadológica, sendo bastante utilizado no processo de tomada de decisão em relação ao lançamento de novos produtos.

A fim de se responder a pergunta acima explicitada, optou-se pela construção de um modelo. O objetivo desse capítulo é apresentar esse modelo, explicar sua lógica de funcionamento, mostrar a fundo as características de cada variável e, por fim, calcular o resultado final, que é o *market share* teórico dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* nas vendas de automóveis no Brasil.

5.1 Visão geral do modelo

Um modelo pode ser entendido como uma representação da realidade para atender certa finalidade. Naylor et al. (1971) dizem que os modelos devem atender a dois requisitos conflitantes: realismo e simplicidade. Isso significa que um bom modelo deve ser uma representação com adequado grau de precisão do sistema real, de maneira a incluir os elementos mais relevantes, e, ao mesmo tempo, não pode ser tão complexo a ponto de se tornar incompreensível ou muito difícil de ser manipulado.

A lógica por trás do modelo que será apresentado baseia-se na premissa de que os automóveis elétricos híbridos *plug-in* podem ser analisados como um investimento. Ainda que seu valor de aquisição seja superior ao de um automóvel equivalente movido a álcool ou a gasolina, a economia proporcionada pelo uso da energia elétrica pode ser significativa. Assim, é possível que alguns consumidores optem por adquirir um automóvel elétrico híbrido *plug-in* pensando nos recursos financeiros que serão poupados ao longo da vida útil do veículo.

Buscou-se desenvolver um modelo específico que incorpora conceitos de engenharia econômica, de técnicas de simulação e de estatística, conceitos estes aprendidos ao longo do curso de engenharia de produção.

Como será visto mais adiante, o modelo possui duas características marcantes:

- É complexo, pois, com o objetivo de ser realista, serão incluídas diversas variáveis de entrada;
- Está inserido num contexto probabilístico, uma vez que, novamente com o intuito de obter-se uma representação adequada do sistema real, algumas variáveis de entrada serão consideradas estocásticas.

Essas duas características dificultariam sobremaneira a modelagem analítica do problema, a menos que fosse admitido um número excessivo de hipóteses simplificadoras, o que comprometeria o resultado. Além disso, considerando todas as vantagens da técnica de simulação propostas por Naylor et al. (1971) e por Winston (2004), apresentadas no capítulo 2, item 2.2.5, optou-se por essa técnica ao invés da modelagem analítica. A técnica de simulação que será adotada é a simulação de Monte Carlo. Análises de sensibilidade serão realizadas no capítulo 6.

De acordo com o que foi dito no capítulo 2, item 2.2.5, Winston (2004) propõe oito passos para o planejamento de um processo de simulação. São eles:

- i) Formulação do problema**
- ii) Coleta de dados e desenvolvimento do modelo**
- iii) Desenvolvimento de um programa de computador**
- iv) Verificação do modelo de computador**
- v) Validação do modelo de simulação**
- vi) Desenho do experimento**
- vii) Realização da simulação**
- viii) Documentação e implementação**

O **passo i)** (formulação do problema) já foi realizado no início deste capítulo, no momento em que houve a definição da pergunta principal que o estudo visa responder. Os **passos ii) e iii)** (coleta de dados, desenvolvimento do modelo e desenvolvimento de um programa de computador) serão efetuados simultaneamente ao longo do capítulo 5. Os **passos iv) e v)** (verificação e validação do modelo de computador) serão executados nos itens 5.2.4, 5.3.3, 5.3.4, 5.3.6 e 5.4, que correspondem às etapas de cálculo das variáveis de saída. A análise das tabelas e gráficos gerados indicará se o modelo está funcionando corretamente e se está representando a realidade. Os **passos vi), vii) e viii)** (desenho e realização da simulação, documentação e implementação) serão realizados no item 5.4. Seguem abaixo as variáveis de entrada (exógenas) do modelo:

- Estimativa da distribuição da quilometragem percorrida
 - Classificação: exógena e determinística
 - Unidade: percentual de veículos
 - Nível de agregação: por faixas de km percorridos por ano
- Frota de veículos por motor
 - Classificação: exógena e determinística
 - Unidade: percentual de veículos
 - Nível de agregação: por motor
- Frota de veículos por estado
 - Classificação: exógena e determinística
 - Unidade: número de veículos
 - Nível de agregação: por estado brasileiro
- Preço dos combustíveis e da energia elétrica
 - Classificação: exógena e estocástica
 - Unidade: R\$ / litro e R\$ / kWh

- Níveis de agregação: por tipo de fonte de energia (álcool, gasolina ou energia elétrica) e por estado brasileiro
- Performance dos combustíveis e da energia elétrica
 - Classificação: exógena e estocástica
 - Unidade: km / litro e km / kWh
 - Níveis de agregação: por tipo de fonte de energia (álcool, gasolina ou energia elétrica) e por motor
- Investimento adicional para compra do veículo elétrico
 - Classificação: exógena e estocástica
 - Unidade: R\$
 - Nível de agregação: não há

Nesse momento já é possível classificar o modelo como:

- **Estocástico**, já que apresenta variáveis aleatórias;
- **Estático**, por não incorporar a variável tempo (deseja-se obter o *market share* teórico de automóveis elétricos híbridos *plug-in* nas vendas de automóveis no Brasil num horizonte de curto prazo e não sua evolução ao longo do tempo)

Uma vez definidas as variáveis exógenas e as principais características do modelo, deve-se apresentar as variáveis de saída (endógenas), geradas a partir das variáveis de entrada. São elas:

- Distribuição da frota
 - Classificação: endógena e determinística
 - Unidade: número de veículos
 - Níveis de agregação: por faixas de km percorridos por ano, por estado brasileiro e por motor
- Custo por km

- Classificação: endógena e estocástica
- Unidade: R\$ / km
- Níveis de agregação: por tipo de fonte de energia (álcool, gasolina ou energia elétrica), por estado brasileiro e por motor
- Economia do veículo elétrico
 - Classificação: endógena e estocástica
 - Unidade: R\$ / km
 - Níveis de agregação: por faixas de km percorridos por ano, por estado brasileiro e por motor
- VPL
 - Classificação: endógena e estocástica
 - Unidade: R\$
 - Níveis de agregação: por faixas de km percorridos por ano, por estado brasileiro e por motor
- *Market share*
 - Classificação: endógena e estocástica
 - Unidade: % de veículos
 - Níveis de agregação: por faixas de km percorridos por ano, por estado brasileiro e por motor

Para ilustrar as interações entre as variáveis, segue abaixo o quadro conceitual do modelo.

Quadro conceitual

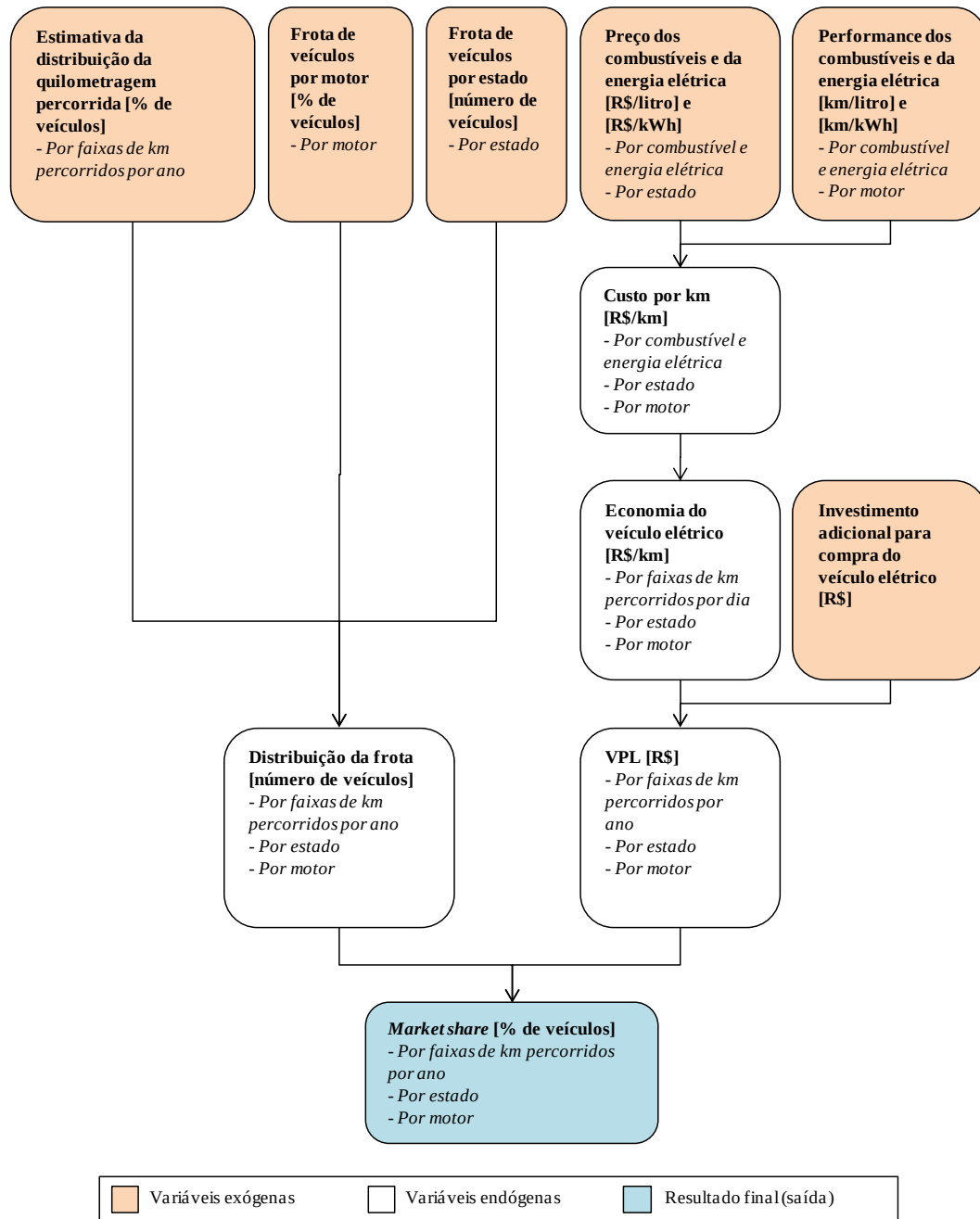


Figura 5.1: Quadro conceitual do modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o resultado final é obtido a partir da combinação da distribuição da frota de veículos e do VPL do investimento adicional na compra do veículo elétrico. Os processos de obtenção dessas duas variáveis de saída serão esmiuçados nas seções subsequentes, em que será explicado como cada variável do modelo foi definida, como elas se

relacionam entre si, como serão efetuados os cálculos intermediários e como será obtido o resultado final.

5.2 Distribuição da frota de veículos

Para avaliar a atratividade do investimento no veículo elétrico híbrido *plug-in* é preciso conhecer o perfil da frota de automóveis no Brasil. Como dito, a distribuição da frota será feita com base em três níveis de agregação:

- Por faixas de km percorridos por ano
- Por estado brasileiro
- Por motor

A seguir cada um desses níveis será explorado.

5.2.1 Estimativa da distribuição da quilometragem percorrida

É importante conhecer qual é a distribuição da quilometragem percorrida pelo motorista brasileiro, ou seja, qual é o perfil de uso do automóvel. É de se imaginar que usuários que utilizam seus automóveis para percorrerem grandes distâncias estejam mais propensos a adquirir um veículo elétrico híbrido *plug-in*, pois a vantagem gerada pela economia de combustível será maior do que para aqueles usuários que usam muito pouco seus automóveis.

O período de tempo que será utilizado para estimar a distribuição da quilometragem percorrida é o ano. A unidade de distância será o km. É pertinente que a estimativa seja feita para cada estado brasileiro, uma vez que o perfil de uso do veículo pode variar de um estado para outro.

Um excelente banco de dados do mercado automobilístico brasileiro é o sítio da empresa Webmotors. No sítio dessa empresa é possível fazer uma busca por automóveis

usados filtrando os resultados pelo ano do modelo, por estado e também por faixas de quilometragem percorrida. Com base no ano do modelo e na quilometragem percorrida é possível calcular uma média de km percorridos por ano, para cada estado brasileiro. Vale dizer que não é possível filtrar os resultados da busca de acordo com o volume do motor do automóvel, de maneira que será considerado que o perfil de uso dos automóveis não se altera de acordo com o tamanho do motor.

Como é necessário especificar o fabricante do automóvel para realizar a busca, serão realizadas buscas de automóveis fabricados pela Fiat, Volkswagen, General Motors e Ford, que são, respectivamente, as quatro marcas de veículos líderes em vendas no ano de 2009, de acordo com Anfavea. Somadas, essas quatro montadoras representam mais de 80%⁶ do mercado brasileiro de automóveis em termos de vendas de veículos novos.

Uma vez que é preciso especificar também o ano do modelo, optou-se por modelos fabricados há 5 anos, ou seja, veículos cujo modelo é 2005. Assumiu-se que 5 anos é um período de tempo adequado para servir de base para o cálculo da média anual. Vale dizer que na indústria automobilística brasileira os modelos de um dado ano são disponibilizados no mercado, em geral, com cerca de 6 meses de antecedência. Assim, carros cujo modelo é 2005 geralmente são vendidos no mercado a partir do início do segundo semestre de 2004. Logo, como esse trabalho está sendo realizado em meados de 2009 e deseja-se analisar automóveis fabricados há 5 anos, o ano modelo escolhido será 2005.

Como o filtro de busca por quilometragem total percorrida é dado por um intervalo, utilizou-se o ponto médio do intervalo para determinar a média de km percorridos por ano, para cada estado. Assim, se certo veículo percorreu, por exemplo, 93.000 km no período de análise, esse veículo será enquadrado na faixa de 90.000 km a 100.000 km e será considerado que ele percorreu 95.000 km (ponto médio entre 90.000 km e 100.000 km).

