



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO

RENATO ROSENBLUTH

**METODOLOGIA PARA GESTÃO, RENOVAÇÃO E ANÁLISE DE EMISSÕES DE  
VIATURAS: estudo de caso na Polícia Federal**

Recife

2019

RENATO ROSENBLUTH

**METODOLOGIA PARA GESTÃO, RENOVAÇÃO E ANÁLISE DE EMISSÕES DE  
VIATURAS: Estudo de Caso na Polícia Federal**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Área de concentração:** Pesquisa Operacional.

**Orientadora:** Profa. Dra. Isis Didier Lins.

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

R813m Rosenbluth, Renato.  
Metodologia para gestão, renovação e análise de emissões de viaturas: estudo de caso na Polícia Federal / Renato Rosenbluth. – 2019.  
98 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Isis Didier Lins.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção, 2019.

Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Modelo de substituição. 3. Custo equivalente anual. 4. Gestão de frota. 5. Emissões veiculares. I. Lins, Isis Didier. (Orientadora). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-411

RENATO ROSENBLUTH

**METODOLOGIA PARA GESTÃO, RENOVAÇÃO E ANÁLISE DE EMISSÕES DE  
VIATURAS: Estudo de Caso na Polícia Federal**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 31 / 07 / 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Isis Didier Lins (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Paulo Renato Alves Firmino (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Cariri

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, principalmente minha esposa Moema, que me apoiou nos melhores e nos piores momentos dessa jornada e minha filha Clara que sempre me perguntava quando eu ia acabar de estudar para poder brincar com ela.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ísis Didier e a toda equipe de professores do PPGEP/UFPE pela dedicação, profissionalismo e ensinamentos ministrados durante todo o período do Mestrado Profissional.

À Polícia Federal que proporcionou esta oportunidade e aos colegas da CGPLAM/DLOG/PF pelo incentivo e compreensão em todas as etapas deste processo.

Um agradecimento especial a todos os colegas da turma da PF de Mestrado Profissional, o grupo mais colaborativo e generoso com quem tive a oportunidade de conviver em 12 anos de serviço público.

## RESUMO

A Polícia Federal está implementando uma política de substituição e renovação da sua frota de veículos com objetivo de minimizar seus custos e aumentar sua eficiência. Para tanto, este trabalho apresenta um diagnóstico da frota e quais parâmetros influenciam nos custos operacionais (de manutenção e abastecimento) dos veículos. Esse diagnóstico indica uma alta dispersão das variáveis consideradas para caracterização dos veículos (por exemplo, preço do combustível, qualidade das estradas, intensidade de uso, entre outras), o que configura a necessidade de classificar os estados brasileiros em grupos com características similares, por meio de análise de agrupamentos, para simplificar a gestão da frota e o planejamento de substituição dos veículos. Além disso, são mensurados os impactos ambientais e econômicos das emissões de gases poluentes dos veículos da instituição e, para cada grupo de estados, são obtidos os períodos de substituição que minimizam os custos equivalentes anuais. Ainda, a partir da definição dos melhores indicadores que representam a situação da frota, é realizada uma análise de componentes principais para ordenação dos veículos, com o propósito de identificar os que apresentam as piores condições dentro de cada grupo de estados visando à prioridade na substituição. Os resultados encontrados sugerem uma revisão da política de renovação de veículos planejada.

Palavras-chave: Modelo de substituição. Custo equivalente anual. Gestão de frota. Emissões veiculares.

## **ABSTRACT**

The Brazilian Federal Police is implementing a policy of replacing and renewing its fleet of vehicles in order to minimize costs and increase efficiency. For this, this work presents a diagnosis of the fleet and which parameters influence the expenses with maintenance and operation of the vehicles. This diagnosis indicates a high dispersion of the data of the vehicles configuring the necessity of a division of the states into groups with similar characteristics (fuel price, road quality and intensity of use, among others) to simplify the planning. In addition, the equipment replacement period that minimizes annual equivalent costs and the environmental and economic impacts of emissions of pollutant gases from the institution's vehicles is measured. Finally, through the definition of the best indicators that represent the situation of the fleet, an ordering method is presented that prioritizes the vehicles with the worst conditions within each group of states aiming at replacing those with higher scores. The findings suggest a review of the planned vehicle replacement policy.

**Keywords:** Replacement model. Equivalent annual cost. Fleet management. Vehicle emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Intervalo ótimo de substituição.....	21
Figura 2 - LCA de veículos e combustíveis .....	25
Figura 3 - A Abordagem da Via de Impacto .....	26
Figura 4 - Densidade demográfica do Brasil .....	28
Figura 5 – Preços em iniciativas implementadas de Crédito Carbono .....	30
Figura 6 - Esquema com os fatores que afetam o consumo de combustível .....	31
Figura 7 - Frequência dos veículos por idade (em anos).....	43
Figura 8 - Gráfico de pontos com a situação atual de veículos da PF.....	45
Figura 9 - Gráfico de setores com a proporção dos tipos de veículos da PF.....	46
Figura 10 - Relação entre os tipos de veículos e o ano de fabricação .....	46
Figura 11 - Proporção de veículos da PF por fase do Proconve.....	52
Figura 12 - Emissões de CO2 por tipo de veículo .....	54
Figura 13 - Emissões de CO2 por tipo de combustível .....	54
Figura 14 - Emissões de poluentes por tipo de combustível .....	55
Figura 15 - Esquema da metodologia aplicada.....	56
Figura 16 - Preços médios dos combustíveis por estado .....	58
Figura 17 - Comparação do rendimento da frota com a referência .....	61
Figura 18 - Comparação da intensidade de uso da frota com a referência.....	62
Figura 19 – Análise dos Resíduos .....	68
Figura 20 – Gráficos dos resíduos contra cada preditor .....	68
Figura 21 – Teste de normalidade da Regressão .....	69
Figura 22 - Boxplot dos custos totais .....	71
Figura 23 - Dendrograma Preço combustível x Estradas x Intensidade de Uso.....	73
Figura 24 - Divisão dos estados em grupos .....	74
Figura 25 - EAC das Caminhonetes .....	76
Figura 26 - EAC dos Sedans.....	79
Figura 27 - Gráficos de escores - Grupo 1 .....	84
Figura 28 - Gráficos de escores - Grupo 2 .....	87
Figura 29 - Gráficos de escores - Grupo 3 .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custos das emissões nos centros urbanos europeus .....	27
Tabela 2 - Limites máximos de emissões dos poluentes por fase .....	34
Tabela 3 - Sumário dos trabalhos apresentados na Revisão de Literatura .....	39
Tabela 4 - Tipos de propriedade e identificação.....	47
Tabela 5 - Estatísticas Descritivas dos Veículos por tipo.....	47
Tabela 6 - Situação das estradas por estado .....	49
Tabela 7 - Substituição gradual dos veículos movidos a combustão .....	52
Tabela 8 - Fator de emissão de CO <sub>2</sub> por combustível.....	53
Tabela 9 - Relação Efetivo/Frota por estado .....	62
Tabela 10 - Estimação do modelo .....	67
Tabela 11 – Variáveis utilizadas no cálculo do EAC das Caminhonetes.....	75
Tabela 12 - Variáveis utilizadas no cálculo do EAC dos Sedans.....	77
Tabela 13 - Custos das emissões .....	80
Tabela 14 - Emissões em toneladas de CO <sub>2</sub> .....	81
Tabela 15 – Autoanálise da Matriz de Correlação do Grupo 1 .....	83
Tabela 16 – Ranking dos 20 piores veículos do Grupo 1 .....	85
Tabela 17 - Autoanálise da Matriz de Correlação do Grupo 2.....	86
Tabela 18 – Ranking dos 20 piores veículos do Grupo 2.....	88
Tabela 19 - Autoanálise da Matriz de Correlação do Grupo 3.....	88
Tabela 20 – Ranking dos 20 piores veículos do Grupo 3.....	91

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Modelo de regressão linear .....	35
Equação 2 - Distância Euclidiana entre os elementos $X_l$ e $X_k$ .....	37
Equação 3 - J-ésima componente principal da matriz $P_{p \times p}$ .....	38
Equação 4 - Custo Equivalente Anual .....	63
Equação 5 - Fator de Desconto.....	64
Equação 6 - Consumo Anual de Combustível.....	64
Equação 7 - Total de Emissões de $CO_2$ .....	64
Equação 8 - Custo Total de Emissões de poluentes.....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