Ao iniciar a busca, observou-se que há pouquíssimas ou nenhuma ocorrência para certos estados brasileiros, como os estados da região Norte e Nordeste, inviabilizando a estimação do perfil de quilometragem para esses estados. De acordo com dados do Departamento Nacional de Trânsito (Denatran)⁷, a frota de automóveis nesses estados é bem menor do que nos estados das regiões Sudeste e Sul, o que explica a escassez de dados. Assim

⁶ Dados de janeiro a maio de 2009; Fonte: Anfavea – Carta da Anfavea

⁷ Para mais detalhes, ver tabela 5.3, no capítulo 5

sendo, a estimativa de quilometragem percorrida será feita para o Brasil como um todo e será considerado que ela é igual em todos os estados. Em outras palavras, será considerado que o perfil de uso dos automóveis é o mesmo em todos os estados. A tabela abaixo mostra o resultado da pesquisa:

Tabela 5.1: Faixas de quilometragem percorrida

Ano modelo	Faixa de quilometragem total percorrida [km]	Ponto médio da faixa de quilometragem [km]	Quilometragem percorrida por ano [km/ano]	Veículos pesquisados [número de veículos]				
				Fiat	VW	GM	Ford	Total
2005	0 - 10.000	5000	1000	2	2	-	3	7
2005	10.000 - 20.000	15000	3000	6	7	11	10	34
2005	20.000 - 30.000	25000	5000	21	30	36	39	126
2005	30.000 - 40.000	35000	7000	63	91	154	99	407
2005	40.000 - 50.000	45000	9000	168	234	269	257	928
2005	50.000 - 60.000	55000	11000	229	248	379	254	1.110
2005	60.000 - 70.000	65000	13000	195	208	297	244	944
2005	70.000 - 80.000	75000	15000	129	118	172	149	568
2005	80.000 - 90.000	85000	17000	79	57	96	62	294
2005	90.000 - 100.000	95000	19000	28	27	47	30	132
2005	100.000 - 110.000	105000	21000	18	13	14	15	60
2005	110.000 - 120.000	115000	23000	13	5	15	7	40
2005	120.000 - 130.000	125000	25000	6	5	7	7	25
2005	130.000 - 140.000	135000	27000	6	5	6	4	21
2005	140.000 - 150.000	145000	29000	2	4	3	2	11
2005	150.000 - 160.000	155000	31000	-	3	-	3	6
2005	160.000 - 170.000	165000	33000	1	2	2	3	8
2005	170.000 - 180.000	175000	35000	-	2	1	1	4
2005	180.000 - 190.000	185000	37000	-	-	3	-	3
2005	190.000 - 200.000	195000	39000	1	-	-	-	1
2005	200.000 - 210.000	205000	41000	-	-	-	-	-
2005	210.000 - 220.000	215000	43000	-	-	-	-	-
2005	220.000 - 230.000	225000	45000	-	-	-	-	-
2005	230.000 - 240.000	235000	47000	-	-	-	-	-
2005	240.000 - 250.000	245000	49000	1	-	-	-	1
2005	250.000 - 260.000	255000	51000	-	-	-	-	-
2005	260.000 - 270.000	265000	53000	-	-	-	-	-
2005	270.000 - 280.000	275000	55000	-	-	-	-	-
2005	280.000 - 290.000	285000	57000	-	-	-	-	-
2005	290.000 - 300.000	295000	59000	-	-	-	-	-
TOTAL								4.730
MÉDIA								12.036

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do Webmotors (2009)

Com base da tabela 5.1, construiu-se um gráfico para melhor ilustrar a distribuição da quilometragem percorrida:

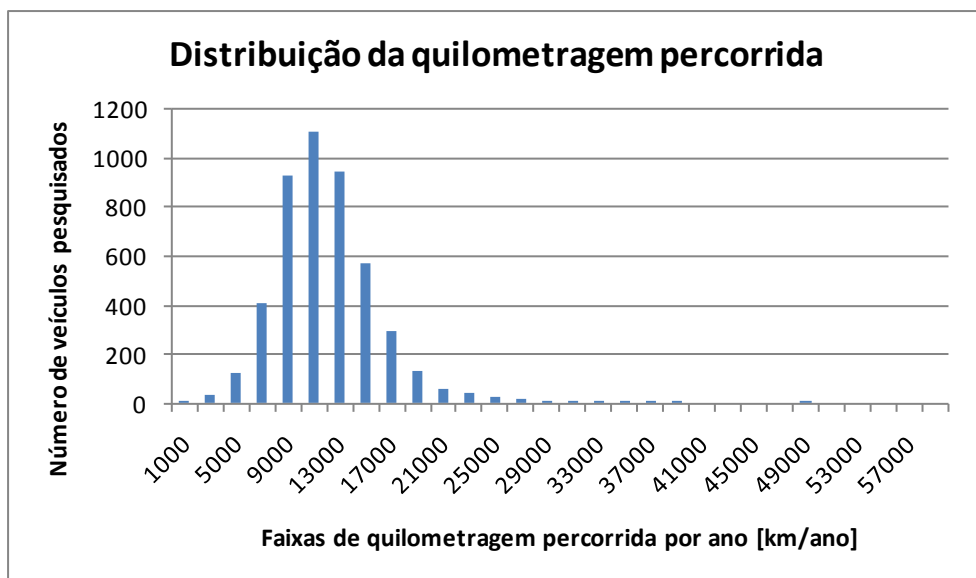


Gráfico 5.1: Distribuição da quilometragem percorrida por ano pelos veículos pesquisados

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do Webmotors (2009)

O número total de veículos pesquisado foi de 4.730. Embora o método de coleta de dados apresente algumas simplificações, como foi explicado acima, acredita-se que ele forneça uma boa aproximação do perfil da distribuição da quilometragem percorrida. Um indício de que os dados coletados são verossímeis é que, de acordo com o Sincopeças, “a média anual de quilometragem é de 13.275 e tem permanecido estável nos últimos anos, indicando que o motorista mantém o mesmo comportamento com relação à quilometragem do veículo”. A média calculada com base nos dados coletados no sítio do Webmotors é de 12.036 km/ano, sendo ligeiramente menor do que o valor apontado pelo Sincopeças. Algumas hipóteses podem ser elencadas para explicar a diferença entre os números:

1. Na tentativa de facilitar a venda, alguns vendedores costumam retroceder o odômetro de seus automóveis, tentando induzir o comprador que o veículo está mais conservado.
2. Os automóveis podem ficar disponíveis para venda por vários meses no sítio do Webmotors. Assim, a quilometragem informada corresponde à quilometragem percorrida até o momento em que o automóvel se tornou disponível para compra. Desse momento até o momento da pesquisa, a quilometragem percorrida pode ter aumentado.

3. Alguns vendedores não informaram a quilometragem total percorrida. É possível que eles tenham percorrido mais quilômetros do que a média e tenham optado por omitir a quilometragem na tentativa de não afugentarem possíveis compradores. Como seus dados não foram computados, a média encontrada pode ter sido ligeiramente mais baixa do que a real.

De qualquer maneira, uma vez que a divergência entre os valores é muito pequena, será admitido que os dados coletados através do Webmotors representam uma aproximação adequada da distribuição da quilometragem percorrida pelos motoristas brasileiros. Vale dizer que, para este estudo, o dado que interessa é o percentual da distribuição da quilometragem percorrida, e não o valor absoluto. Esse percentual será aplicado à frota de cada estado, subdividida pelo tamanho do motor, como será visto mais adiante.

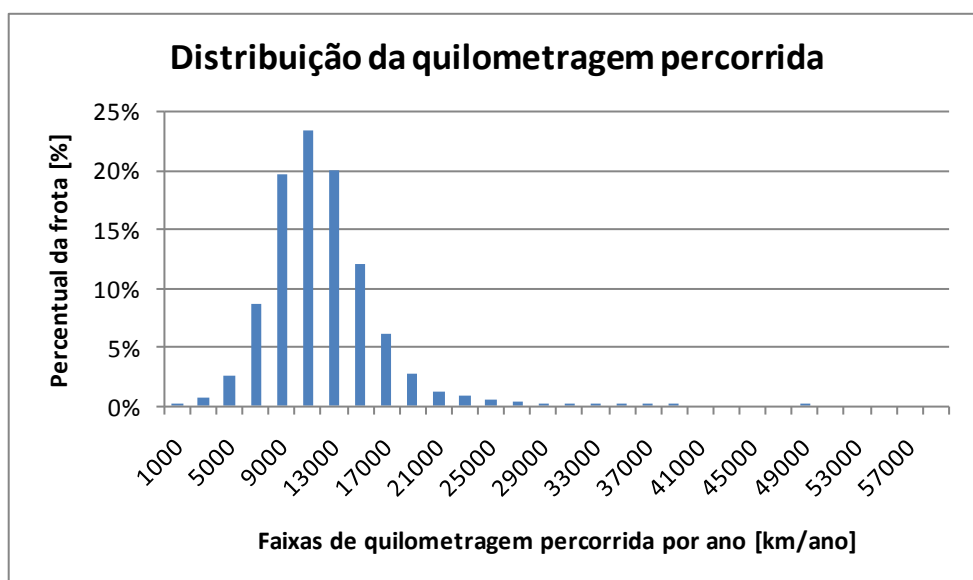


Gráfico 5.2: Distribuição percentual da quilometragem percorrida por ano

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do Webmotors (2009)

5.2.2 Frota de veículos por motor

Outro dado importante para se determinar o perfil da frota é a frota de veículos de acordo com o tamanho do motor. É interessante realizar essa agregação porque, como será visto mais adiante, um dos fatores que influencia a performance dos combustíveis é o volume do motor.

Uma vez que o Denatran, que é o órgão oficial do sistema de trânsito do Brasil, não fornece tal informação, recorreu-se a um estudo realizado pela empresa em que o autor estagiou, que é a A.T. Kearney. O estudo em questão, realizado em 2008, apresenta o número de veículos fabricados a partir dos anos de 2006 até 2007 e também as estimativas de fabricação a partir do ano de 2008 até 2015. É possível agregar os dados de inúmeras maneiras: por país, por tipo de veículo, por fabricante, por tipo de motor, por nome do veículo, etc. Como o objetivo é saber a distribuição da frota de acordo com o tamanho do motor no Brasil, utilizou-se filtros por país (Brasil), por tipo de veículo (veículo de passeio, que é equivalente a automóvel) e por tamanho de motor (volumes de motor: 1,0 litro; 1,2 litro; 1,3 litro; etc). Com relação a esse último filtro, optou-se por criar 4 categorias de tamanho de motor:

- 1,0 litro
- Acima de 1,0 litro até 1,6 litro (incluindo 1,6 litro)
- Acima de 1,6 litro até 2,0 litros (não incluindo 2,0 litros)
- A partir de 2,0 litros

A divisão acima buscou obter categorias que apresentem diferenças significativas de performance entre si e também buscou distribuir homogeneamente o número de veículos dentro de cada categoria. Vale dizer que, para este estudo, o dado que interessa é o percentual de veículos em cada categoria, e não o valor absoluto. De maneira análoga à distribuição da quilometragem percorrida, esse percentual será aplicado à frota de cada estado.

A determinação da frota de acordo com o tamanho de motor adotará duas simplificações:

- i. Já que o estudo não permite que seja feita a agregação por estado brasileiro, a distribuição da frota por motor será determinada para o Brasil como um todo e será considerado que ela é igual em todos os estados.
- ii. Embora fosse desejável obter a subdivisão da frota de veículos em cada categoria, o estudo fornece apenas dados de fabricação de veículos. Entretanto, os veículos fabricados, após vendidos tornam-se parte da frota. Ainda que alguns veículos fabricados possam ser exportados e consumidores brasileiros possam adquirir veículos importados, a frota será aproximada pelo número de

veículos fabricados nos anos de 2006, 2007 e 2008. Poder-se-ia utilizar dados de anos posteriores a este último ano, mas, como dados a partir de 2008 (incluindo 2008) são projeções, eles estão suscetíveis a erro. Dessa maneira, optou-se por dados históricos (anos de 2006 e 2007) e projeções de curto prazo (ano de 2008). Dados anteriores ao ano de 2006 não estão disponíveis neste estudo.

Segue abaixo a tabela com o percentual de veículos fabricados, em cada ano, de acordo com o tamanho do motor:

Tabela 5.2: Distribuição percentual da frota de veículos por motor

Tamanho do motor [litros]	Veículos por motor [% de veículos]			
	2006	2007	2008	Média ponderada
<=1,0	41,2%	41,1%	38,1%	40,1%
> 1,0 e <=1,6	33,6%	34,5%	34,9%	34,4%
> 1,6 e <2,0	16,1%	15,2%	16,2%	15,8%
>=2,0	9,2%	9,1%	10,8%	9,7%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da A.T. Kearney (2008)

Nota-se a predominância de veículos com motor 1,0 litro, que representam cerca de 40% do total. Outra observação pertinente é que os valores percentuais não se alteraram significativamente ao longo dos três anos analisados. Esse fato é um indício de que o perfil da frota de veículos de acordo com o tamanho do motor não deve ter se alterado significativamente nesses anos, levando a crer que a aproximação da frota pelos veículos fabricados é pertinente.

5.2.3 Frota de veículos por estado

O último dado necessário para se determinar a distribuição da frota são os próprios dados da frota por estado brasileiro. Esses dados são disponibilizados pelo Denatran. Os dados obtidos para este estudo são de fevereiro de 2009. Considerou-se apenas a frota de

automóveis, que são a categoria de veículos em estudo nesse trabalho. A tabela com a frota por estado segue abaixo.

Tabela 5.3: Frota de automóveis por estado

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Frota de automóveis [número de veículos]
Brasil	32.369.053
Norte	830.745
Acre	40.249
Amapá	40.904
Amazonas	220.160
Pará	283.314
Rondônia	116.735
Roraima	31.608
Tocantins	97.775
Nordeste	3.428.624
Alagoas	174.729
Bahia	902.541
Ceará	568.041
Maranhão	194.721
Paraíba	263.046
Pernambuco	723.950
Piauí	148.883
Rio Grande do Norte	281.997
Sergipe	170.716
Sudeste	18.587.951
Espírito Santo	561.705
Minas Gerais	3.340.837
Rio de Janeiro	2.827.302
São Paulo	11.858.107
Sul	7.026.289
Paraná	2.685.312
Rio Grande do Sul	2.633.892
Santa Catarina	1.707.085
Centro-Oeste	2.495.444
Distrito Federal	808.941
Goiás	979.246
Mato Grosso	329.104
Mato Grosso do Sul	378.153

Fonte: Denatran (2009)

5.2.4 Cálculo da distribuição da frota de veículos

Com base nos dados obtidos nos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3, construiu-se uma tabela que apresenta a distribuição da frota de automóveis de acordo com a quilometragem percorrida, o volume do motor e os estados brasileiros. A tabela completa é bastante extensa, pois há 4 categorias de volume de motor, 26 estados e 1 distrito federal e 30 faixas de quilometragem percorrida por ano, o que representa 3.240 células de dados. Logo, é inviável disponibilizá-la por completo neste estudo. Entretanto, os arquivos contendo o modelo e todas as tabelas, bem como a versão eletrônica deste documento estão disponíveis no CD que acompanha o trabalho. Além disso, para exemplificar a lógica da tabela, segue abaixo um trecho representativo de sua estrutura:

Tabela 5.4: Distribuição da frota de veículos por quilometragem percorrida, por motor e por estado (para o estado do Acre)

Estado	Volume do motor [litros]	Frota por estado e volume de motor [número de veículos]	Frota por estado, volume de motor e de acordo com a quilometragem percorrida [número de veículos]				
			1.000 km	...	11.000 km	...	59.000 km
Acre	<=1,0	16.120	24	...	3.783	...	-
Acre	> 1,0 e <=1,6	13.831	20	...	3.246	...	-
Acre	> 1,6 e <2,0	6.375	9	...	1.496	...	-
Acre	>=2,0	3.923	6	...	921	...	-
...	...	...	...	...	...	...	...

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando a tabela 5.4, nota-se, por exemplo, que há 16.120 automóveis no Acre que possuem motor com volume de 1,0 litro. Dentre eles, 24 percorrem cerca de 1.000 km por ano, 3.783 percorrem cerca de 11.000 km por ano e nenhum percorre 59.000 km por ano. Os demais automóveis do Acre que possuem motor de 1,0 litro estão distribuídos nos outros valores quilometragem anual percorrida e não foram mostrados na tabela 5.4 por questões de espaço, conforme explicado anteriormente.

5.3 VPL (valor presente líquido)

Como dito no item 5.1, este estudo pretende analisar a viabilidade mercadológica dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* considerando que eles podem ser enxergados como um investimento, uma vez que a economia gerada pelo uso da energia elétrica pode compensar o preço de aquisição desses veículos, que é maior do que o preço dos seus concorrentes movidos a combustíveis tradicionais (ver item 5.3.5). Assim sendo, é preciso escolher um método de avaliação econômica de investimento.

No capítulo 2, item 2.1, foram apresentados três métodos: o método da taxa interna de retorno (TIR), o método do valor presente líquido (VPL) e o método do período de *payback*. Embora os três métodos possuam premissas e restrições, o método do *payback* pode ser considerado o mais questionável por não incorporar o valor do dinheiro no tempo, o que o torna conceitualmente inferior aos outros dois métodos. Ainda que se analise o *payback* considerando a variação temporal do dinheiro, este método não é capaz de avaliar os efeitos dos fluxos de caixa posteriores ao tempo de retorno do investimento. Além disso, seria necessário definir um critério de aceitação, pois o tempo de *payback* em si não informa a atratividade do investimento. Esse critério seria bastante subjetivo e poderia distorcer o resultado final. Por essa razão, o método do *payback* não será utilizado na análise.

O método do VPL e o método da TIR são equivalentes, de maneira que qualquer um deles poderia ser utilizado neste estudo. Todavia, por ser, de acordo com Neto (2006), menos duvidoso que o método da TIR (ver capítulo 2) e também por não apresentar problemas algébricos e de interpretação, optou-se pelo método do VPL. Deve-se ressaltar que o critério de aceitação de um investimento quando se utiliza esse método é bastante simples, bastando avaliar se o valor presente líquido é positivo ou negativo. De qualquer maneira, é importante dizer que o modelo que está sendo construído neste trabalho pode ser adaptado para incorporar o método da TIR. Nesse caso, seria calculada a taxa interna de retorno do investimento extra na compra de um veículo elétrico híbrido *plug-in* com base na economia gerada pelo uso da energia elétrica e ter-se-ia que comparar essa taxa com uma taxa mínima de aceitação. Contudo, em face dos motivos acima apresentados, foi escolhido o método do valor presente líquido.

O cálculo do VPL será feito com base em três níveis de agregação:

- Por faixas de km percorridos por ano
- Por estado brasileiro
- Por motor

Antes do cálculo do VPL será preciso calcular o custo por km percorrido e a economia do veículo elétrico. Nos itens abaixo será explicado como todos esses cálculos serão realizados.

5.3.1 Preço dos combustíveis e da energia elétrica

Os combustíveis atualmente utilizados nos automóveis brasileiros são o álcool e a gasolina, sendo que o uso do diesel é proibido por lei (embora seja permitido em veículos comerciais leves, que não fazem parte do escopo deste trabalho). Os preços médios do álcool e da gasolina aos consumidores em cada estado brasileiro podem ser encontrados no sítio da Agência Nacional do Petróleo (ANP). A tabela abaixo contém os preços médios por estado praticados entre 12/07/2009 e 18/07/2009.

Tabela 5.5: Preços médios dos combustíveis por estado

Preço médio dos combustíveis por estado		
Estado	Preço [R\$/litro]	
	Álcool	Gasolina
Acre	2,079	2,930
Amapá	1,938	2,653
Amazonas	1,765	2,592
Pará	1,999	2,732
Rondônia	1,788	2,593
Roraima	2,158	2,689
Tocantins	1,692	2,743
Alagoas	1,659	2,637
Bahia	1,673	2,666
Ceará	1,773	2,581
Maranhão	1,566	2,571
Paraíba	1,645	2,407
Pernambuco	1,634	2,582
Piauí	1,755	2,498
Rio Grande do Norte	1,792	2,590
Sergipe	1,698	2,510
Espírito Santo	1,769	2,596
Minas Gerais	1,519	2,327
Rio de Janeiro	1,591	2,524
São Paulo	1,205	2,349
Paraná	1,364	2,450
Rio Grande do Sul	1,632	2,505
Santa Catarina	1,608	2,476
Distrito Federal	1,777	2,664
Goiás	1,481	2,561
Mato Grosso	1,188	2,670
Mato Grosso do Sul	1,640	2,624

Fonte: ANP (2009)

Com relação aos preços da energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), fornece apenas as tarifas por região, e não por estado. Dessa forma, considerou-se que os valores de tarifa de cada região valem para todos os estados da região. Vale mencionar que as tarifas fornecidas pela ANEEL estão agrupadas por classe de consumo. Dado que a idéia por trás dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* é que as baterias do veículo sejam recarregadas nas residências dos proprietários, utilizou-se os valores de tarifa residencial. A

tabela com as tarifas médias praticadas no mês de abril de 2009 em cada estado encontra-se logo abaixo.

Tabela 5.6: Tarifas médias de energia elétrica por estado

Preço da energia elétrica	
Estado	Preço [R\$/kWh]
Acre	0,30336
Amapá	0,30336
Amazonas	0,30336
Pará	0,30336
Rondônia	0,30336
Roraima	0,30336
Tocantins	0,30336
Alagoas	0,27928
Bahia	0,27928
Ceará	0,27928
Maranhão	0,27928
Paraíba	0,27928
Pernambuco	0,27928
Piauí	0,27928
Rio Grande do Norte	0,27928
Sergipe	0,27928
Espírito Santo	0,29322
Minas Gerais	0,29322
Rio de Janeiro	0,29322
São Paulo	0,29322
Paraná	0,27227
Rio Grande do Sul	0,27227
Santa Catarina	0,27227
Distrito Federal	0,28243
Goiás	0,28243
Mato Grosso	0,28243
Mato Grosso do Sul	0,28243

Fonte: ANEEL (2009)

Tanto os preços dos combustíveis como as tarifas de energia elétrica refletem valores médios praticados no momento em que este trabalho é escrito. Na prática, contudo esses valores estão constantemente variando ao longo do tempo. Por essa razão, a variável que reflete os preços dos combustíveis e da energia elétrica será considerada estocástica. Uma vez que o comportamento dos preços é incerto e que não se dispõe de dados a respeito do tipo de

distribuição dessa variável, será necessário recorrer às estratégias propostas por Law e Kelton (1991) e Banks; Carson e Nelson (1996) para seleção de distribuições de probabilidades na ausência de dados.

O primeiro passo proposto por Law e Kelton (1991), conforme apresentado no capítulo 2, item 2.3.2, consiste em definir um intervalo de ocorrência em que se acredita que a variável pode ser encontrada com alta probabilidade. Banks; Carson e Nelson (1996) propõem quatro estratégias para se obter informação na ausência de dados: buscar dados de engenharia, ouvir a opinião de especialistas, atentar para limitações físicas e observar a natureza do processo. Os dados de engenharia, que são normalmente utilizados para definir os valores de referência, serão considerados os preços médios mais atuais, preços estes fornecidos nas tabelas 5.5 e 5.6. As estratégias de atentar para limitações físicas e observar a natureza do processo são pouco aplicáveis neste caso. Embora o limite inferior seja 0 (já que os preços não podem assumir valores negativos) não há limite superior. A estratégia de consultar especialistas para definir um intervalo de ocorrência dos preços das fontes de energia não foi adotada neste estudo.

Assim sendo, as únicas informações de que se dispõe a respeito dos preços dos combustíveis e da energia elétrica são os valores atuais, já apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6 e que serão considerados os valores de referência, e valores históricos. As tabelas contendo os valores dos preços do álcool e da gasolina e também das tarifas de energia elétrica para os anos de 2006, 2007, 2008 e 2009 encontram-se abaixo. Os dados do ano de 2009 apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6 foram repetidos nas tabelas abaixo para facilitar a comparação.

Tabela 5.7: Evolução do preço do álcool por estado

Estado	Evolução do preço médio do álcool por estado					
	Preço do álcool [R\$/litro]				Diferença entre valor mínimo e valor de 2009 [%]	Diferença entre valor máximo e valor de 2009 [%]
	2006	2007	2008	2009 ⁸		
Acre	2,239	2,043	2,079	2,079	-2%	8%
Amapá	2,182	1,995	2,137	1,938	3%	13%
Amazonas	2,042	1,765	1,775	1,765	0%	16%
Pará	2,288	2,062	2,118	1,999	3%	14%
Rondônia	2,111	1,871	1,837	1,788	3%	18%
Roraima	2,233	2,057	2,140	2,158	-5%	3%
Tocantins	2,013	1,732	1,748	1,692	2%	19%
Alagoas	1,943	1,759	1,798	1,659	6%	17%
Bahia	1,813	1,635	1,677	1,673	-2%	8%
Ceará	1,880	1,682	1,777	1,773	-5%	6%
Maranhão	2,025	1,802	1,722	1,566	10%	29%
Paraíba	1,905	1,738	1,765	1,645	6%	16%
Pernambuco	1,819	1,577	1,656	1,634	-3%	11%
Piauí	2,100	1,875	1,886	1,755	7%	20%
Rio Grande do Norte	1,873	1,639	1,812	1,792	-9%	5%
Sergipe	2,044	1,889	1,837	1,698	8%	20%
Espírito Santo	1,965	1,790	1,761	1,769	0%	11%
Minas Gerais	1,875	1,642	1,592	1,519	5%	23%
Rio de Janeiro	1,834	1,641	1,648	1,591	3%	15%
São Paulo	1,412	1,274	1,279	1,205	6%	17%
Paraná	1,641	1,450	1,407	1,364	3%	20%
Rio Grande do Sul	2,148	1,743	1,759	1,632	7%	32%
Santa Catarina	1,804	1,701	1,691	1,608	5%	12%
Distrito Federal	1,905	1,695	1,829	1,777	-5%	7%
Goiás	1,630	1,421	1,505	1,481	-4%	10%
Mato Grosso	1,979	1,456	1,371	1,188	15%	67%
Mato Grosso do Sul	1,915	1,699	1,708	1,64	4%	17%

Fonte: ANP (2009)

⁸ Valores de 2009 são referentes ao período de 12/07/2009 a 18/07/2009

Tabela 5.8: Evolução do preço da gasolina por estado

Estado	Evolução do preço médio da gasolina por estado					
	Preço da gasolina [R\$/litro]				Diferença entre valor mínimo e valor de 2009 [%]	Diferença entre valor máximo e valor de 2009 [%]
	2006	2007	2008	2009 ⁹		
Acre	2,919	2,893	2,938	2,930	-1%	0%
Amapá	2,553	2,397	2,592	2,653	-10%	-2%
Amazonas	2,549	2,452	2,426	2,592	-6%	-2%
Pará	2,589	2,556	2,719	2,732	-6%	0%
Rondônia	2,678	2,618	2,662	2,593	1%	3%
Roraima	2,852	2,622	2,683	2,689	-2%	6%
Tocantins	2,754	2,733	2,747	2,743	0%	0%
Alagoas	2,817	2,824	2,773	2,637	5%	7%
Bahia	2,610	2,587	2,594	2,666	-3%	-2%
Ceará	2,687	2,586	2,540	2,581	-2%	4%
Maranhão	2,728	2,720	2,633	2,571	2%	6%
Paraíba	2,608	2,535	2,440	2,407	1%	8%
Pernambuco	2,641	2,596	2,586	2,582	0%	2%
Piauí	2,479	2,533	2,588	2,498	-1%	4%
Rio Grande do Norte	2,632	2,541	2,586	2,590	-2%	2%
Sergipe	2,542	2,508	2,513	2,510	0%	1%
Espírito Santo	2,612	2,610	2,618	2,596	1%	1%
Minas Gerais	2,412	2,393	2,381	2,327	2%	4%
Rio de Janeiro	2,525	2,494	2,516	2,524	-1%	0%
São Paulo	2,418	2,396	2,387	2,349	2%	3%
Paraná	2,467	2,416	2,395	2,450	-2%	1%
Rio Grande do Sul	2,697	2,528	2,534	2,505	1%	8%
Santa Catarina	2,562	2,541	2,537	2,476	2%	3%
Distrito Federal	2,596	2,572	2,554	2,664	-4%	-3%
Goiás	2,547	2,494	2,477	2,561	-3%	-1%
Mato Grosso	2,941	2,881	2,712	2,670	2%	10%
Mato Grosso do Sul	2,737	2,684	2,673	2,624	2%	4%

Fonte: ANP (2009)

⁹ Valores de 2009 são referentes ao período de 12/07/2009 a 18/07/2009

Tabela 5.9: Evolução das tarifas de energia elétrica por estado

Estado	Evolução das tarifas médias de energia elétrica por estado ¹⁰				Diferença entre valor mínimo e valor de 2009 [%]	Diferença entre valor máximo e valor de 2009 [%]
	Preço da energia elétrica [R\$/kWh]					
	2006	2007	2008	2009 ¹¹		
Acre	0,2871178	0,2894438	0,2878967	0,30336	-5%	-5%
Amapá	0,2871178	0,2894438	0,2878967	0,30336	-5%	-5%
Amazonas	0,2871178	0,2894438	0,2878967	0,30336	-5%	-5%
Pará	0,2871178	0,2894438	0,2878967	0,30336	-5%	-5%
Rondônia	0,2871178	0,2894438	0,2878967	0,30336	-5%	-5%
Roraima	0,2871178	0,2894438	0,2878967	0,30336	-5%	-5%
Tocantins	0,2871178	0,2894438	0,2878967	0,30336	-5%	-5%
Alagoas	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Bahia	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Ceará	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Maranhão	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Paraíba	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Pernambuco	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Piauí	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Rio Grande do Norte	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Sergipe	0,2743973	0,2839003	0,2791946	0,27928	-2%	2%
Espírito Santo	0,3120705	0,3096686	0,2851493	0,29322	-3%	6%
Minas Gerais	0,3120705	0,3096686	0,2851493	0,29322	-3%	6%
Rio de Janeiro	0,3120705	0,3096686	0,2851493	0,29322	-3%	6%
São Paulo	0,3120705	0,3096686	0,2851493	0,29322	-3%	6%
Paraná	0,2873568	0,2744225	0,2729275	0,27227	0%	6%
Rio Grande do Sul	0,2873568	0,2744225	0,2729275	0,27227	0%	6%
Santa Catarina	0,2873568	0,2744225	0,2729275	0,27227	0%	6%
Distrito Federal	0,3025601	0,3023877	0,28151	0,28243	0%	7%
Goiás	0,3025601	0,3023877	0,28151	0,28243	0%	7%
Mato Grosso	0,3025601	0,3023877	0,28151	0,28243	0%	7%
Mato Grosso do Sul	0,3025601	0,3023877	0,28151	0,28243	0%	7%

Fonte: ANEEL (2009)

As tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 indicam que a diferença percentual entre os valores máximos históricos em cada estado e os valores atuais não excede, na maioria dos casos, 20%. Isso vale para os preços do álcool e da gasolina e também para as tarifas de energia elétrica. De maneira análoga, é possível notar que a diferença percentual entre os valores mínimos

¹⁰ Considerou-se que a tarifa de cada região vale para todos os estados que pertencem a ela (os valores representam tarifas residenciais)

¹¹ Valores de 2009 são referentes ao mês de abril do ano em questão

históricos em cada estado e os valores atuais também não é menor, na maior parte dos casos, do que -20%.