$d( X_l , X_k )$	Distância Euclidiana entre os elementos $X_l$ e $X_k$
$\mu_i$	Valor Esperado de $X_i$
$\sigma_i$	Variância de $X_i$
$\lambda_p$	Autovalor da matriz $P_{p \times p}$
$e_p$	Autovetor normalizado da matriz $P_{p \times p}$
$Z_i$	Variável normalizada da matriz $P_{p \times p}$
$\beta_k$	Coefficiente do modelo de regressão para $k$ preditores
$\varepsilon$	Erro aleatório do modelo de regressão

## LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CTM	Custo Total Médio
CV	Coefficiente de Variação
DALY	<i>Disability Adjusted Life Years</i>
DLOG	Diretoria de Administração e Logística Policial
EAC	<i>Equivalent Annual Cost</i>
ETS	<i>Emission Trading Scheme</i>
FIPE	Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCCA	<i>Life Cycle Cost Analysis</i>
MP	Material Particulado
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
NMHC	Hidrocarbonetos Não-Metano
PAAV	Plano Anual de Aquisição de Veículos
PC1	Primeiro Componente Principal
PC2	Segundo Componente Principal
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PF	Polícia Federal
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa
SISVIA	Sistema Informatizado de Controle de Viaturas
TBL	<i>Triple Bottom Line</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	17
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>18</b>
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
2.1	SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS .....	20
2.2	SUSTENTABILIDADE.....	22
2.3	CRITÉRIOS ECONÔMICOS EM MODELOS DE SUBSTITUIÇÃO DE VEÍCULOS .....	22
2.4	CRITÉRIOS AMBIENTAIS EM MODELOS DE SUBSTITUIÇÃO DE VEÍCULOS.....	24
<b>2.4.1</b>	<b>Custos Ambientais .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Proconve.....</b>	<b>31</b>
2.5	ANÁLISE DE REGRESSÃO .....	34
2.6	MÉTODOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS .....	36
<b>2.6.1</b>	<b>Análise de Agrupamentos.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Análise de Componentes Principais .....</b>	<b>38</b>
2.7	SUMÁRIO DAS PESQUISAS APRESENTADAS .....	39
<b>3</b>	<b>DIAGNÓSTICO DA FROTA .....</b>	<b>43</b>
3.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	43
3.2	SITUAÇÃO DA FROTA.....	45
3.3	QUALIDADE DAS ESTRADAS .....	48
3.4	SUSTENTABILIDADE NA POLÍCIA FEDERAL.....	50
3.5	QUESTÃO AMBIENTAL.....	51
<b>3.5.1</b>	<b>Situação da frota de acordo com o Proconve .....</b>	<b>52</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Emissões .....</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>56</b>
4.1	COLETA E ANÁLISE DOS DADOS .....	57
<b>4.1.1</b>	<b>Custos operacionais ou Custo Total Médio (CTM) .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Custo de Revenda.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Custo de Aquisição.....</b>	<b>58</b>

<b>4.1.4</b>	<b>Preço médio do combustível por estado.....</b>	<b>58</b>
4.2	DEFINIÇÃO DOS INDICADORES .....	59
<b>4.2.1</b>	<b>Indicadores econômicos/logísticos .....</b>	<b>60</b>
4.2.1.1	Rendimento.....	60
4.2.1.2	Intensidade de uso (Km/ano).....	61
4.2.1.3	Relação Efetivo por Frota de veículos.....	62
4.2.1.4	Custo Equivalente Anual (EAC) .....	63
<b>4.2.2</b>	<b>Indicadores ambientais.....</b>	<b>64</b>
4.2.2.1	Estimativa das emissões de CO <sub>2</sub> do ciclo de vida dos carros.....	64
4.2.2.2	Emissões dos demais poluentes.....	65
4.2.2.3	Custos ambientais.....	65
4.2.2.3.1	<i>Metodologia ExternE</i> .....	65
4.2.2.3.2	<i>Crédito Carbono</i> .....	66
4.3	ANÁLISE PRELIMINAR.....	66
<b>4.3.1</b>	<b>Análise da Regressão .....</b>	<b>66</b>
4.4	APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA.....	70
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>71</b>
5.1	CONTEXTO DA POLÍCIA FEDERAL.....	71
5.2	ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS.....	72
5.3	RESULTADOS .....	74
<b>5.3.1</b>	<b>Custos Equivalentes Anuais .....</b>	<b>75</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Custos ambientais .....</b>	<b>80</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Ordenação dos veículos pela Análise dos Componentes Principais .....</b>	<b>82</b>
5.3.3.1	Resultados - Grupo 1 .....	83
5.3.3.2	Resultados - Grupo 2 .....	86
5.3.3.3	Resultados - Grupo 3 .....	88
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
6.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	93
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Polícia Federal (PF), instituída por lei como órgão permanente de Estado, organizado e mantido pela União, integrante da estrutura básica do Ministério da Justiça e da Segurança Pública, tem por finalidade exercer as competências previstas no § 1º do art. 144 da Constituição, e demais dispositivos legais e regulamentares pertinentes, e destina-se a apurar infrações penais contra a ordem política e social, praticadas em detrimento de bens, serviços e interesses da União ou de suas entidades autárquicas e empresas públicas e cuja prática tenha repercussão interestadual ou internacional e exija repressão uniforme, segundo se dispuser em lei. Além disso, destina-se a prevenir e reprimir o tráfico ilícito de entorpecentes e drogas afins e o contrabando e o descaminho, sem prejuízo da ação fazendária e de outros órgãos públicos nas respectivas áreas de competência além de exercer as funções de polícia marítima, aeroportuária e de fronteiras e as funções de polícia judiciária da União com exclusividade.

A PF tem atuação em todo o território nacional exercendo com exclusividade as funções de polícia judiciária (CF, 1988) além de funções administrativas como emissão de passaportes e controle de armas e de produtos químicos. A logística do órgão para cumprir tais atribuições e equipar um efetivo de mais de 11.000 policiais além dos demais servidores administrativos e terceirizados se torna bastante complexa.

Em relação à gestão de veículos da instituição, a frota conta com mais de sete mil veículos e estão efetivamente em operação aproximadamente 6.500 ativos de diferentes tipos e modelos para atendimento a diversas necessidades. Atualmente, está em fase de implementação uma política de renovação da frota, com a alienação dos equipamentos irrecuperáveis ou antieconômicos, ou seja, as sucatas ou aqueles que demandam altos custos de manutenção e combustível devido à idade avançada e/ou à utilização excessiva. Esse processo é realizado por meio de leilões periódicos e a instituição tem conseguido recursos através do desfazimento desses veículos. Os recursos adquiridos com os leilões desde 2015 foram de mais de 16 milhões de reais com mais de mil veículos alienados.

A legislação federal atual exige critérios objetivos para subsidiar o planejamento de aquisições/substituição da frota com a elaboração do Plano Anual de Aquisição de Veículos (PAAV). A Polícia Federal, contudo, apresenta peculiaridades que dificultam esse processo pois existem variantes entre os tipos de veículos e suas finalidades e as regiões onde circulam.

A Diretoria de Administração e Logística Policial - DLOG é responsável pela elaboração do PAAV que selecionará os veículos em condições de substituição por meio de um sistema informatizado de controle de viaturas (Sisvia) implantado em meados de 2017, que é alimentado pelos gestores responsáveis pelo gerenciamento da frota nos estados com todas as informações dos veículos, incluindo a quilometragem rodada e os custos de manutenção e de combustível. Em um primeiro momento, foi estabelecido que o veículo estará apto a ser substituído a partir de 5 anos da data de fabricação, 100.000 quilômetros rodados ou custo de manutenção superior a 50% do valor do equipamento, o que ocorrer primeiro.

Neste contexto, torna-se relevante a criação de metodologia, com base em ferramentas de análise e manipulação de dados, para subsidiar as decisões de substituição da frota utilizando as informações de campo disponíveis no Sisvia e levando em consideração não somente os custos, mas também questões logísticas e ambientais. Os aspectos logísticos envolvem o número de servidores de determinada unidade, a área geográfica do estado ou região atendida, o tipo de utilização do veículo (operacional ou administrativa), além da qualidade das estradas onde esses equipamentos são utilizados.

Uma técnica bastante utilizada na substituição de equipamentos leva em consideração o conceito de vida econômica ou idade ótima de substituição. Segundo Jardine & Tsang (2013), vida econômica é o tempo em que o custo total, em termos do Custo Equivalente Anual (*Equivalent Annual Cost - EAC*) atinge seu valor mínimo. Existem duas classes de problema que utilizam esta técnica: a primeira considera a vida econômica dos veículos sendo utilizada constantemente cada ano e, na segunda, a utilização varia de acordo com a idade dos equipamentos.

As questões ambientais, por sua vez, ganharam bastante relevância nos últimos anos, principalmente em países como Estados Unidos, Reino Unido, China, França e Japão, entre outros, onde programas de incentivo à substituição de veículos antigos por novos mais eficientes e menos poluentes já são uma realidade. Segundo Kagawa *et al* (2013), em razão da crise econômica global, a partir de 2009, programas como o “*Car Allowance Rebate System Program*” nos Estados Unidos e o “*Scrappage Scheme*” na Inglaterra visavam estimular a economia ao mesmo tempo que tentavam reduzir as emissões dos gases do efeito estufa com a substituição de veículos antigos por outros mais eficientes. Anteriormente, Lin *et al* (2008) já

havam estudado a eficácia de um programa similar no âmbito das organizações governamentais em uma agência local do Illinois, Estados Unidos.

A emissão de gases do efeito estufa leva às mudanças climáticas globais, o que tem impacto negativo na vida das pessoas sendo sua redução uma das prioridades mundiais visando à sustentabilidade. Segundo Jardine & Tsang (2013), a sustentabilidade é um conceito que exige que todos os desenvolvimentos sejam sustentáveis, no sentido de que “atendem às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades” (Brundtland Commission Report 1987).

Existem três pilares de sustentabilidade que representam demandas ambientais, sociais e econômicas; estes também são conhecidos como modelo das linhas inferiores triplas (*Triple Bottom Line* - TBL). A sustentabilidade está ganhando importância no ambiente de negócios atual. Regulamentos, consciência social e responsabilidade, padrões e cidadania corporativa são algumas das muitas forças que estão levando as empresas e os governos a se tornarem mais sustentáveis (Jardine & Tsang, 2013).

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa (SEEG), o Brasil se comprometeu no Acordo do Clima de Paris a reduzir suas emissões em 37% até 2015 em relação a 2005 e indicou redução de 43% em 2030 em relação ao mesmo ano.

Além de marcar o início da implementação da chamada Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil (NDC), 2020 também é o ano em que expira o prazo para o cumprimento das metas inscritas na Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei 12.187/2009). A lei determina que o país reduza suas emissões de 36,1% a 38,9% em relação a um cenário tendencial. Este relatório mostra que a tendência atual das emissões de gases de efeito estufa do Brasil e da governança climática nacional apontam na direção oposta à do cumprimento das metas e por esse tema ser de extrema relevância atualmente, um modelo será utilizado para calcular os impactos tanto econômicos como ambientais na frota da PF.

Neste trabalho, busca-se elaborar métodos para determinar o momento ótimo de substituição de frota considerando os aspectos logísticos e ambientais comentados anteriormente e aplicado ao contexto da PF. Para isso, as especificidades relativas ao uso dos veículos e os dados do Sisvia serão utilizados na determinação das políticas ótimas de substituição.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização de veículos dos mais diversos modelos é essencial para as atividades realizadas pela PF, seja no seu papel de polícia judiciária, seja no âmbito de suas atividades administrativas. Atualmente, a política de substituição empregada se baseia em condições normais de operação sugeridas pelos fabricantes. Contudo, a atuação policial, na maioria das vezes, acontece em áreas rurais com estradas em péssima situação, o que exige mais de suas viaturas. Por outro lado, tarefas administrativas que exigem menos dos automóveis também fazem parte das atribuições do órgão.

A definição da vida econômica da frota de viaturas e o momento ideal de substituição subsidiarão um planejamento a longo prazo dos recursos orçamentários voltados para a aquisição de veículos além da definição de uma política de renovação que trará benefícios tanto econômicos quanto ambientais para a instituição. Além disso, os impactos nos custos operacionais em razão da situação das estradas e da utilização dos veículos na atividade policial não foram amplamente estudados.

Por esse motivo, a partir da pesquisa de modelos já estudados na literatura tais como Davenport *et al.* (2005) com um modelo de regressão, Giordano *et al.* (2018) que aplicou o método dos custos equivalentes anuais e Onat *et al.* (2019) que utilizou a técnica da análise dos componentes principais em problemas de substituição de veículos, almeja-se encontrar subsídios para otimizar a utilização da frota e planejar o momento ideal de substituição. A intenção é alcançar uma economia considerável a médio prazo, visto que os custos de aquisição de veículos para todo o país são extremamente elevados e outras questões se tornam relevantes como o problema de emissão de gases danosos ao meio ambiente ocasionado pelos veículos com idade mais avançada.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

A finalidade da presente pesquisa é auxiliar os tomadores de decisão da instituição, no que concerne à gestão da frota de veículos, na definição do melhor momento de substituição dos ativos e na realização de um planejamento de aquisições à médio e longo prazos.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Elaborar métodos para determinação de políticas ótimas de substituição e renovação da frota de veículos da Polícia Federal, que considerem questões econômicas, logísticas e ambientais.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Investigar os modelos de substituição ótima de equipamentos existentes na literatura;
- Coletar e analisar os dados de campo para encontrar os modelos mais adequados para o caso dos veículos da PF;
- Fazer um diagnóstico da frota atual da PF através de dados como a idade dos veículos, os custos de manutenção e abastecimento, a quilometragem percorrida, o número de servidores por veículo, a área geográfica de utilização dos ativos e a situação das estradas;
- Obter indicadores que melhor representem a situação da frota em razão das diferentes utilizações dos veículos seja em relação às atividades exercidas, seja em relação à localidade;
- Mensurar os impactos ambientais da frota e os custos decorrentes;
- Criar grupos de estados com características semelhantes e desenvolver um método geral ou métodos específicos para cada um deles;
- Definir um método de ordenação dos veículos para priorizar a substituição daqueles em piores condições;
- Analisar os resultados obtidos e propor uma metodologia de renovação da frota.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho é composto de seis capítulos com esta Introdução. O Capítulo 2 contém a fundamentação teórica e o embasamento científico para o estudo assim como as definições necessárias para o desenvolvimento e compreensão do trabalho. No Capítulo 3 é realizado o diagnóstico da frota da Polícia Federal e o contexto para definição dos indicadores e

parâmetros utilizados. No Capítulo 4, define-se a metodologia proposta para atingir os objetivos do trabalho e a definição dos modelos utilizados. O Capítulo 5 contextualiza o estudo de caso e ambientação para aplicação prática dos modelos propostos, incluindo os resultados obtidos para discussões cabíveis. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo apresenta uma contextualização e alguns aspectos conceituais da área de estudo em que a presente pesquisa se baseia. São apresentadas várias abordagens e critérios no contexto da substituição de equipamentos, mais especificamente no que tange aos veículos.

### 2.1 SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS

O problema da substituição de equipamentos tem sido estudado por gestores de frota e pesquisadores há algum tempo. Várias estratégias foram desenvolvidas e a principal questão é identificar os ativos candidatos à substituição dentro de uma frota para que os custos sejam minimizados no decorrer do tempo. Um dos métodos mais intuitivos para essa identificação é definir um padrão como, por exemplo, uma idade básica do equipamento. Os ativos que excederem essa idade básica são os indicados à substituição e ordenados de acordo com sua data de fabricação.