Pelo motivo acima exposto, será considerado que o intervalo de ocorrência da variável em questão compreende valores 20% abaixo dos preços médios dos combustíveis e da energia elétrica apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6 e 20% acima desses preços. Em outras palavras, será assumido que os preços dos combustíveis e da energia elétrica variam entre 80% e 120% dos preços médios atualmente praticados. É importante ressaltar que este trabalho não pretende assegurar que esses preços se encontram com certeza dentro do intervalo proposto. É possível que haja oscilações nos preços que ultrapassem esses percentuais. Entretanto, conforme dito anteriormente, o objetivo da estratégia proposta por Law e Kelton (1991) é definir um intervalo em que se imagina que a variável deve estar com alta probabilidade. Assim, baseado em valores históricos esse estudo assume que o intervalo proposto atende a esse requisito.

Após a definição do intervalo, Law e Kelton (1991) propõe que se aloque uma função densidade de probabilidade ao intervalo, função esta que deve representar o comportamento da variável em questão. Como os valores médios apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6 representam preços praticados num certo momento e estes preços estão constantemente se alterando, não se pode afirmar que a probabilidade de ocorrência desses valores é maior do que a probabilidade de ocorrência dos valores-limite (20% abaixo e 20% acima dos valores médios). Dessa maneira, conforme proposto por Law e Kelton (1991), será considerado que os preços dos combustíveis variam conforme a distribuição uniforme, que é um caso particular da distribuição beta. De acordo com o capítulo 2, item 2.3.2., esse modelo é usado quando se conhece muito pouco sobre o comportamento de uma variável além do seu intervalo de ocorrência.

A linguagem de programação utilizada no *software Palisade @Risk*¹² que representa uma distribuição uniforme é:

=RiskUniform(a;b)

Em que:

- *a* corresponde ao valor mínimo;

¹² O *software Palisade @Risk* é um complemento do *software Microsoft Excel*

- b corresponde ao valor máximo.

Posto que, conforme dito anteriormente, será considerado que os preços dos combustíveis oscilam entre 80% e 120% dos valores médios, a linguagem de programação a ser utilizada no *software Palisade @Risk* é:

$$=RiskTriang(0,8;1,2)$$

Esse comando multiplicará os preços médios dos combustíveis e da energia elétrica em cada estado.

5.3.2 Performance dos combustíveis e da energia elétrica

A performance dos combustíveis será avaliada em termos da distância percorrida por volume de combustível. De maneira análoga, a performance da energia elétrica utilizada pelos automóveis elétricos híbridos *plug-in* será analisada em termos da distância percorrida por quantidade de energia. Como é sabido, a eficiência dos combustíveis está relacionada com o tamanho do motor, de forma que motores mais volumosos tendem a ser, em geral, menos eficientes do que motores pequenos. O sítio da empresa HowStuffWorks aponta algumas razões que explicam a maior eficiência dos motores menores. São elas:

- O motor maior é mais pesado, de modo que o carro usa energia adicional sempre que acelera ou precisa enfrentar um aclave;
- Os pistões e outros componentes internos são mais pesados, exigindo mais energia sempre que sobem e descem no cilindro;
- O deslocamento dos cilindros é maior, de modo que mais combustível é exigido por cada cilindro;
- Motores maiores, em geral, têm mais cilindros e cada um deles usa combustível sempre que o motor é ativado, mesmo se o carro não está em movimento. (HOWSTUFFWORKS, 2009)

Logo, a fim de se obter um resultado final mais realista, serão utilizados valores diferentes de performance dos combustíveis para cada uma das quatro categorias de tamanho de motor definidas no item 5.2.2. Essa divisão em quatro categorias, entretanto, não é capaz de representar as variações de performance que podem existir entre motores de mesmo volume alimentados com o mesmo combustível. É importante considerar que, além do

tamanho do motor, há outros fatores que influenciam a performance dos combustíveis e dos motores movidos a energia elétrica. Entre eles, pode-se destacar:

- A maneira de dirigir do motorista: alguns motoristas tendem a dirigir em alta rotação enquanto outros tendem a dirigir em baixa rotação;
- O uso de equipamentos de ar-condicionado: equipamentos de ar-condicionado normalmente reduzem a performance do motor;
- O tipo da via: nas estradas é possível dirigir em velocidades mais elevadas, o que resulta, em geral, em maior eficiência do motor, enquanto no dia-a-dia nas cidades as velocidades praticadas pelos motoristas são menores, acarretando uma menor eficiência;
- A tecnologia envolvida nos motores: alguns fabricantes utilizam tecnologias mais modernas do que outros, de maneira que motores com mesmo volume construídos por fabricantes diferentes podem apresentar desempenhos diferentes;
- A massa dos veículos: veículos com motores idênticos podem apresentar desempenhos diferentes se seus pesos forem diferentes, posto que o mesmo motor terá que impulsionar massas diferentes nos dois casos;

Assim, seria pouco realista considerar essa variável como sendo determinística. Por essa razão, será considerado que a performance dos combustíveis e da energia elétrica é estocástica.

Os fabricantes de automóveis e as publicações especializadas em geral fornecem valores de performance dos combustíveis para alguns veículos. Contudo, de acordo com o acima exposto, pode-se concluir que esses valores são apenas valores médios ou mais prováveis. Na prática, a performance dos combustíveis varia dentro de uma faixa de ocorrência. As performances do motor elétrico e do motor de combustão interna (MCI) do Chevrolet Volt também estão expressas em termos médios. Dessa forma, uma vez que não há dados a respeito dos valores máximos ou mínimos nem do tipo da distribuição desses dados, será necessário utilizar algum procedimento para atribuir uma distribuição de probabilidade a essa variável.

Seguindo o método proposto por Law e Kelton (1991), o primeiro passo é definir um intervalo em que se acredita que a performance do combustível deve estar. Conforme mencionado no item anterior, Banks; Carson e Nelson (1996) propõem a busca de dados de engenharia, a consulta a especialistas, a observação de limitações físicas e a análise da natureza do processo. No caso da performance dos combustíveis e da energia elétrica, os dados de engenharia podem ser considerados os dados de performance fornecidos pelos fabricantes e publicações. Em relação às limitações físicas, o limite inferior é zero, pois não se pode ter performance negativa, enquanto o limite superior é desconhecido. A natureza do processo indica que deve haver um valor mais provável de performance, que será considerado o valor fornecido pelos fabricantes e publicações, e valores máximos e mínimos. Embora não se tenha consultado especialistas para esse propósito, é razoável admitir que a maior probabilidade de ocorrência esteja em torno do valor médio, que é o valor fornecido pelos fabricantes e pelas publicações, e não dos limites inferior e superior.

Assim, seguindo a abordagem triangular proposta por Law e Kelton (1991), será assumido que a performance dos combustíveis e da energia elétrica segue distribuição triangular. Essa distribuição é mais sofisticada do que a uniforme e mais simples do que a beta (que são as outras duas distribuições geralmente utilizadas quando não se dispõe de dados, segundo Law e Kelton (1991) e Banks; Carson e Nelson (1996)).

É necessário, então, definir valores de performance mais prováveis, mínimos e máximos para cada combustível utilizado nos veículos convencionais, em cada uma das quatro categorias de tamanho de motor. O mesmo raciocínio será aplicado mais adiante ao Chevrolet Volt, que é o representante dos automóveis elétricos híbridos *plug-in*. Como foi dito, os valores mais prováveis de performance dos combustíveis e da energia elétrica serão obtidos através de dados dos fabricantes e de publicações especializadas. Em relação aos automóveis convencionais, será calculada a média dos valores de performance da gasolina de 5 veículos para cada uma das 4 categorias. Procurou-se escolher veículos bem aceitos no mercado, de maneira a obter representatividade da população de veículos. Nos casos em que foram fornecidas estimativas de performance de um mesmo veículo em trechos urbanos (cidade) e em rodovias (estrada), calculou-se a média dos valores. Os dados seguem na tabela abaixo.

Tabela 5.10: Performance média da gasolina em automóveis convencionais por categoria de volume de motor

Volume de motor [litros]	Modelo	Performance da gasolina [km/l]
<=1,0	Chevrolet Celta 1.0	15,6
	Fiat Uno Mille 1.0	16,2
	Fiat Palio 1.0	11,7
	Ford KA 1.0	15,2
	Volkswagen Gol 1.0	16,4
	Média	15,0
> 1,0 e <=1,6	Chevrolet Corsa 1.4	14,6
	Chevrolet Prisma 1.4	15,5
	Fiat Palio 1.4	11,8
	Peugeot 206 1.4	12,1
	Volkswagen Gol 1.6	15,9
	Média	14,0
> 1,6 e <2,0	Chevrolet Corsa 1.8	13,4
	Fiat Palio 1.8R	9,7
	Honda Civic 1.8	12,9
	Nissan Tiida 1.8	13,8
	Toyota Corolla 1.8	11,3
	Média	12,2
>=2,0	Chevrolet Astra 2.0	13,8
	Chevrolet Vectra 2.0	9,2
	Ford Focus 2.0	10,7
	Honda Accord 2.0	12,1
	Renault Mégane 2.0	8,5
	Média	10,8

Fonte: Auto Review, Carro Bonito, Carros na Web, Carplace, Carsale, Globo, Uol e Motor Clube

Figueiredo (2008) apresenta em seu estudo intitulado “Emissão veicular de gases de efeito estufa devida ao tipo de combustível” uma tabela com a eficiência relativa de cada combustível, que pode ser visualizada logo abaixo.

Tabela 5.11: Eficiência relativa dos combustíveis

Combustível	Relação de consumos [%]	Relação de autônias [%]	Poder Calorífico Inferior [MJ / litro]	$\eta_{\text{conv}} \text{ relativa } [\%]$
gasolina A	100	100	32,4	100
gasolina C (E22)	104	96	29,9	104
etanol hidratado	150	67	19,9	109

Fonte: Figueiredo (2008)

A performance do álcool nos veículos convencionais será calculada a partir da performance da gasolina e com base na tabela 5.11, considerando a relação de autonomias entre o etanol hidratado (álcool) e a gasolina C, que é o tipo utilizado no Brasil. Vale dizer que as relações de autonomias apresentadas na tabela 5.11 são fornecidas com base na gasolina A, que é o tipo utilizado nos Estados Unidos. O cálculo foi feito dividindo-se a relação de autonomia do álcool hidratado (67% da autonomia da gasolina A) pela relação de autonomia da gasolina C (96% da autonomia da gasolina A). O resultado, 70%, indica que cada litro de álcool, em média, é capaz de fazer com que um veículo enquadrado numa das quatro categorias de tamanho de motor percorra 70% da distância percorrida por um veículo da mesma categoria abastecido com um litro de gasolina C.

Em relação à performance do Chevrolet Volt, serão utilizados os dados de autonomia elétrica, de desempenho do motor de combustão interna (utilizando gasolina tipo A) e de capacidade energética efetiva deste veículo, fornecidos na tabela 4.1, no item 4.2 do capítulo 4. A performance média do motor elétrico, que será considerada a mais provável, é o resultado da divisão da autonomia elétrica, que representa a distância que o Chevrolet Volt percorre apenas com o uso do motor elétrico e é medida em km, pela capacidade energética efetiva da bateria do veículo, que é medida em kWh.

Como foi dito no item 4.3, quando se excede a autonomia elétrica, o veículo ativa seu motor de combustão interna (MCI). Nesse caso, deve-se considerar o desempenho do MCI. Já que os valores de performance do MCI do Chevrolet Volt são fornecidos com base no uso exclusivo de gasolina tipo A, o primeiro passo consiste em converter a performance do MCI do Volt alimentado por gasolina deste tipo para gasolina do tipo C. Para tal, deve-se multiplicar o desempenho do motor de combustão interna do Chevrolet Volt, fornecido na tabela 4.1 do capítulo 4, pela relação de autonomias entre os dois tipos de gasolina em análise, que é 96% (ver tabela 5.11).

Uma vez calculada a performance do MCI do Volt com base no tipo de gasolina utilizada no Brasil, deve-se calcular a performance desse motor quando alimentado por álcool. Nesse intuito, basta repetir o mesmo cálculo que foi feito para os automóveis convencionais, que consiste em multiplicar a performance do motor alimentado por gasolina C pela relação de autonomias entre o álcool e a gasolina do tipo C, que é 70%.

Posto que este estudo está utilizando dados de performance de apenas um modelo de automóvel elétrico híbrido *plug-in* para analisar a viabilidade destes veículos, que é o

Chevrolet Volt, as performances da energia elétrica e do motor de combustão interna não serão subdivididas em categorias. A tabela abaixo ilustra os valores médios de performance do álcool e da gasolina nos veículos convencionais, da energia elétrica utilizada no motor elétrico do Chevrolet Volt e também do álcool e da gasolina utilizados no motor de combustão interna do veículo elétrico em questão.

Tabela 5.12: Performance média dos combustíveis utilizados em veículos convencionais e no Chevrolet Volt

Volume do motor [litros]	Valores médios de performance				
	Veículos convencionais			Chevrolet Volt	
	Álcool [km/l]	Gasolina [km/l]	Energia Elétrica [km/kWh]	Gasolina (MCI) [km/l]	Álcool (MCI) [km/l]
<=1,0	10,5	15,0			
> 1,0 e <=1,6	9,7	14,0			
> 1,6 e <2,0	8,5	12,2	7,3	20,4	14,3
>=2,0	7,6	10,8			

Fonte: Elaborado pelo autor

Como já foi dito, é possível que a performance de um veículo seja nula, caso seu motor consuma todo o combustível sem se deslocar. É teoricamente possível, também, que os valores de performance atinjam níveis bastante elevados, caso o veículo percorra apenas vias declinadas (ladeiras), não havendo a necessidade de pressionar o pedal de aceleração. Esses dois casos, contudo, dificilmente são notados na prática. Por essa razão, os valores mínimos e máximos de performance de cada combustível em cada categoria serão considerados, respectivamente, 20% abaixo e 20% acima dos valores mais prováveis, que são os valores médios.