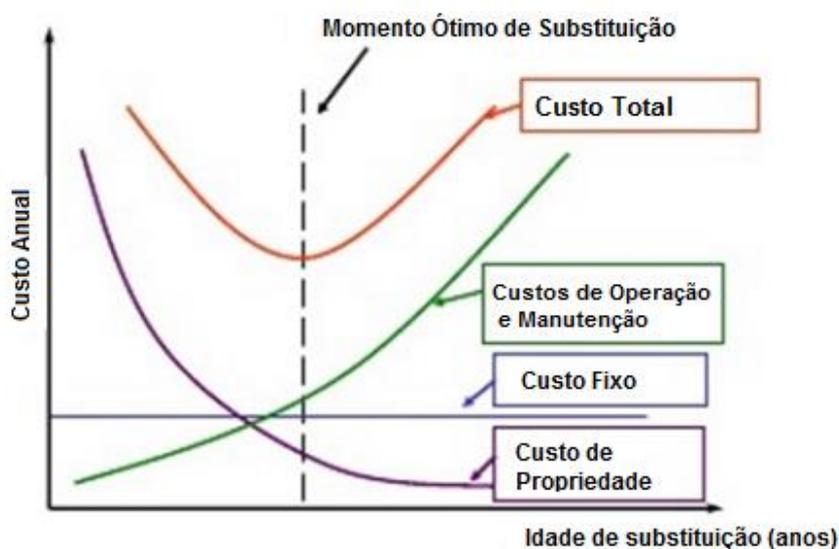
A Análise do Custo do Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost Analysis - LCCA*), bastante encontrada na literatura da Engenharia Econômica, baseia-se na idade padrão para encontrar a vida econômica ou idade ótima de substituição dos equipamentos. Como explicam Jardine & Tsang (2013), essa análise é tratada deterministicamente e considera que, conforme a idade de um item aumenta, seus custos de operação e manutenção também crescem enquanto seu valor de revenda diminui.

Segundo Jardine & Tsang (2013), com o uso, o equipamento se deteriora e essa deterioração pode ser medida por um aumento nos custos de operação e manutenção. Eventualmente, esses custos atingirão um estágio no qual se torna economicamente justificável substituir o equipamento. O que se deseja determinar é uma política de substituição ideal que minimize os custos totais derivados da operação, manutenção e descarte do equipamento por um longo período.

Neste modelo, assume-se que o equipamento será substituído por um item idêntico, retornando assim o equipamento à condição de novo após a substituição. Além disso, presume-se que as tendências nos custos após cada substituição permanecerão idênticas.

Como o equipamento está sendo operado por um longo período, a política de substituição será periódica e, portanto, o intervalo de substituição ideal será determinado. A Figura 1 apresenta as curvas dos custos considerados.

Figura 1 - Intervalo ótimo de substituição



Fonte: Jardine & Tsang (2013) – Adaptado.

Outra abordagem relevante considera o decréscimo nos níveis de utilização do equipamento à medida que ele envelhece, principalmente quando os ativos considerados são veículos. Neste caso, segundo Jardine & Tsang (2013), o modelo deve considerar o custo associado na utilização da frota para atender a uma demanda específica em vários cenários diferentes e esse custo total, além de satisfazer a demanda, deve ser minimizado.

Jardine & Tsang (2013) apresentam também dois modelos de otimização que consideram os avanços tecnológicos para horizontes de planejamento finitos e infinitos. No primeiro caso, após um período fixo o equipamento é substituído. No segundo caso, o equipamento continuará sendo utilizado e uma política de substituição periódica será requerida e será assumido que a substituição continuará sendo feita com os equipamentos mais modernos. Segundo Casarotto Filho & Kopittke (2017), esses modelos consideram o custo da obsolescência, que diferentemente da deterioração – uma característica intrínseca do ativo – é externo ao equipamento existente e está associado aos novos equipamentos lançados no mercado.

## 2.2 SUSTENTABILIDADE

O termo “sustentabilidade” foi utilizado inicialmente por Brundtland (1987) em um documento intitulado “*Our Common Future*” (Nosso Futuro Comum), também conhecido como Relatório Brundtland, designado desse modo a partir da atuação da coordenadora da Comissão Mundial para o Ambiente e o Desenvolvimento, Gro Harlem Brundtland, presidente da Noruega na época.

Foi neste trabalho da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas em Oslo a primeira ocasião em que o conceito de "desenvolvimento sustentável" foi introduzido. O conceito de desenvolvimento sustentável é expresso e definido pela referida Comissão como o “desenvolvimento dando resposta às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras darem respostas às suas próprias necessidades” (Brundtland Commission Report, 1987).

Todos os modelos de substituição apresentados visam, de alguma maneira, ao desenvolvimento sustentável em algum dos seus três pilares: ambiental, social e econômico. Segundo Rezende (2015), a preocupação com a sustentabilidade organizacional implica buscar formas de relacionamento entre as dimensões econômica, ambiental e social, em sintonia com a discussão sobre o desenvolvimento sustentável. As instituições devem possuir habilidades tecnológicas, financeiras e de gerenciamento necessárias ao desenvolvimento sustentável. Ações e inovações das organizações devem ser, cada vez mais, disseminadas na busca da ampliação da eficiência e a efetividade da sustentabilidade.

## 2.3 CRITÉRIOS ECONÔMICOS EM MODELOS DE SUBSTITUIÇÃO

Baseados na LCCA, Eilon *et al.* (1966) consideraram o custo de aquisição e manutenção e o valor de revenda para definir, através de programação não-linear, o custo médio mínimo por equipamento por ano e a política de idade ideal de uma frota de caminhões. Já Weissmann *et al.* (2003) aplicaram a programação não-linear em ativos individuais da frota do Departamento de Trânsito do Texas e seus resultados indicaram que essa abordagem combinada com um *ranking* multiatributo é mais eficiente economicamente do que a utilização de uma idade única padrão.

Outro critério de substituição bastante estudado é o custo de reparo. Algumas pesquisas indicam que políticas de limite de custo de reparos têm mais vantagens sobre políticas de limite de tempo de vida dos equipamentos. Drinkwater & Hastings (1967) estudaram esta abordagem, utilizando programação dinâmica, em veículos militares. Nakagawa & Osaki (1974), por sua vez, focaram seu trabalho no tempo de reparo em vez dos custos e aplicaram programação não-linear. O modelo define o limite de tempo que um ativo danificado gasta em medidas de reparo. O limite de tempo de reparo foi obtido pela minimização do custo esperado por unidade de tempo ao longo de um período de tempo infinito.

Outra abordagem expandiu o problema da substituição ótima para o problema das políticas ótimas de compra, operação e venda. Simms *et al.* (1984) aplicaram uma combinação de programação linear e dinâmica para estudar uma frota urbana de ônibus. De forma similar, Hartman (2004) considerou que utilização é uma variável de decisão e não um parâmetro na busca pelo custo mínimo de substituição. Assim, os níveis de utilização ótimos associados à frota considerada também são definidos. Tanto Simms *et al.* (1984) quanto Hartman (2004) não sugeriram um critério de substituição em particular, mas apresentaram metodologias de otimização que levaram a resultados economicamente eficientes para uma frota específica.

Problemas relacionados com substituição de equipamentos em frotas também foram analisados por Davenport *et al.* (2005), Rees *et al.* (1982) e Redmer (2016). Os primeiros criaram um modelo de previsão da condição de uma frota de vans de passageiros e, usando um modelo de regressão, descobriram que variáveis como a idade, a quilometragem total, a quilometragem anual em estradas não pavimentadas, entre outros são os melhores preditores da condição da frota. Rees *et al.* (1982) fizeram uma previsão de substituição simulando o processo de deterioração e quebra do equipamento através de redes de Markov. Por último, Redmer (2016) utilizou programação dinâmica para resolver o problema de substituição de uma frota de caminhões na Polônia equilibrando os custos de propriedade e utilização e tendo em conta as limitações orçamentárias. Descobriu-se que é possível ajustar a idade individual à substituição de veículos particulares considerando restrições orçamentárias sem perder a otimização econômica de uma política desenvolvida para uma frota inteira.

Os aspectos econômicos que impactam nas decisões de substituição dos veículos foram abordados por Suzuki *et al.* (2005), que estudaram as mudanças na política de substituição em relação às variações nos preços de revenda e nos prêmios de seguro de tratores. Já Zheng *et*

*al.* (2018) consideraram o impacto da incerteza dos preços de combustíveis na decisão de substituição em uma frota de embarcações.

Em relação à aplicação prática dos modelos de otimização na política das organizações, Dietz *et al.* (2001) implementaram um modelo analítico em uma empresa de telecomunicações, Lin *et al.* (2008) estudaram um modelo de regressão para substituição de veículos antigos em uma agência governamental americana e Pedraza-Martinez & Wassenhove (2012) analisaram o impacto econômico na mudança da política de substituição de caminhonetes 4x4 nas frotas de quatro países pobres atendidos pelo Comitê Internacional da Cruz Vermelha.

Essas decisões do momento certo para substituição de veículos têm grande impacto econômico e devem levar em consideração as peculiaridades de cada região e as diferentes atividades exercidas.

#### 2.4 CRITÉRIOS AMBIENTAIS EM MODELOS DE SUBSTITUIÇÃO

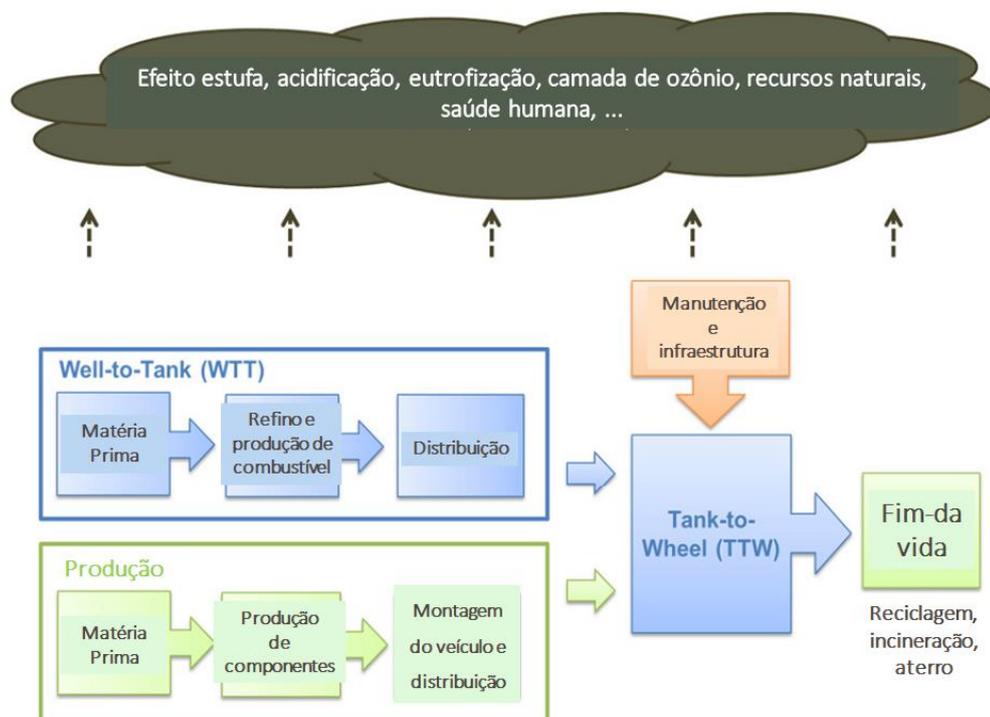
Devido à crescente preocupação com o ônus ambiental do transporte rodoviário, similarmente ao que ocorre com os custos econômicos estudados através da LCC, vários estudos de avaliação de ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) de veículos foram realizados. De acordo com o objetivo e escopo desses diferentes estudos, a LCA pode abranger um veículo específico, uma média de veículos ou tecnologias de veículo diferentes.

Em geral, todos os estudos de LCA incluem as diferentes fases do ciclo de vida de um veículo, ou seja, a extração do material, a fabricação, o uso, a manutenção, o fim da vida útil e os transportes intermediários entre essas fases conforme apresentado na Figura 2. Nesta pesquisa será considerada a etapa de utilização dos veículos (*Tank to Wheel - TTW*).

Segundo Messagie *et al.* (2013), o foco da literatura é principalmente sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto outras categorias de impacto são importantes para investigar. Uma avaliação completa do impacto do ciclo de vida deve abordar várias categorias de impacto, incluindo: alterações climáticas, depleção do ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de partículas, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade marinha, radiações ionizantes, ocupação de terras agrícolas, ocupação de terras urbanas, transformação de terras naturais,

depleção de recursos hídricos, depleção de recursos minerais e depleção de combustíveis fósseis.

Figura 2 - LCA de veículos e combustíveis



Fonte: Messagie *et al.* (2013) – Adaptado.

Outra questão que tem sido estudada pelos pesquisadores é a análise de obsolescência dos equipamentos e qual o momento em que é economicamente inviável a manutenção desses ativos na frota considerando que a emissão de gases do efeito estufa e demais poluentes também trazem prejuízos financeiros. Spitzley *et al.* (2005) fizeram comparações entre os intervalos ótimos de substituição de veículos com base em custos privados explícitos, custos estimados de danos causados pela poluição, emissões de dióxido de carbono, uso de energia e critérios de emissão de poluentes atmosféricos.

Miraglia & Gouveia (2014) mensuraram o impacto econômico de eventos de saúde associados à poluição atmosférica gerada pelos veículos nas regiões metropolitanas brasileiras através da metodologia DALY (*Disability Adjusted Life Years* – anos de vida perdidos ajustados por incapacidade). Esta metodologia proposta por Murray & Lopez em 1996 é uma medida sintética aplicada como um indicador do estudo de carga de doença que combina

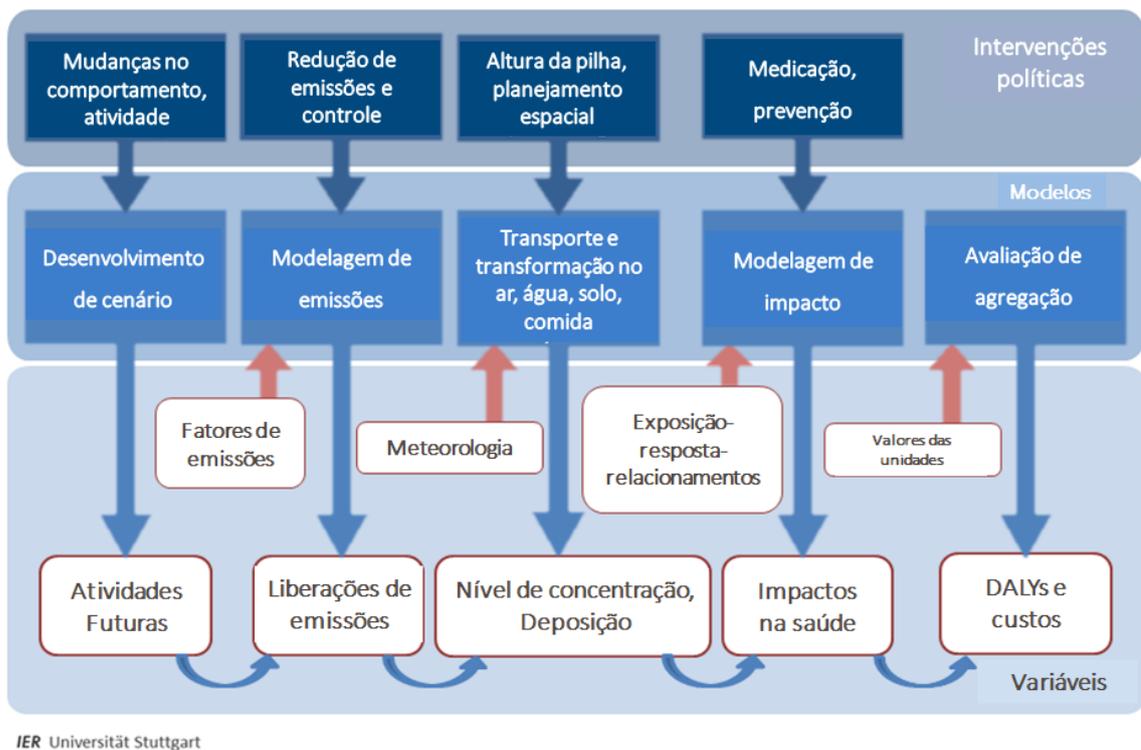
informações de mortalidade e morbidade sendo amplamente utilizada na identificação de fatores socioambientais que aumentam o risco de ocorrência de doenças e agravos (Leite *et al.*, 2015).

Lin *et al.* (2008) e Kagawa *et al.* (2013) focaram seus estudos nos benefícios da substituição de veículos antigos por outros mais eficientes na redução da emissão de CO<sub>2</sub> e outros gases do efeito estufa enquanto Afrinaldi *et al.* (2017) construíram modelos que conjugam os impactos econômicos e ambientais nas políticas de substituição dos veículos antigos.