A principal razão para escolha desse percentual é que a maioria dos automóveis dispostos na tabela 5.10 apresentam performance não inferior a 80% nem superior a 120% do valor médio da categoria a que pertencem. Vale dizer que, assim como foi comentado no item anterior, este estudo não pretende afirmar que a performance dos automóveis de cada uma das categorias se encontra com certeza dentro deste intervalo. O que se deseja, como proposto por Law e Kelton (1991), é identificar um intervalo de ocorrência em que a variável será encontrada com probabilidade próxima de 100%. O intervalo definido atende a esse critério. De maneira análoga, os valores mínimos e máximos de performance da energia elétrica utilizada no Volt e do MCI abastecido com gasolina e álcool serão considerados,

respectivamente, 20% abaixo e 20% acima dos valores mais prováveis, valores estes informados pelo fabricante.

A linguagem de programação utilizada no *software Palisade @Risk* que representa uma distribuição triangular é:

$$=\text{RiskTriang}(a;b;c)$$

Em que:

- *a* corresponde ao valor mínimo;
- *b* corresponde ao valor mais provável;
- *c* corresponde ao valor máximo.

Uma vez que, como foi dito, o valor mínimo de performance de cada combustível e da energia elétrica será considerado 80% do valor médio (e mais provável) e o valor máximo será considerado 120% do valor médio, a linguagem de programação a ser utilizada no *software Palisade @Risk* é:

$$=\text{RiskTriang}(0,8;1;1,2)$$

Esse comando multiplicará os valores de performance de referência de cada combustível e da energia elétrica.

5.3.3 Cálculo do custo por km percorrido

Uma vez conhecidos os preços e a performance dos combustíveis e da energia elétrica, é possível calcular o custo por km percorrido. No caso do álcool e da gasolina, o custo por km percorrido é obtido dividindo-se o preço do combustível em questão, que varia de acordo com o estado brasileiro e é medido em R\$/l, por sua performance, que varia de acordo com a categoria de volume de motor e é medida em km/l. Esse raciocínio vale tanto para os automóveis convencionais quanto para o motor de combustão interna do Chevrolet Volt. De maneira análoga, o custo por km percorrido da energia elétrica utilizada no automóvel elétrico em questão é calculado dividindo-se o preço da energia elétrica, que varia de acordo com o

estado brasileiro e é medido em R\$/kWh, por sua performance, medida em km/kWh. Em ambos os casos o resultado será medido em R\$/km, ou seja, quanto se gasta para percorrer 1 km.

Dado que os preços são fornecidos para cada fonte de energia (álcool, gasolina e energia elétrica) e por estado e as performances dos automóveis convencionais são fornecidas para cada fonte de energia e por tamanho de motor, o custo por km percorrido será subdividido em termos da fonte de energia, do estado e da categoria de motor. No caso do Chevrolet Volt, como já explicado, não há subdivisão por volume de motor. A tabela completa é muito grande para ser disponibilizada neste trabalho. Além disso, cada iteração do *software Palisade @Risk* gerará um novo conjunto de dados. Assim, de maneira similar ao que foi feito no item 5.2.4, logo abaixo será apresentado um trecho desta tabela contendo os valores médios dos custos por km percorrido¹³.

Tabela 5.13: Custo médio por km percorrido para o estado do Acre

Estado	Volume do motor [litros]	Custo por km percorrido [R\$/km]				
		Veículos convencionais		Chevrolet Volt		
		Álcool	Gasolina	Energia Elétrica	Gasolina (MCI)	Álcool (MCI)
Acre	<=1,0	0,20	0,20			
Acre	> 1,0 e <=1,6	0,21	0,21	0,04	0,14	0,15
Acre	> 1,6 e <2,0	0,24	0,24			
Acre	>=2,0	0,28	0,27			
...	...	...	...	...	...	...

Fonte: Elaborado pelo autor

Coincidentemente, os custos por km percorrido da gasolina e do álcool utilizados em veículos convencionais no estado do Acre são praticamente idênticos (na verdade há variações na terceira casa decimal). Isso significa que a diferença de preço da gasolina em relação ao álcool foi proporcional à diferença de performance desses dois combustíveis. Observando os custos por km percorrido do Chevrolet Volt fica clara a enorme economia proporcionada pelos veículos elétricos híbridos *plug-in*. A diferença de custos é significativa mesmo que seja necessário utilizar o MCI do veículo para reabastecer a bateria.

¹³ Conforme mencionado anteriormente, os arquivos contendo o modelo e todas as tabelas estão disponíveis no CD que acompanha o trabalho

5.3.4 Cálculo da economia do veículo elétrico

Neste momento é importante dizer que eventuais diferenças entre os custos de manutenção dos automóveis tradicionais e automóveis elétricos híbridos *plug-in* não estão sendo consideradas neste trabalho. Um especialista da ABVE foi consultado a respeito deste tema e sua sugestão foi de não considerar tais custos (informação verbal)¹⁴. Assim sendo, o cálculo da economia do veículo elétrico será realizado exclusivamente com base na economia de combustível. A explicação do cálculo segue abaixo.

Partindo do custo por km percorrido calculado no item anterior pode-se mensurar a economia proporcionada pelo Chevrolet Volt, que representa os automóveis elétricos híbridos *plug-in*. Neste momento é importante lembrar, ainda que de maneira resumida, o funcionamento desse veículo, que conta com um motor elétrico e também um motor de combustão interna (MCI). A única função deste último motor é reabastecer as baterias quando essas atingem um valor mínimo. Assim, apenas o motor elétrico é responsável por movimentar os eixos e as rodas do veículo. Se a distância percorrida pelo Chevrolet Volt num certo dia for inferior à sua autonomia elétrica, que é de 64 km, o uso no MCI é desnecessário. Ao fim do dia, quando o motorista chegar a sua residência, ele deverá recarregar as baterias do veículo, podendo novamente percorrer 64 km sem o uso do MCI.

Logo, motoristas que não excederem a autonomia elétrica atingirão o valor máximo de economia por km, que é dado pela diferença entre o custo por km percorrido por um veículo convencional abastecido com o combustível mais econômico (álcool ou gasolina, de acordo com o estado) e o custo por km percorrido pelo Chevrolet Volt com uso exclusivo de energia elétrica. Tomando como exemplo os dados da tabela 5.13 é possível notar que a economia média de um proprietário do Chevrolet Volt residente no Acre que percorra menos de 64 km por dia será de R\$ 0,16 / km em comparação com um veículo com motor não superior a 1,0 litro, R\$ 0,17 / km em comparação com um veículo com motor maior que 1,0 litro e menor ou igual a 1,6 litro, R\$ 0,20 / km em comparação com um veículo com motor maior que 1,6 litro e menor que 2,0 litros ou R\$ 0,23 / km em comparação com um veículo com motor maior que 2,0 litros.

¹⁴ O especialista Pietro Erber, da ABVE, foi consultado por e-mail em 29 out. 2009

Entretanto, aqueles motoristas que excederem a autonomia elétrica do veículo precisarão utilizar o motor de combustão interna para manter a bateria em seu nível mínimo de carga. Nesses casos, a economia será dada pela média ponderada entre a economia máxima, obtida nos primeiros 64 km percorridos com uso exclusivo do motor elétrico, e a economia obtida com o uso do motor de combustão interna na distância adicional percorrida. Como é possível utilizar tanto álcool como gasolina no MCI do Chevrolet Volt, a economia quando se utiliza esse motor será calculada através da diferença entre o custo por km percorrido por um veículo convencional abastecido com o combustível mais econômico (álcool ou gasolina, de acordo com o estado) e o custo por km percorrido pelo Chevrolet Volt utilizando seu MCI abastecido com o combustível mais econômico (álcool ou gasolina, de acordo com o estado). A ponderação deve ser feita pela quilometragem percorrida em cada uma das duas situações (nos primeiros 64 km e nos km subseqüentes). Logo, fica claro que o cálculo da economia deve levar em conta a distância percorrida diariamente.

No item 5.2.1 foram estabelecidos valores médios de distância percorrida por ano. É necessário, então, converter a distância percorrida por ano em distância percorrida por dia. Para tal, optou-se por dividir a quilometragem percorrida por ano pelo número de dias do ano, ou seja, dividir por 365, obtendo-se a média diária. Embora seja pouco provável que um motorista percorra exatamente a mesma distância todos os dias, alguns fatores contribuíram para que esse método de cálculo fosse adotado.

O primeiro deles é que não se dispõe de dados do perfil da quilometragem rodada de acordo com o dia da semana. O segundo é que o uso do valor médio considera compensações, ou seja, é provável que haja tanto motoristas que eventualmente percorram distâncias acima de suas próprias médias diárias como motoristas que esporadicamente percorram distâncias abaixo de suas médias diárias. Para exemplificar, imagine que certo motorista que percorre normalmente menos de 64 km (menos do que a autonomia elétrica do Chevrolet Volt) percorra mais de 64 km num certo dia (situação típica de num final de semana, caso o motorista decidisse fazer uma viagem, por exemplo). Isso diminuiria a economia desse motorista por km percorrido, já que seria necessário utilizar o motor de combustão interna. Entretanto, é possível que um motorista que normalmente percorre mais de 64 km percorra, num certo dia, menos de 64 km, de maneira que economize mais nesse dia, pois utilizará apenas o motor elétrico (esse seria o caso de um motorista que percorre grandes distâncias para ir ao trabalho, mas que usa o carro para rodar distâncias curtas no final de semana, por exemplo).

Mesmo que este último motorista percorra uma distância menor do que a distância habitualmente percorrida por ele, porém maior do que 64 km, ele já estará aumentando sua economia por km, pois a proporção do uso do motor elétrico aumentará. É também possível que um mesmo motorista percorra, em certos dias, distâncias maiores do que sua própria média e, em outros dias, distâncias menores do que o valor médio. Embora a economia não seja simétrica em relação ao valor da autonomia elétrica, já que o valor da economia por km é fixo para todos os motoristas que percorrem menos de 64 km (para cada estado e dentro de cada uma das categorias de tamanho de motor), mas variável para os motoristas que percorrem mais de 64 km, sendo tanto menor quanto maior a distância percorrida, optou-se por adotar o uso da quilometragem média diária pelos motivos acima expostos.

De maneira análoga ao que foi feito no item 5.3.3, será apresentado aqui apenas um trecho da tabela completa, que é muito extensa para ser explicitada por completo. Ressalta-se que os valores são médios¹⁵.

Tabela 5.14: Economia média por km percorrido para o estado do Acre

Estado	Volume do motor [litros]	Economia por km de acordo com a quilometragem percorrida por dia [R\$/km]						
		3 km	...	63 km	68 km	74 km	...	162 km
Acre	<=1,0	0,15	...	0,15	0,15	0,14	...	0,09
Acre	> 1,0 e <=1,6	0,17	...	0,17	0,16	0,16	...	0,11
Acre	> 1,6 e <2,0	0,20	...	0,20	0,19	0,19	...	0,14
Acre	>=2,0	0,23	...	0,23	0,22	0,22	...	0,17
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fonte: Elaborado pelo autor

Reforça-se que os valores de economia por km para distâncias diárias inferiores à autonomia elétrica do Chevrolet Volt são idênticos para um mesmo estado e uma mesma categoria de volume de motor. A partir de 64 km, o valor da economia começa a diminuir e atinge o valor mínimo quando a distância percorrida é máxima, situação em que a proporção do uso do MCI é máxima. Vale lembrar que os valores de economia apresentados na tabela 5.14 foram calculados com base em valores médios. Como a performance dos combustíveis e

¹⁵ Conforme mencionado anteriormente, os arquivos contendo o modelo e todas as tabelas estão disponíveis no CD que acompanha o trabalho

da energia elétrica é estocástica, cada iteração do *software Palisade @Risk* gerará um novo conjunto de valores.

5.3.5 Investimento adicional para compra do veículo elétrico

Idealmente seria interessante escolher quatro modelos de automóveis elétricos híbridos *plug-in* (um para cada uma das quatro categorias de tamanho de motor). Entretanto, dado que há pouquíssimos veículos elétricos pertencentes a esta categoria com dados disponíveis, não foram selecionados outros três modelos além do Chevrolet Volt. O próprio valor de aquisição do referido automóvel não foi oficialmente confirmado. Apesar de a GM ter inicialmente estimado um preço de US\$ 30.000 no mercado americano, fontes mais atuais estimam que o preço seja US\$ 40.000¹⁶. O que ainda não se sabe é se a GM irá, num primeiro momento, vender o veículo com prejuízo, subsidiando parte do valor de aquisição. David Cole, *chairman* do *Center for Automotive Research*, acredita que o preço das baterias pode cair no futuro, reduzindo o preço do Chevrolet Volt de US\$ 40.000 para cerca de US\$ 30.000.¹⁷ É possível, também, que os proprietários do Chevrolet Volt recebam créditos fiscais do governo americano, que podem chegar a US\$ 7.500¹⁸, alterando significativamente o valor de aquisição do veículo.

Esses fatos dificultam a determinação do valor adicional pago para se adquirir um veículo elétrico híbrido *plug-in* por três motivos. Primeiro, porque os preços dos veículos convencionais variam muito de uma categoria de motor para outra (automóveis 2.0, por exemplo, tendem a ser bem mais caros do que automóveis 1.0), sendo difícil selecionar um automóvel convencional de referência cujo preço possa ser comparado diretamente com o do Chevrolet Volt. Segundo, porque o próprio preço do Chevrolet Volt é bastante incerto. Terceiro, porque o correto seria utilizar dados de vários automóveis elétricos híbridos *plug-in* a fim de se obter um preço médio de aquisição, e não apenas os dados do Chevrolet Volt. Deve-se lembrar que o objetivo deste estudo é analisar o mercado potencial de automóveis

¹⁶ De acordo com HowStuffWorks (2009)

¹⁷ De acordo com The New York Times (2008)

¹⁸ De acordo com Msnbc (2008)

elétricos híbridos *plug-in* como um todo no Brasil, e não o mercado potencial do Chevrolet Volt.