### 2.4.1 Custos Ambientais

Os custos dos danos causados por poluentes utilizados neste estudo baseiam-se numa gama de valores publicados para cidades europeias utilizando a metodologia ExternE (Mercuri *et al.*, 2002). Custos de danos associados às emissões individuais foram calculadas usando uma Abordagem de Via de Impacto (*The Impact Pathway Approach*).

Figura 3 - A Abordagem da Via de Impacto



Fonte: The ExternE Project – Adaptado.

Essa abordagem (Figura 3) calcula um fluxo futuro de valores monetários relacionados à saúde humana e impactos de infraestrutura com base nas emissões de poluentes, condições do local e uma população exposta. Esse método é uma abordagem de baixo para cima (*bottom-up*) para alcançar uma avaliação integrada dos impactos na saúde e no meio ambiente causados pela poluição do ar. Foi projetado para avaliar os impactos de diferentes intervenções políticas sobre a qualidade do ar e suas consequências.

Os custos unitários de danos causados por poluentes são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Custos das emissões nos centros urbanos europeus

<b>Poluente</b>	<b>Intervalo dos custos de emissões (U\$/ton)</b>
Material Particulado - MP	158.875 – 1.063.636
Óxidos de Nitrogênio - NO <sub>x</sub>	337 – 8.573
Hidrocarbonetos Não-Metano - NMHC	237 – 1.561
Monóxido de Carbono - CO	1,2 - 18
Dióxido de Carbono - CO <sub>2</sub>	14 - 38

Fonte: Mercuri *et al.* (2002).

Os valores publicados por Mercuri *et al.* (2002) refletem o espectro de densidades populacionais nas cidades estudadas com valores baixos representando cidades com menor densidade populacional, como Helsinque (3007 hab/km<sup>2</sup>); e valores altos aplicados a cidades com maior densidade populacional, como Paris (20.807 hab/km<sup>2</sup>). No entanto, a aplicação da metodologia de avaliação de custos de danos externos às cidades brasileiras provavelmente resultaria em valores mais baixos do que os fornecidos aqui. Estima-se que a maioria das cidades do Brasil (com população acima de 100.000 habitantes) tenha uma densidade populacional de menos de 3.000 pessoas / km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). Considerando somente as capitais dos estados brasileiros, a cidade com maior densidade populacional é Fortaleza com 7.786 hab/km<sup>2</sup> enquanto Porto Velho é a capital com o menor valor, 12,57 hab/km<sup>2</sup>. A Figura 4 apresenta um mapa com as densidades demográficas do país de acordo com o último censo do IBGE de 2010.

Figura 4 - Densidade demográfica do Brasil



Fonte: IBGE (2010).

Outro meio de analisar a questão dos impactos econômicos referentes às emissões é aplicando o conceito de crédito de carbono. A precificação do carbono é um instrumento que capta os custos externos das emissões de gases de efeito estufa (GEE) – os custos das emissões que o público paga, tais como danos às plantações, custos de saúde causados por ondas de calor e secas e a perda de propriedade das inundações decorrentes das emissões sob a forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Lin & Gia (2019) analisaram o impacto de diferentes níveis de preço do Esquema de Comércio de Emissões (*Emission Trading Scheme – ETS*), o mercado de carbono mundial, e concluíram que os baixos preços no ETS prejudicam a capacidade do mercado de carbono de reduzir as emissões enquanto o preço mais alto do carbono levará a uma redução maior na emissão de CO<sub>2</sub>, mas os custos econômicos não podem ser ignorados.

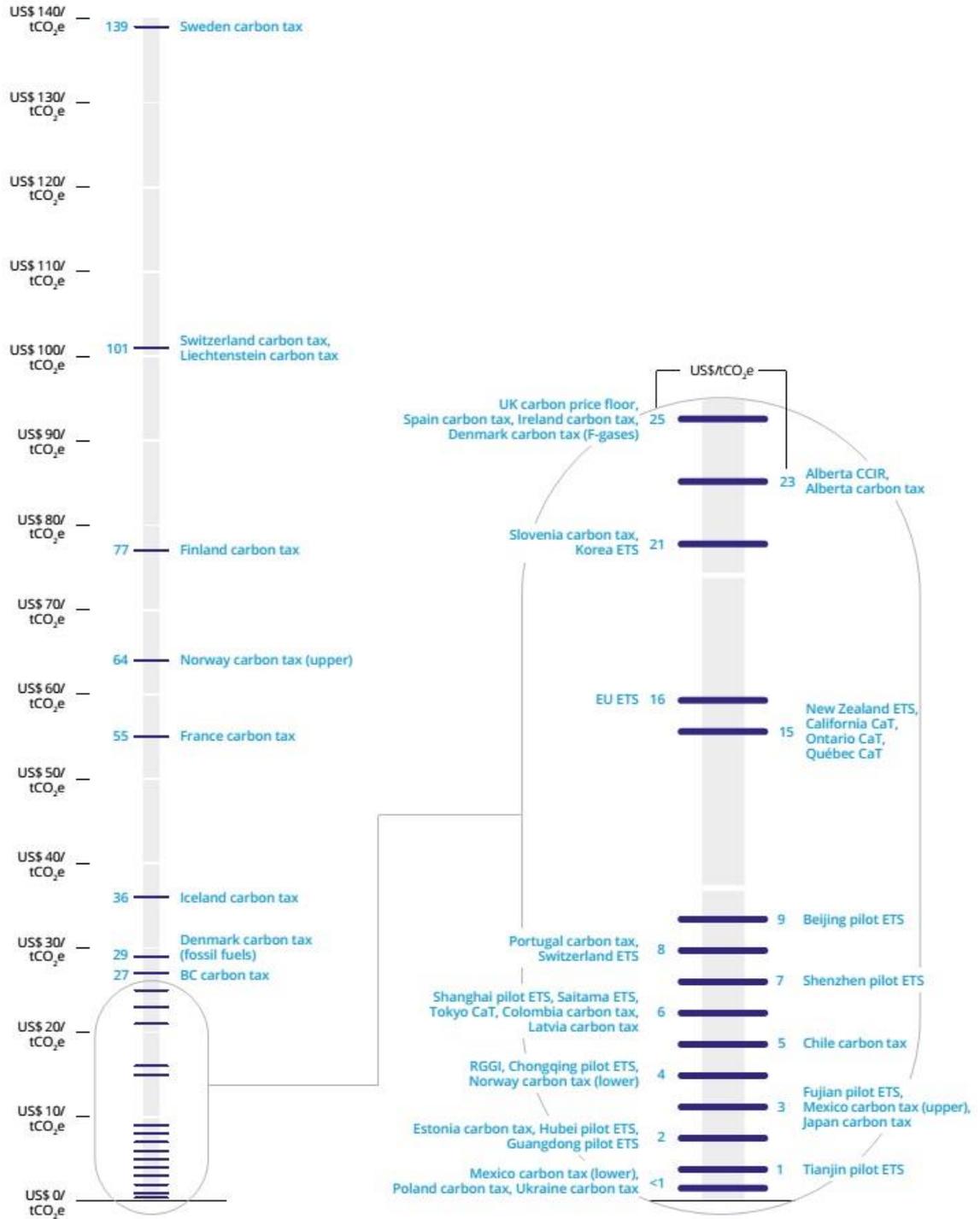
Um preço em carbono ajuda a transferir o ônus das emissões de GEE para aqueles que são responsáveis por ele e quem pode evitá-lo. Em vez de ditar quem deve reduzir as emissões onde e como, o preço do carbono fornece um sinal econômico aos emissores e permite que

eles transformem suas atividades e reduzam suas emissões, ou continuem emitindo e pagando por elas. Desta forma, a meta ambiental global é alcançada da maneira mais flexível e de menor custo para a sociedade. As emissões de GEE são de fundamental importância para internalizar o custo externo das mudanças climáticas na mais ampla gama possível de decisões econômicas e na definição de incentivos econômicos para um desenvolvimento limpo. Pode ajudar a mobilizar os investimentos financeiros necessários para estimular a tecnologia limpa e a inovação de mercado, alimentando novos impulsionadores do crescimento econômico de baixo carbono (Banco Mundial, 2018). A Figura 5 apresenta as taxas de Crédito Carbono de iniciativas implementadas em vários países.