Uma possível abordagem para determinar o valor do investimento adicional no automóvel elétrico seria tomar como base o preço de venda estimado do Chevrolet Volt e comparar esse preço com algum automóvel semelhante ao Volt, mas que não fosse elétrico. A diferença de preço entre esses veículos poderia ser considerada o valor extra pago para se adquirir um automóvel elétrico. Todavia, esse método apresenta algumas restrições. Em primeiro lugar, seria necessário escolher um automóvel convencional semelhante ao Volt, de maneira que a diferença de preços refletisse apenas os benefícios de se ter um veículo elétrico. Em segundo, seria necessário assumir que esta diferença de preços é válida para todas as quatro categorias de volume de motor que estão sendo utilizadas neste estudo. Em terceiro, este raciocínio assumiria implicitamente que o Volt é a única opção de automóvel elétrico híbrido *plug-in*, excluindo a possibilidade de que outras montadoras lancem automóveis elétricos desta categoria nos próximos anos.

Por conta dessas restrições, optou-se por outro método para definir o valor extra a ser pago por um veículo elétrico híbrido *plug-in*. Num estudo do banco de investimentos Credit Suisse intitulado “Electric Vehicles – Back to the Future”, do ano de 2009, estima-se que o preço atual das baterias utilizadas nos automóveis elétricos é de US\$ 1.200 por kWh. Este estudo considera que o preço de um automóvel elétrico híbrido *plug-in* é composto por duas parcelas: um preço base e o preço da bateria, que varia de acordo com a capacidade energética, medida em kWh. Seguindo um raciocínio análogo, o presente estudo também considerará que o preço de um automóvel elétrico híbrido *plug-in* é composto por dois componentes: um valor base, valor este que será considerado o preço de aquisição de um automóvel convencional equivalente, e o valor das baterias, que representa o valor extra a ser pago para se adquirir um automóvel elétrico da categoria em questão.

Esse método exclui a necessidade de se definir um automóvel convencional equivalente ao Volt, pois o valor adicional a ser pago para adquirir um automóvel elétrico é função apenas da capacidade e do preço da bateria do automóvel. Além disso, o valor adicional calculado com base neste método reflete apenas as vantagens dos veículos elétricos híbridos *plug-in*, não levando em consideração características como conforto, luxo, tamanho, etc., características estas que poderiam distorcer a análise. Por último, este método não utiliza o valor de aquisição do Chevrolet Volt, valor este bastante incerto, de maneira que o resultado

reflete o potencial de vendas dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* como um todo. Por todos esses motivos, esse será o método utilizado.

Embora o método acima tenha sido considerado adequado para este estudo, é importante ressaltar que ele representa uma simplificação da realidade, pois admite que haverá automóveis elétricos híbridos *plug-in* equivalentes a outros convencionais, diferindo apenas no tipo de força motriz. Além disso, o preço de US\$ 1.200 por kWh é estimado e pode variar à medida que veículos elétricos se tornem mais populares. Por último, não se sabe ao certo qual será a capacidade média das baterias utilizadas nos automóveis elétricos híbridos *plug-in*. Essas incertezas justificam a necessidade de classificar o investimento adicional para compra do veículo elétrico como uma variável estocástica. Além disso, faz-se necessária uma análise de sensibilidade para avaliar tanto a possibilidade de o governo brasileiro fornecer incentivos fiscais para os proprietários de automóveis elétricos como eventuais reduções nos preços das baterias. Essas análises serão feitas no capítulo 6.

Considerando o alto grau de incerteza por trás do valor do investimento adicional no veículo elétrico e a falta de dados a respeito do tipo de distribuição que essa variável pode assumir, novamente será preciso utilizar as estratégias propostas por Law e Kelton (1991) e Banks; Carson e Nelson (1996).

O estudo “Electric Vehicles – Back to the Future” mencionado anteriormente afirma também que todos os modelos anunciados de automóveis elétricos híbridos *plug-in* possuem bateria com capacidade que varia de 10 kWh a 16 kWh, sendo esta última a capacidade da bateria do Chevrolet Volt. A única exceção é o modelo Karma, da empresa Fisker, que possui bateria de maior capacidade. Este automóvel, entretanto, é um modelo de alto luxo, com preço estimado de US\$ 80.000¹⁹ no mercado internacional, sendo destinado a um público muito restrito, o que permite que ele seja desconsiderado nesse estudo. Assim, os limites da capacidade de bateria de um automóvel elétrico híbrido *plug-in* serão considerados 10 kWh (limite inferior) e 16 kWh (limite superior). O processo de obtenção desses valores seguiu a estratégia proposta por Banks; Carson e Nelson (1996) de buscar dados de engenharia (neste caso representados pelos dados do estudo do banco de investimentos Credit Suisse). Embora esses valores não representem limitações físicas, será assumido que toda a probabilidade de ocorrência da variável está contida neste intervalo.

¹⁹ De acordo com Webmotors (2008)

Além dos limites, não se tem qualquer informação que permita definir um valor mais provável de ocorrência da variável dentro do intervalo. Portanto, seria muito arriscado assumir que esse valor é o ponto médio do intervalo, que é 13 kWh. Assim sendo, será admitido, seguindo a proposta de Law e Kelton (1991), que o investimento adicional na aquisição dos veículos elétricos segue distribuição beta com parâmetros $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, que é a distribuição uniforme. Como dito no item 5.3.1 do presente capítulo e no capítulo 2, item 2.3.2., a distribuição uniforme é utilizada quando o comportamento da variável é pouco conhecido. Não será considerado que o valor extra de investimento é diferente de acordo com a categoria de volume de motor.

Com base nos valores-limite de capacidade das baterias de automóveis elétricos híbridos *plug-in* definidos acima, é preciso calcular o intervalo, em R\$, do investimento adicional no automóvel elétrico. Considerando o preço de US\$ 1.200 por kWh, o limite inferior de investimento adicional corresponde a US\$ 12.000, enquanto o limite superior corresponde a US\$ 19.200. O cálculo foi feito multiplicando-se os valores-limite de capacidade de bateria (10 kWh e 16 kWh) pelo preço acima mencionado. O próximo passo é converter esse valor para a moeda brasileira, que é o real (R\$). Utilizando a o valor médio de compra do dólar referente ao mês de setembro de 2008 (US\$ 1,00 = R\$ 1,82)²⁰, obtêm-se os seguintes valores limite.

Tabela 5.15: Valores limite de investimento adicional na compra de veículos elétricos

Capacidade mínima da bateria [kWh]	Valor mínimo [R\$]
10	21.828
Capacidade máxima da bateria [kWh]	Valor máximo [R\$]
16	34.925

Fonte: Elaborado pelo autor

Isso significa que se está assumindo que o valor do investimento adicional na compra de um automóvel elétrico híbrido *plug-in* está entre R\$ 21.828 e R\$ 34.925. Logicamente a probabilidade de que o investimento corresponda exatamente a qualquer um desses valores-limite é nula. Entretanto, admite-se que o valor do investimento se encontra dentro desse intervalo. Considerando os valores explicitados na tabela 5.15, e a linguagem de programação

²⁰ De acordo com Banco Central do Brasil (2009)

que representa uma distribuição uniforme no *software Palisade @Risk* apresentada no item, o comando a por este *software* é:

=RiskUniform(21.828;34.925).

5.3.6 Cálculo do VPL

Partindo-se da economia proporcionada pelos automóveis elétricos, calculada no item 5.3.4, e do investimento adicional necessário para adquirir tais automóveis, definido no item 5.3.5, é possível calcular o valor presente líquido do investimento, ou seja, qual é a riqueza líquida gerada pela aquisição de um automóvel elétrico.

Dado que o valor da economia dos automóveis elétricos por km varia de acordo com a quilometragem percorrida, com o volume do motor e com o estado brasileiro, o cálculo do VPL deve considerar esses três níveis de agregação. O cálculo será explicado abaixo.

Passo 1: deve-se calcular a economia anual proporcionada pelo veículo elétrico. Esse cálculo deve ser feito para cada faixa de quilometragem percorrida, para cada categoria de volume de motor e para cada estado brasileiro, já que a economia por km é função desses níveis de segmentação. Para tal, basta multiplicar a economia por km de acordo com a quilometragem percorrida por dia, calculada no item 5.3.4, medida em R\$/km, pelas faixas correspondentes de quilometragem percorrida por ano, medidas em km/ano. O resultado será a economia anual ao se utilizar o veículo elétrico, medida em R\$/ano. Como dito, o valor da economia é distinto para cada faixa de quilometragem percorrida, cada categoria de volume de motor e cada estado brasileiro.

Passo 2: é preciso definir uma taxa de desconto anual para atualizar os valores dos fluxos de caixa (economias anuais) a valores presentes. Será considerada, para este propósito, a taxa básica utilizada como referência no Brasil, conhecida como taxa Selic, que atualmente é 8,75% ao ano²¹. Essa taxa pode ser considerada como o custo de oportunidade do investidor interessado em adquirir um automóvel elétrico.

²¹ De acordo com Veja (2009)

Passo 3: deve-se definir um horizonte de tempo para calcular o valor presente líquido. Esse horizonte será considerado de 10 anos, que pode ser entendido como a vida do veículo.

Passo 4: por último, deve-se calcular, para cada faixa de quilometragem, cada categoria de motor e cada estado brasileiro, qual é o VPL (valor presente líquido) do investimento adicional na aquisição do veículo elétrico híbrido *plug-in*. A fórmula de cálculo do valor presente utilizada no *software Palisade @Risk* é:

$$=PV(a;b;c)$$

Em que:

- *a* corresponde à taxa de desconto anual;
- *b* corresponde ao horizonte de tempo de cálculo (medido em anos);
- *c* corresponde à economia anual proporcionada pelo veículo elétrico

O resultado representa (para o estado, o tamanho de motor e a quilometragem anual percorrida em questão) a riqueza líquida, medida em reais (R\$), gerada pelo investimento adicional no automóvel elétrico, considerando a economia de combustível proporcionada pelo veículo. Segue abaixo um trecho da tabela com os valores médios. Novamente ressalta-se que a tabela completa é muito grande para ser disponibilizada²².

Tabela 5.16: VPL de referência para o estado do Acre

Estado	Volume do motor [litros]	VPL [R\$]				
		1.000 km	...	11.000 km	...	59.000 km
Acre	<=1.0	-16.245	...	-6.933	...	17.076
Acre	> 1.0 e <=1.6	-20.059	...	-9.883	...	18.276
Acre	> 1.6 e <2.0	-32.369	...	-20.326	...	16.794
Acre	>=2.0	-37.747	...	-23.872	...	22.037
...	...	...	...	...	...	...

Fonte: Elaborado pelo autor

Deve-se enfatizar que os números apresentados na tabela 5.16 foram calculados com base nos valores de referência, sem considerar a aleatoriedade das variáveis estocásticas. No

²² Conforme mencionado anteriormente, os arquivos contendo o modelo e todas as tabelas estão disponíveis no CD que acompanha o trabalho

final deste capítulo, momento em que será realizada a simulação, o *software Palisade @Risk* gerará um conjunto de valores de VPL a cada iteração, de forma que o resultado final será uma distribuição de probabilidades. A título de exemplo, o gráfico abaixo ilustra o VPL calculado com base nos valores de referência para veículos do estado do Acre com motor maior do que 1,0 litro e menor ou igual a 1,6 litro.

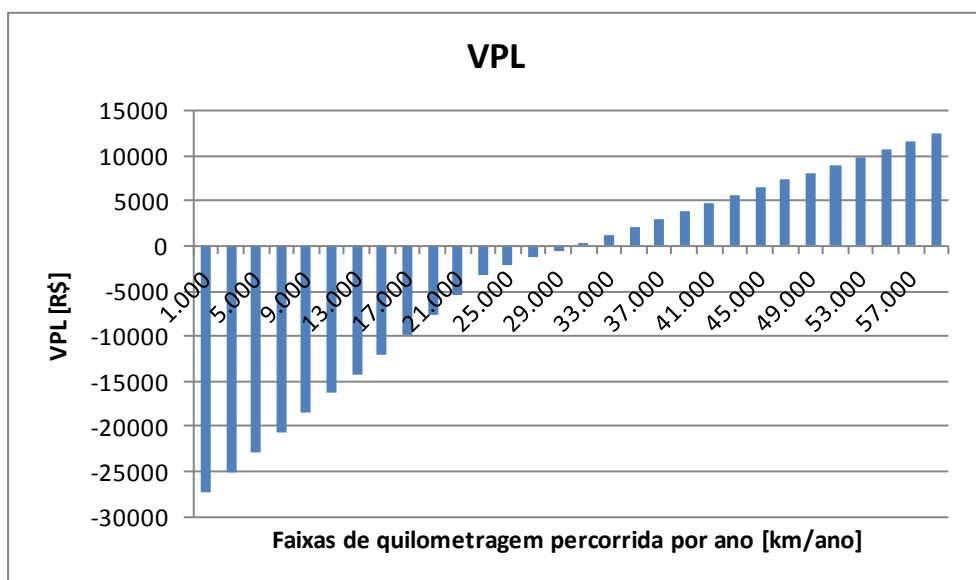


Gráfico 5.3: VPL de referência para motoristas de automóveis com motor maior que 1,0 litro e menor ou igual a 1,6 litro localizados no Acre

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando o gráfico acima, nota-se que o VPL calculado com base nos valores médios aumenta de acordo com a quilometragem percorrida por ano. Isso indica que os automóveis elétricos são mais interessantes aos motoristas que percorrem maiores distâncias. Outro ponto que pode ser observado é que os histogramas crescem seguindo uma mesma inclinação para as quilometragens de 1.000 km/ano a 23.000 km/ano e, a partir de 25.000 km/ano, crescem segundo outra inclinação. A explicação é que o custo por km percorrido é igual para motoristas que percorrem de 1.000 km/ano até 23.000 km/ano, já que está sendo considerado que esses motoristas utilizam apenas o motor elétrico do Chevrolet Volt, pois não ultrapassam a autonomia elétrica do automóvel, que é de 64 km (mais detalhes no item 5.3.4). Já os motoristas que percorrem mais de 23.000 km/ano necessitarão utilizar o motor de combustão interna, o que reduz a economia proporcionada pelo automóvel elétrico. Embora os valores de VPL também variem de acordo com o estado e com a categoria de motor, a

forma geral do gráfico acima se mantém em todos os casos, ou seja, automóveis elétricos são sempre mais vantajosos para motoristas que percorrem grandes quilometragens.

5.4 Cálculo da migração para os veículos elétricos

Finalmente, uma vez conhecida a distribuição da frota de veículos e o valor presente líquido do investimento adicional no automóvel elétrico híbrido *plug-in* é possível responder a principal pergunta deste estudo. Essa pergunta é: qual seria a participação dos automóveis híbridos *plug-in* nas vendas de veículos novos no Brasil caso estivessem disponíveis?

O cálculo da resposta final será explicado a seguir.

Passo 1: para cada combinação de estado brasileiro, de categoria de volume de motor e de faixa de quilometragem anual percorrida, deve-se verificar se o VPL calculado no item 5.3.6 é positivo ou negativo. Se for negativo, será considerado que o investimento extra no automóvel elétrico não é vantajoso para o consumidor que se enquadra no perfil em questão (combinação de estado, volume de motor e quilometragem anual percorrida). Por outro lado, se o resultado for positivo (ou nulo), será considerado que o investimento está gerando valor ao consumidor.

Passo 2: as parcelas da frota de automóveis correspondentes às combinações de estado brasileiro, de categoria de volume de motor e de faixa de quilometragem anual percorrida que apresentam VPL positivo devem ser somadas. Exemplo: se o VPL correspondente à frota de automóveis do estado do Acre que possuem volume de motor menor ou igual a 1,0 litro e que percorrem 13.000 km/ano for positivo (ou nulo), essa frota será contabilizada no resultado final.

Passo 3: por último, basta dividir a soma calculada no passo 2 pela frota total de automóveis do Brasil.

O resultado final, obtido em termos percentuais, simboliza qual é o percentual de automóveis da frota que seriam potencialmente substituídos por automóveis elétricos híbridos *plug-in* caso estes estivessem disponíveis e, conseqüentemente, pode-se dizer que representa o

market share potencial dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* na venda de veículos novos no Brasil.

Como foi dito, o resultado final não será um valor exato, mas sim uma distribuição de probabilidades, já que algumas variáveis do modelo são estocásticas. O *software Palisade @Risk* será utilizado para realizar a simulação de Monte Carlo. A linguagem de programação a ser utilizada no *software* para que a variável de saída incorpore a aleatoriedade das variáveis estocásticas é:

=RiskOutput()

Dado que o tempo de processamento de cada iteração é baixo, optou-se por efetuar 10.000 iterações. Acredita-se que este número é grande o suficiente para que o resultado seja bem próximo da solução analítica do problema. O gráfico abaixo, que foi gerado pelo *software Palisade @Risk*, ilustra a resposta.

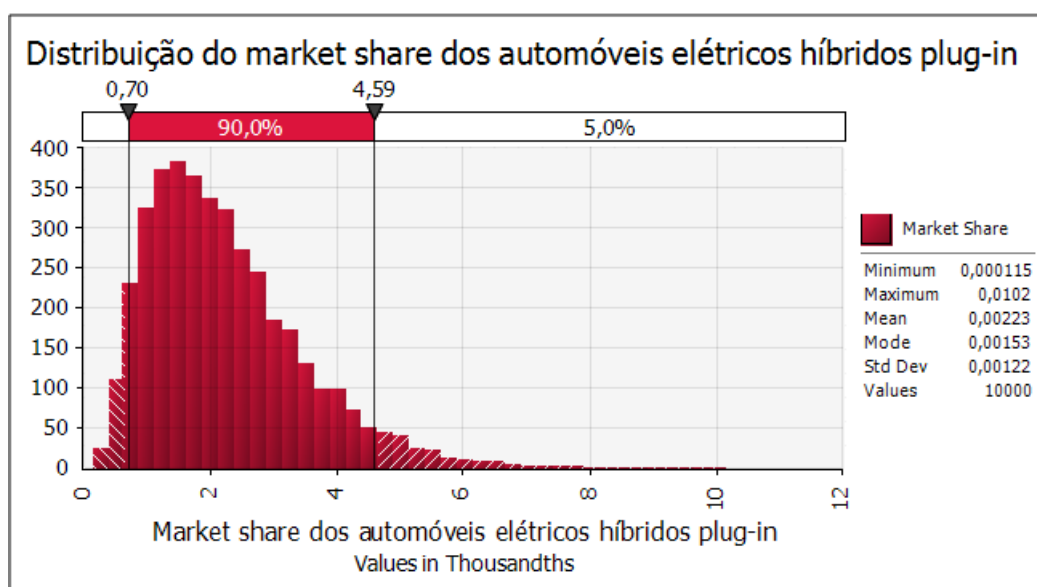


Gráfico 5.4: Distribuição do market share dos automóveis elétricos híbridos plug-in no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor

Uma vez que os valores obtidos através da simulação são muito pequenos (o menor valor é 0,000115 e o maior é 0,0102), o *software Palisade @Risk* convenientemente apresenta o resultado com os valores em milésimos (*thousandths*). Analisando o gráfico 5.4, nota-se que 90% da probabilidade de ocorrência do *market share* situa-se entre 0,00070 (0,070%) e 0,00459 (0,459%). O *market share* médio é 0,00223 (0,223%). Aplicando esse valor médio

aos dados de vendas de automóveis do ano de 2008, ano este em que foram comercializados 2.193 mil automóveis (ver gráfico 3.2, capítulo 3), chega-se a um resultado de cerca de 4.890 automóveis, ou seja, cerca de 5.000 veículos. Esse resultado representa o tamanho médio do mercado potencial dos veículos elétricos híbridos *plug-in*, com base em dados do ano de 2008.

Infelizmente, uma vez que os dados de vendas de automóveis para o ano de 2009 estão agrupados (os valores de vendas de automóveis e veículos comerciais leves foram divulgados conjuntamente), o mesmo raciocínio não pôde ser feito para este ano. Utilizando os valores-limite do intervalo que engloba 90% da probabilidade de ocorrência e os dados de vendas do ano de 2008, pode-se dizer que o número de automóveis elétricos híbridos *plug-in* que potencialmente seriam comercializados anualmente estaria entre 1.535 veículos (0,070% de *market share*) e 10.066 veículos (0,459% de *market share*), com 90% de probabilidade.

Portanto, com base nos dados e nas análises apresentadas ao longo do capítulo 5, pode-se dizer que os automóveis elétricos híbridos *plug-in* representariam um mercado bastante restrito caso estivessem disponíveis para venda no Brasil, considerando que os consumidores optariam pela compra de acordo com o VPL do valor extra pago pelo automóvel. Não obstante, no próximo capítulo serão analisados os impactos de mudanças nos valores do investimento adicional para compra do veículo elétrico.

6. Análises de sensibilidade

No capítulo anterior foi calculada a distribuição do *market share* teórico dos automóveis elétricos no Brasil caso estivessem disponíveis para venda. Para tal, foram atribuídos valores de referência às variáveis do modelo. O resultado obtido através desses valores será chamado de cenário-base, ou seja, simboliza o cenário mais provável, sendo o cenário representante da conjuntura de referência.

Dentre todas as variáveis de entrada no modelo, pode-se dizer que o investimento adicional para se adquirir um automóvel elétrico híbrido *plug-in* é a mais incerta (mais detalhes no item 5.3.5, capítulo 5). Por esse motivo, torna-se necessário avaliar o impacto de alterações no valor desta variável no resultado final. Isso será feito em duas etapas. Na primeira etapa será simulado o efeito de incentivos do governo. Na segunda será simulada uma redução nos preços das baterias.

6.1 Incentivos do governo

É possível que o governo brasileiro subsidie parte do valor de aquisição dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* visando incentivar a compra de tais veículos. Nesse intuito, será considerado que o governo oferecerá créditos fiscais no valor de R\$ 5.000. Como mencionado anteriormente, o governo americano afirmou que adotará uma política semelhante. Segue abaixo o gráfico da distribuição do *market share* considerando incentivos do governo.

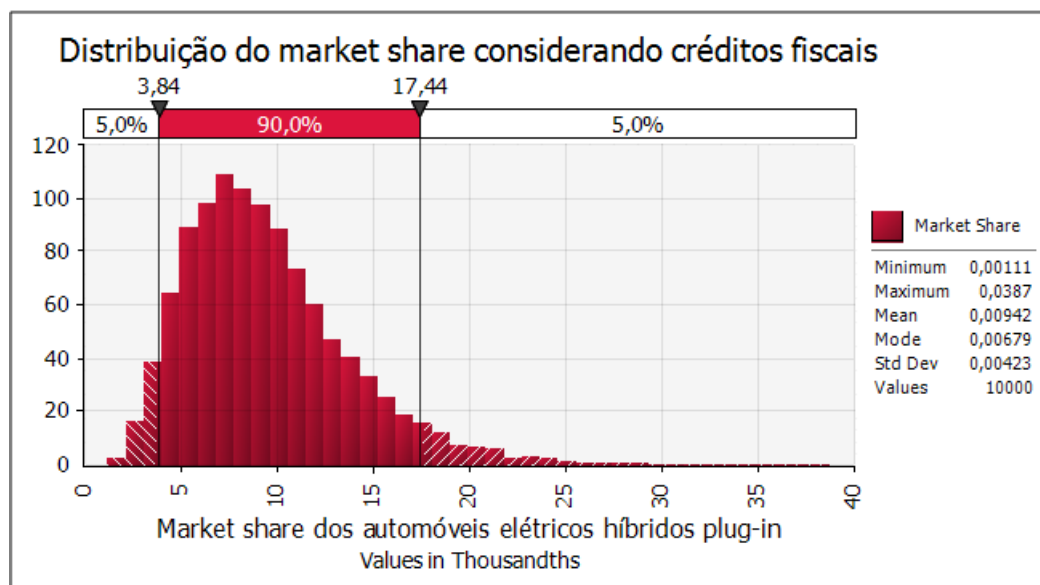


Gráfico 6.1: Distribuição do market share dos automóveis elétricos híbridos plug-in no Brasil considerando créditos fiscais

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados apresentados no gráfico 6.1, que representa o *market share* considerando créditos fiscais de R\$ 5.000,00, mostram que o valor médio do *market share* aumentou para 0,00942 (0,942%), o que representa um aumento de 322% em relação ao valor do cenário-base, que é de 0,223%. É possível observar também que os valores-limite do *market share*, considerando 90% de probabilidade de ocorrência, são 0,00384 (0,384%) e 0,01744 (1,744%). Isso significa que, com base nos dados de vendas de automóveis do ano de 2008 (ver gráfico 3.2, capítulo 3), o número de automóveis elétricos da categoria em análise que potencialmente seriam comercializados anualmente estaria entre 8.421 veículos (0,384% de *market share*) e 38.246 veículos (1,744% de *market share*), com 90% de probabilidade. O número médio de veículos comercializados seria de 20.658 (0,942% de *market share*).

Esses resultados mostram que políticas de incentivo por parte do governo brasileiro causariam grande impacto no de mercado dos automóveis elétricos híbridos *plug-in*.

6.2 Redução nos preços das baterias

De acordo com o estudo do “Electric Vehicles – Back to the Future”, do banco de investimentos Credit Suisse, os preços das baterias podem diminuir dos atuais US\$ 1.200 por kWh para US\$ 900 por kWh em 2012, o que representa uma diminuição de US\$ 300 por kWh. Assim, essa redução de preços será simulada. Segue abaixo o gráfico da distribuição do *market share* considerando redução de US\$ 300 por kWh nos preços das baterias.

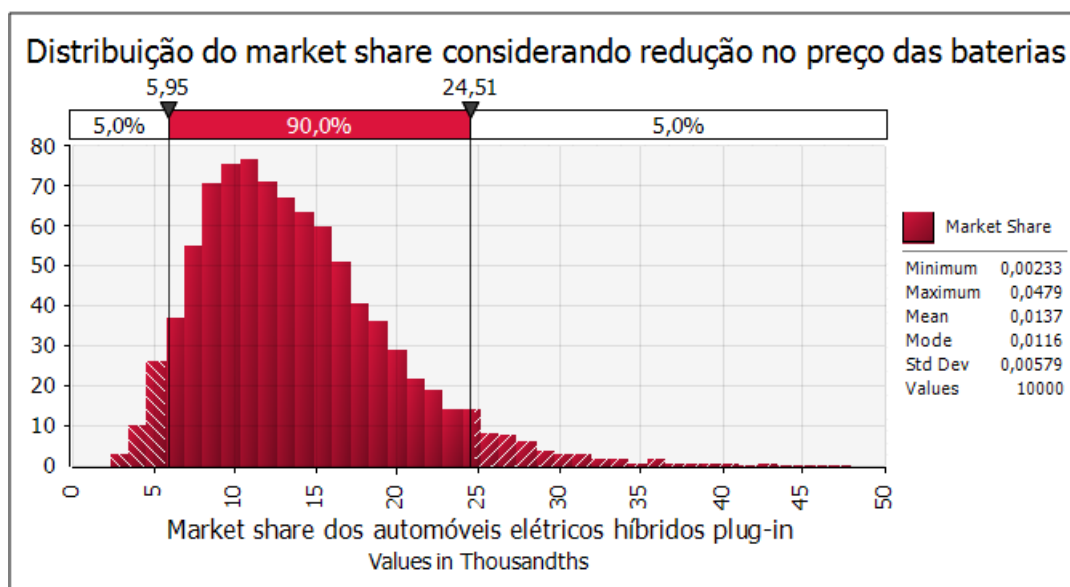


Gráfico 6.2: Distribuição do market share dos automóveis elétricos híbridos plug-in no Brasil considerando redução no preço das baterias

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando os resultados do gráfico 6.2, que simboliza o *market share* considerando redução nos preços das baterias, nota-se que o valor médio do *market share*, que é 0,0137 (1,37%), aumentou 514% em relação ao valor médio obtido no cenário-base, que é 0,223%. Os valores-limite considerando 90% de probabilidade de ocorrência são 0,00595 (0,595%) e 0,02451 (2,451%). Em outras palavras, é possível afirmar, com 90% de probabilidade, que o número de automóveis elétricos híbridos *plug-in* que seriam potencialmente comercializados anualmente estaria entre 13.048 (0,595% de *market share*) e 53.750 (2,451% de *market share*), sendo que o número médio de veículos comercializados seria 30.044 (1,37% de *market share*).

Esses resultados não deixam dúvidas de que o *market share* dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* é extremamente sensível em relação ao preço das baterias.

7. Considerações finais e conclusões

Este capítulo possui quatro objetivos. O primeiro é descrever sucintamente a infraestrutura necessária para que os automóveis elétricos possam tornar-se viáveis. O segundo consiste em analisar os resultados obtidos no cenário-base e também através das análises de sensibilidade. O terceiro compreende uma conclusão final sobre o trabalho. O quarto reside em sugerir futuros estudos no mesmo campo de pesquisa.