Diversas metodologias de classificação ambiental estão disponíveis ao redor do mundo para avaliar e comparar o desempenho ambiental dos veículos, o que pode ser útil para as decisões dos consumidores e para as organizações na promoção de tecnologias e combustíveis menos poluentes. Batista *et al.* (2015) apresentaram uma visão geral das metodologias de classificação ambiental de veículos disponíveis em países como Estados Unidos, Bélgica, Inglaterra, Alemanha, México e Austrália. Garcia & Freire (2017) apresentaram uma visão geral de estudos selecionados usando uma abordagem de ciclo de vida baseada para avaliar impactos ambientais em diversos cenários de evolução das frotas de veículos de alguns países.

Outros autores fizeram comparações entre veículos movidos a diferentes tipos de combustíveis e seus impactos ambientais. Giordano *et al.* (2018) analisaram o impacto ambiental, social e econômico de vans de entrega movidas a diesel e baterias elétricas. Ehsani *et al.* (2015) consideraram critérios como o peso dos veículos, o vento, a temperatura e o tipo de direção, relacionada à velocidade e aceleração, para analisar o efeito no consumo de combustível.

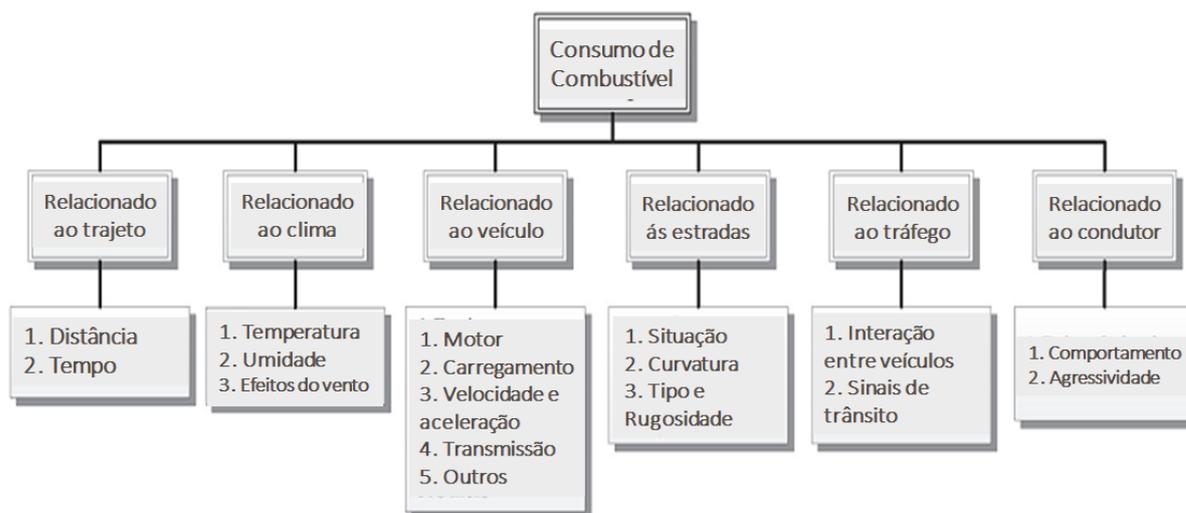
Figura 5 – Preços em iniciativas implementadas de Crédito Carbono



Fonte: Banco Mundial (2018).

Por último, Zhou *et al.* (2016) apresentaram uma revisão sistemática dos modelos de consumo e os fatores que influenciam a economia de combustível. Esses fatores variam desde questões relacionadas ao trajeto como tempo e distância, até aspectos associados ao comportamento do condutor, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema com os fatores que afetam o consumo de combustível



Fonte: Zhou *et al.* (2016) – Adaptado.

#### 2.4.2 Proconve

Em razão do crescimento de veículos automotores em circulação nas cidades brasileiras, com a conseqüente degradação ambiental devido à poluição do ar e sonora, houve a necessidade da adoção de medidas eficazes de controle da poluição veicular, direta ou indiretamente.

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT) foram criados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA por meio de Resoluções que estabeleceram diretrizes, prazos e padrões legais de emissão admissíveis para as diferentes categorias de veículos automotores, nacionais e importados.

O PROCONVE/PROMOT baseou-se na experiência internacional para adequar os índices à realidade brasileira e tem como principal meta a redução da contaminação atmosférica das fontes móveis, tais como veículos automotores, por meio da fixação dos

limites máximos de emissão, induzindo o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes e estabelecendo exigências tecnológicas para veículos, cuja comprovação é feita a partir de ensaios padronizados. A certificação de protótipo/projeto e o acompanhamento estatístico em veículos de produção também fazem parte da estratégia de controle.

As emissões de gases poluentes de um veículo ocorrem após a queima de combustível no motor e são lançadas pelo sistema de escapamento sendo classificados como gases de exaustão. Ocorrem ainda pela evaporação do combustível contido no tanque, em pontos como a tampa do bocal de abastecimento, as mangueiras de combustível, suas conexões, o respiro do tanque etc. e também durante o processo de abastecimento de combustível. Conforme o tanque vai sendo preenchido pelo combustível, os vapores ali contidos são expulsos pelo bocal de abastecimento.

De acordo com o relatório Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2017, desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, no grupo dos gases de exaustão estão o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), os hidrocarbonetos não metano (NMHC), os aldeídos totais (CHO), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e material particulado (MP) que são aqueles poluentes que direta ou indiretamente causam prejuízos à saúde. Nesse grupo estão também os gases do efeito estufa, que não causam prejuízos significativos à saúde nos níveis ambientais encontrados, mas contribuem para o fenômeno do aquecimento global. São eles: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). As emissões evaporativas e de abastecimento são formadas por vapores de gasolina e etanol e definidas como hidrocarbonetos não metano (NMHC).

O controle de emissão foi dividido por categoria de veículos e no caso dos veículos leves foi escalonado nas seguintes fases segundo o 2º Inventário Nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (2013):

» Fase L-1 (1988-1991): Caracterizada pela eliminação dos modelos mais poluentes e aprimoramento dos projetos dos modelos já em produção. Iniciou-se também nesta fase o controle das emissões evaporativas. As principais inovações tecnológicas que ocorreram nesta fase foram: reciclagem dos gases de escapamento para controle das emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>); injeção secundária do ar no coletor de exaustão para o controle de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC); implantação de amortecedor da borboleta do carburador para controle do HC e otimização do avanço da ignição;

» Fase L-2 (1992-1996): A partir dos limites verificados na Resolução CONAMA nº 18 de 1986, nessa fase investiu-se na adequação de catalisadores e sistemas de injeção eletrônica para uso com mistura de etanol, em proporção única no mundo. As principais inovações nos veículos foram a injeção eletrônica, os carburadores assistidos eletronicamente e os conversores catalíticos. Em 1994 iniciou-se o controle de ruído dos veículos;

» Fase L-3 (1997-2004): Em face da exigência de atender aos limites estabelecidos a partir de 1º de janeiro de 1997 (Resolução CONAMA nº 15 de 1995), ocorreram reduções bastante significativas em relação aos limites anteriores, e o fabricante/importador empregou, conjuntamente, as melhores tecnologias disponíveis para a formação de mistura e controle eletrônico do motor como, por exemplo, o sensor de oxigênio (denominado "sonda lambda");

» Fase L-4 (2005-2008): Tendo como referência a Resolução CONAMA nº 315 de 2002, a prioridade nesta fase que teve início no ano de 2005 é a redução das emissões de HC e NO<sub>x</sub>, poluentes precursores da formação de ozônio. Para o atendimento desta fase, deu-se o desenvolvimento de motores com novas tecnologias como a otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos de injeção, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica;

» Fase L-5 (2009-2013): Com os limites de emissão da Resolução CONAMA nº 315 de 2002, da mesma forma que na fase L4, a prioridade na fase L5 é a redução das emissões de HC e NO<sub>x</sub>. De maneira análoga à fase L4, as inovações tecnológicas se deram na otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica;

» Fase L-6 (a partir de 2013): Em 2009, o CONAMA, ao aprovar a Resolução nº 415, introduziu a Fase L6 que entrou em vigor em 2013. L6 estabeleceu, basicamente, novos limites máximos para a emissão de escapamento de veículos automotores leves novos de passageiros de massa menor ou igual a 1.700 quilogramas e veículos leves comerciais com massa superior a 1.700 quilogramas. Ambas as categorias são para uso rodoviário, e contemplam tanto veículos do ciclo Otto quanto veículos do ciclo Diesel.