7.1 Infra-estrutura

Como foi dito no capítulo 4, a idéia por trás dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* é que o motorista utilize o veículo durante o dia e recarregue a bateria durante a noite, na rede elétrica de sua própria residência. Entretanto, essa é apenas uma das possibilidades de recarga da bateria. A revista *Época* aponta os principais requerimentos para que os automóveis elétricos possam transformar-se em uma solução factível. São eles:

i) Infra-estrutura em casa

Para que os consumidores possam recarregar as baterias de seus automóveis em suas casas é necessário que as garagens possuam tomadas conectadas à rede elétrica próximas à vaga em que o veículo está estacionado.

ii) Postos de recarga

Seria interessante existir postos com equipamentos de alta voltagem, de maneira que o motorista pudesse reabastecer seu automóvel elétrico em cerca de 15 a 30 minutos, tempo esse bem menor do que as 8 horas necessárias para recarregar a bateria do Chevrolet Volt quando conectado a uma rede de 120V.

iii) Postos de troca

Uma empresa chamada Better Place vislumbra um serviço de reposição de bateria que possa ser executado em pouco tempo (cerca de 70 segundos). Esse serviço seria

oferecido num posto de troca. Seria possível trocar uma bateria descarregada por outra com carga.

iv) Recarga durante o trabalho

O proprietário de um veículo elétrico poderia recarregar a bateria do automóvel durante o expediente, momento em que o carro fica estacionado na garagem do escritório. Para tal, tomadas de recarga seriam imprescindíveis.

v) Estacionamentos

Seria interessante que os estacionamentos oferecessem serviços de recarregamento das baterias, mediante cobrança de um valor adicional.

A revista *Época* enfatiza que para haver uma real redução na emissão de poluentes, é necessário que a maior parte da energia utilizada nos automóveis elétricos seja obtida através de fontes limpas, entre elas a hidrelétrica, a nuclear, a solar e a eólica. De nada adiantaria eliminar a emissão de poluentes pelos automóveis elétricos caso a cadeia de geração de energia elétrica fosse composta por fontes emissoras de poluentes.

No que tange à capacidade da rede elétrica, a revista *Época* cita um estudo feito pela PricewaterhouseCoopers que diz que, caso 20% da frota fosse elétrica, o consumo de energia no Brasil cresceria 3%, o que não demandaria aumentos de capacidade na rede de distribuição.

7.2 Análise dos resultados

Ao final do capítulo 5, conclui-se que o *market share* teórico dos automóveis elétricos híbridos *plug-in* no Brasil se encontra, com 90% de probabilidade, entre 0,070% e 0,459%. Esses números indicam que o mercado em análise é muito pequeno. Isso significa que, se automóveis elétricos híbridos *plug-in* estivessem disponíveis no Brasil, pouquíssimos consumidores estariam dispostos a comprá-los. Os valores percentuais acima mencionados, quando aplicados aos dados de vendas de automóveis no ano de 2008, mostram que o número de veículos elétricos da categoria em estudo que seriam comercializados anualmente estaria

entre 1.535 e 10.066, com 90% de probabilidade, sendo que, em média, o valor seria de cerca de 5.000 automóveis.

A primeira etapa da análise de sensibilidade mostrou que variações nos valores da variável de investimento adicional para se adquirir um automóvel elétrico híbrido *plug-in*, exercem altíssimo impacto no *market share* potencial dos automóveis elétricos híbridos *plug-in*. A simulação de incentivos do governo na forma de créditos fiscais mostrou que o valor médio do *market share* aumentou para cerca de 1%, o que representa um aumento de 322% em relação ao valor médio do cenário-base. O resultado da simulação de reduções nos preços das baterias indica um aumento no *market share* médio ainda maior, aumento este de 514% em relação ao cenário base, gerando um *market share* médio de cerca de 1,5%.

Esses resultados mostram o quão importante é o papel do governo para que os automóveis elétricos possam ser viáveis. Além disso, os resultados mostram que os automóveis elétricos se tornarão cada vez mais interessantes à medida que a tecnologia envolvida na produção de baterias evoluir, acarretando diminuição nos preços.

7.3 Conclusão final

Este trabalho consistiu no desenvolvimento e na aplicação de um modelo de simulação estocástico para se determinar o potencial de uma categoria específica de veículos elétricos no Brasil: os automóveis elétricos híbridos *plug-in*. O modelo indicou que o *market share* potencial destes automóveis no Brasil é bastante restrito, considerando os dados da conjuntura atual. É importante dizer que o modelo em questão pode ser utilizado para gerar uma nova distribuição de probabilidades caso os valores das variáveis se alterem. Algumas dessas alterações foram simuladas através de análises de sensibilidade. Entretanto, novas análises deste tipo podem ser realizadas caso se deseje.

Outra observação pertinente é que o problema estudado neste trabalho envolve variáveis cujo comportamento não é completamente conhecido. A mais incerta é o investimento adicional para se adquirir um automóvel elétrico híbrido *plug-in*. O motivo principal da incerteza é a escassez de opções de modelos deste tipo de veículo. Além disso, não se sabe qual será o posicionamento do governo em relação à promoção dos automóveis

elétricos, nem como se comportará o preço das baterias utilizadas nestes veículos. Esse tipo de situação de ausência de dados é comum quando se estuda a viabilidade de tecnologias muito recentes.

Por último, deve-se dizer que algumas variáveis foram desconsideradas da análise para simplificar o problema. Entre elas, pode-se destacar os custos de manutenção, os valores residuais e as preferências do consumidor. Não obstante, acredita-se que o modelo utilizado neste estudo inclui as principais variáveis e possui um nível de detalhe bastante elevado, de forma que se assume que os resultados obtidos são bastante realistas.

7.4 Sugestões para futuros trabalhos

Seguem abaixo algumas opções de temas a serem estudados em outros trabalhos.

- **Análise de mercado de outras categorias de veículos elétricos**

Neste estudo analisou-se o potencial de mercado de uma única categoria de veículos elétricos, que são os automóveis elétricos híbridos *plug-in*. Essa análise poderia ser complementada por análises de viabilidade de outras categorias de veículos elétricos, como os automóveis elétricos movidos exclusivamente à bateria e os automóveis elétricos híbridos tradicionais.

- **Evolução da penetração dos automóveis elétricos**

O presente estudo apontou o mercado potencial de automóveis elétricos híbridos *plug-in* num horizonte de curto prazo. Adicionalmente seria interessante avaliar qual seria a curva de penetração destes veículos e também qual seria o mercado potencial num futuro mais distante.

REFERÊNCIAS

Referências bibliográficas

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L. **Discrete-event system simulation**. 2. ed., Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1996. 548 p.

FIGUEIREDO, S. A. M. **Emissão veicular de gases de efeito estufa devida ao tipo de combustível**. 17º Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva SIMEA, 2008, São Paulo. 2008.

JOBIN, P. et al. **Electric Vehicles – Back to the future**. Credit Suisse, 1 out. 2009

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 2. ed. New York: Mcgraw-Hill, 1991. 759 p.

MANSUR, A. Carro elétrico: você ainda vai ter um. **Época**, nº 598, p.70-78, 2 nov. 2009.

NAYLOR, T. H. et al. **Técnicas de simulação em computadores**. Petrópolis: Vozes: Editora da Universidade de São Paulo, 1971. 402 p.

NETO, A. A. **Finanças corporativas e valor**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2006. 656 p.

TORRES, O. F. F. **Fundamentos da engenharia econômica e da análise econômica de projetos**. São Paulo: Thomson Learning, 2006. 145 p.

WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms**. 4. ed. Australia; Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole, 2004. 1418 p.

Páginas da internet

ALMEIDA, D. F. G1 andou no Volkswagen Novo Gol. **Globo**, 1 jul. 2008. Disponível em: <http://g1.globo.com/Noticias/Carros/0,,MUL631162-9658,00-G+ANDOU+NO+VOLKSWAGEN+NOVO+GOL.html>> Acesso em: 10 jul. 2009.

ANEEL. **Tarifas médias por classe de consumo / região (R\$/MWh)** Disponível em: http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD?%2fSAD_REPORTS%2fSAMP_TarifaMedCConsumoRegiao&rs:Command=Render> Acesso em: 22 jul. 2009.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. 2009. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuario.html>> Acesso em: 14 jul. 2009.

_____. **Carta da Anfavea**. 2009. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/carta.html>> Acesso em: 13 jul. 2009.

ANP. **Levantamento de preços**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/>> Acesso em: 22 jul. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Disponível em: <http://www.abve.org.br>> Acesso em: 29 jun. 2009.

AUTOZINE. **Chevrolet Volt**, 16 set. 2008. Disponível em: <http://autozine.com.br/lancamento/chevrolet-volt>> Acesso em 1 jul. 2009.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de Câmbio**. 2009. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao&id=txcotacao>> Acesso em 14 jul. 2009.

BC reduz a taxa Selic para 8,75% ao ano. **Veja**, 22 jul. 2009. Disponível em: <http://veja.abril.com.br/noticia/economia/bc-reduz-taxa-selic-8-75-ao-ano-486302.shtml>> Acesso em: 27 ago. 2009.

Best Cars. **Uol**. Disponível em: www2.uol.com.br/bestcars/comp2/5sedas-10.htm> Acesso em: 10 jul. 2009.

_____. **Uol**. Disponível em: <<http://www2.uol.com.br/bestcars/comp2/vectra-accord-8.htm>> Acesso em: 10 jul. 2009.

CHEVROLET. **Chevy Volt: the future is electrifying**. Disponível em: <<http://www.chevrolet.com/pages/open/default/future/volt.do>> Acesso em: 20 jul. 2009.

Chevrolet Celta e Classic ganham novo motor e alterações leves!. **Motor Clube**. Disponível em: <<http://www.motorclube.com.br/materias/chevrolet-celta-e-classic-ganham-novo-motor-e-alteracoes-leves.aspx>> Acesso em: 10 jul. 2009.

Chevrolet lança o Astra 2009 – Única novidade é motor 2.0 Flex de 140 cv. **Carplace**, 20 mar. 2009. Disponível em: <<http://carplace.virgula.uol.com.br/chevrolet-lanca-o-astra-2009-unica-novidade-e-motor-20-flexpower-de-140-cavalos/>> Acesso em: 10 jul. 2009.

Corsa 1.4 supera carros 1.0 em economia! **Motor Clube**, 5 dez. 2008. Disponível em: <<http://www.motorclube.com.br/materias/corsa-1.4-supera-carros-1.0-em-economia.aspx>> Acesso em: 10 jul. 2009.

Corsa Flexpower 1.8 chega por R\$ 25.947. **Carsale**, 25 mar. 2003. Disponível em: <<http://ssl.carsale.com.br/noticias/ed101not867.shtml>> Acesso em: 13 jul. 2009.

DECLOEDT, C.. Petróleo renova recorde e supera US\$ 147 o barril. **Exame**, 11 jul. 2008. Disponível em: <<http://portalexame.abril.com.br/ae/financas/m0163987.html>> Acesso em: 15 jul. 2009.

DENATRAN. **Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação**. 2009. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>> Acesso em: 22 jun. 2009.

ESCANHOLA, M. Ka e Mille fazem duelo dos mais baratos do Brasil. **Carsale**, 11, jan. 2008. Disponível em: <http://carsale.uol.com.br/opapoecarro/testes/teste_080111.shtml> Acesso em: 10 jul. 2009.

GM. **Chevy Volt Specs**. Disponível em: <<http://gm-volt.com/full-specifications/>> Acesso: em 1 jul. 2009.

_____. **Chevy Volt FAQs.** Disponível em: <<http://gm-volt.com/chevy-volt-faqs/>> Acesso em: 13 mai. 2009.

_____. **Chevrolet Volt Leads General Motors Into Its Second Century.** Disponível em: <http://www.gm.com/experience/technology/news/2008/volt_092908.jsp> Acesso em: 13 mai. 2009.

HOWSTUFFWORKS. **Como funcionam os carros híbridos.** Disponível em: <<http://carros.hsw.uol.com.br/carros-hibridos1.htm>> Acesso em: 28 jul. 2009.

_____. **Consumer guide automotive.** Disponível em: <<http://consumerguideauto.howstuffworks.com/2011-chevrolet-volt3.htm>> Acesso em: 26 ago. 2009.

MAYNARD, M. G.M.'s Latest Great Green Hope Is a Tall Order. **The New York Times**, 21 nov. 2008. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2008/11/22/business/22volt.html>> Acesso em: 3 ago. 2009

Nissan Tiida com motor 1.8 Flex a partir de R\$ 51.890. **Carrosnaweb**, 16 abr. 2009. Disponível em: <<http://www.carrosnaweb.com.br/noticias.asp?CodNoticia=255>> Acesso em: 15 jul. 2009.

Novo Fiat Palio Fire Flex 2009 – motor, desempenho, consumo e preço. **Carro Bonito**, 4 dez. 2008. Disponível em: <<http://www.carrobonito.com/2008/12/04/novo-palio-fire-flex-2009-motor-desempenho-consumo-e-preco/>> Acesso em: 10 jul. 2009.

OLIVEIRA, M. Governo anuncia prorrogação de redução do IPI para compra de carros novos. **Globo**, 30 mar. 2009. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Carros/0,,MUL1064372-9658,00-GOVERNO+ANUNCIA+PRORROGACAO+DE+REDUCAO+DO+IPI+PARA+COMPRA+DE+CARROS+NOVOS.html>> Acesso em: 15 jul. 2009.

Purchasers of plug-in cars will get tax credits. **MSNBC**, 30 out. 2008. Disponível em: <<http://www.msnbc.msn.com/id/27462414/>> Acesso em: 3 ago. 2009.

RUFFO, G. H. Fisker Karma propõe luxo e desempenho responsáveis. **Webmotors**, 15 jan. 2008. Disponível em: <http://www.webmotors.com.br/wmpublicador/Tuning_Conteudo.vxlpub?hnid=38838> Acesso em 1 nov. 2009.

SALGADO, J. G. Equipamentos: Chevrolet Prisma. **Auto Review**, 28 jan. 2009. Disponível em: <<http://www.autoreview.com.br/modules/news/article.php?storyid=86>> Acesso em: 10 jul. 2009.

SINCOPEÇAS. **Idade média da frota brasileira é de 9 anos**, 14 fev. 2008. Disponível em: <<http://www.sincopecas.org.br/noticias/?COD=1728>> Acesso em: 17 jun. 2009.

TEIXEIRA, M. C. Venda de automóveis bate recorde no último mês de IPI isento. **O Estado de São Paulo**, 1 out. 2009. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/economia,venda-de-automoveis-bate-recorde-no-ultimo-mes-de-ipi-isento,444198,0.htm>> Acesso em: 15 out. 2009.

THE ULTIMATE RENAISSANCE. **Chevrolet Volt: The next wonder car**. Disponível em: <<http://theultimaterenaissance.wordpress.com/2009/01/04/chevrolet-volt-wonder-car/>> Acesso em: 20 jul. 2009.

TOYOTA. **Worldwide Prius Sales Top 1 Million Mark**, 15 mar. 2008. Disponível em: <<http://www.toyota.co.jp/en/news/08/0515.html>> Acesso em 29 jun. 2009.

WEBMOTORS. **Busca avançada**. 2009. Disponível em: <<http://www.webmotors.com.br/Webmotors/ssCompra/pgBuscaNovosAvancada/pgBuscaNovosAvancada.aspx?uf=&descrModelo=A10&precoinicial=&modelo=2079&marca=2&precofinal=>>> Acesso em: 17 jun. 2009.