Segundo definição da CETESB (2017), os veículos do ciclo Otto são aqueles que possuem motor de combustão interna que emprega o ciclo termodinâmico do tipo Otto. A principal característica desse motor é a vela de ignição, que provoca a combustão. Normalmente utilizado nos automóveis, motos e em alguns veículos comerciais que utilizam

gasolina C, etanol hidratado ou GNV como combustível. Também utilizado nos veículos tipo flex-fuel.

Já os veículos do ciclo Diesel possuem motor de combustão interna cuja queima do combustível se dá devido ao aumento da temperatura provocada pela compressão do ar. Utiliza diesel como combustível e não possui vela de ignição. No Brasil é normalmente utilizado nos caminhões, ônibus e em parte dos veículos comerciais.

Para o futuro ainda está prevista a introdução de catalisadores de oxidação, de filtro de particulados e de recirculação de gases;

» Fases L-7 e L-8: O CONAMA entendeu que deveria adotar fases mais severas que as anteriores e já está trabalhando na promulgação da Fase L-7 e na elaboração da fase L-8 que deve entrar em vigência a partir de 2025.

A Tabela 2 apresenta os limites de emissões dos poluentes por fase avaliados pelo PROCONVE para os veículos do ciclo Otto (movidos a gasolina ou etanol hidratado) e os veículos leves movidos a Diesel.

Tabela 2 - Limites máximos de emissões dos poluentes por fase

FASE	ANO	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	NMHC (g/km)	HC (g/km)	RCHO (1) (g/km)	MP (2) (g/km)	Evaporativa (g/teste) (1)
L-1	1988-1991	24,0	2,0	n.a.	2,1	n.a.	n.a.	6,0
L-2	1992-1996	12,0	1,4	n.a.	1,2	0,15	0,16	6,0
L-3	1997-2004	2,0 (1) ou 6,2(2)	0,6 (1) ou 1,4(2)	n.a.	0,3(1) ou 0,5(2)	0,03	0,16	2,0
L-4	2005-2008	2,0 (1) ou 2,7(2)	0,25 (1) ou 1,00 (2)	0,16(1) ou 0,2(2)	n.a.	0,03	0,10	2,0
L-5	2009-2013	2,0(1) ou 2,7(2)	0,12 (1) ou 0,43 (2)	0,05(1) ou 0,06(2)	n.a.	0,02	0,06	1,5
L-6	2013-	1,3(1) ou 2,0(2)	0,08 (1) ou 0,35 (2)	0,05(1) ou 0,06(2)	n.a.	0,02	0,04	1,5

Fonte: Manual PROCONVE – Adaptado.

Legenda: (1) Aplicável somente aos veículos movidos a gasolina ou etanol.

(2) Aplicável somente aos veículos movidos a diesel.

## 2.5 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Regressão é o método de análise apropriado quando o problema de pesquisa envolve uma única variável dependente métrica considerada como relacionada a uma variável

independente (regressão simples) ou duas ou mais variáveis independentes métricas (regressão múltipla). O objetivo da análise de regressão é prever as mudanças na variável dependente como resposta a mudanças nas variáveis independentes. Esse objetivo é alcançado, com frequência, por meio da regra estatística dos mínimos quadrados (Hair *et al*, 2009).

Na análise da regressão assume-se que a **variável resposta** ( $Y$ ) esteja relacionada a  $k$  **preditores** ( $X_1, X_2, \dots, X_k$ ) por meio de uma equação linear (Equação 1) chamada modelo de regressão populacional (Doane & Seward, 2014):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

Os coeficientes desconhecidos da regressão  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots + \beta_k$  são parâmetros. Cada coeficiente indica a mudança no valor esperado de  $Y$  quando se altera uma unidade em  $X_j$ . A inclusão de um erro aleatório  $\varepsilon$  é necessária porque outras variáveis não especificadas poderiam também afetar  $Y$  e também porque pode haver erro na mensuração de  $Y$ . Supõe-se que os erros sejam distúrbios aleatórios independentes e não observáveis que têm distribuição normal com média zero e variância constante.

Nessas suposições, o método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) produz estimadores não viciados, consistentes e eficientes dos parâmetros desconhecidos (Doane & Seward, 2014). Em síntese, segundo Doane & Seward (2014), as três suposições importantes testadas são:

*Suposição 1:* Os erros têm distribuição normal.

A principal consequência da violação desta suposição é que os intervalos de confiança podem ser indignos de confiança, pois a suposição de normalidade é usada para justificar o uso da  $t$  de *Student* para construir os intervalos de confiança.

*Suposição 2:* Os erros têm variâncias constantes (são homocedásticos).

A regressão deveria se ajustar igualmente bem para todos os valores de  $X$ . Na forma mais comum de heterocedasticidade, as variâncias dos estimadores são provavelmente subestimadas, resultando estatísticas  $t$  exageradas e intervalos de confiança artificialmente estreitos. Embora muitos padrões de variância não constante possam existir, o padrão “leque”

(variância dos resíduos crescente) e o padrão “funil” (variância dos resíduos decrescente) são os mais comuns.

*Suposição 3:* Os erros são independentes (não são autocorrelacionados).

A autocorrelação é um padrão de erros não independentes, encontrados principalmente em dados de séries temporais, onde é possível que os erros se relacionem entre si, produzindo intervalos de confiança estreitos demais e estatísticas  $t$  grandes demais e conseqüentemente o ajuste do modelo pode ser exagerado. Uma autocorrelação *positiva* é revelada por sequências de resíduos com mesmo sinal, enquanto uma autocorrelação *negativa* é revelada com sequências de resíduos com sinais alternados.

Logo, deve-se analisar os resíduos de um modelo de regressão para verificar violações dessas suposições e conseqüentemente garantir um ajuste de modelo de regressão parcimonioso e equilibrado.

## 2.6 MÉTODOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS

Neste tópico serão apresentados dois métodos de estatística multivariada aplicados no contexto da gestão de frota de veículos.

### 2.6.1 Análise de Agrupamentos

A análise de agrupamentos (*clusters*) tem como objetivo dividir os elementos da amostra em grupos de forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si com respeito às variáveis (características) que neles foram medidas e os elementos em grupos diferentes sejam heterogêneos em relação a estas mesmas características (Mingoti, 2017).

Para que se proceda ao agrupamento de elementos é necessário que se decida *a priori* a medida de similaridade ou dissimilaridade que será utilizada. Existem várias medidas diferentes e entre as mais comuns, apropriadas para variáveis quantitativas, está a Distância Euclidiana. Nesta medida os  $n$  elementos amostrais são comparados em cada variável pertencente ao vetor de observações (Mingoti, 2017). A distância euclidiana entre dois elementos  $X_l$  e  $X_k$ ,  $l \neq k$ , é definida pela Equação 2:

$$d(X_l, X_k) = [(X_l - X_k)' (X_l - X_k)]^{1/2} = [\sum_{i=1}^p (X_{il} - X_{ik})^2]^{1/2} \quad (2)$$

ou seja, os dois elementos amostrais são comparados em cada variável pertencente ao vetor de observações.

Ainda segundo Mingoti (2017), as técnicas de *clusters* são frequentemente classificadas em dois tipos: hierárquicas e não hierárquicas, sendo que as primeiras são classificadas em aglomerativas e divisivas. As técnicas hierárquicas, na maioria das vezes, são utilizadas em análises exploratórias dos dados com o intuito de identificar possíveis agrupamentos e o valor provável do número de grupos. Já nas técnicas não hierárquicas, é necessário que o valor do número de grupos já esteja pré-especificado pelo pesquisador.

Nesta análise foi considerada a técnica hierárquica aglomerativa. Esta técnica parte do princípio de que no início do processo de agrupamento tem-se  $n$  conglomerados, ou seja, cada elemento do conjunto de dados observado é considerado como sendo um conglomerado isolado. Em cada passo, os elementos amostrais vão sendo agrupados, formando novos conglomerados até o momento no qual todos os elementos considerados estão em um único grupo. Em cada estágio do procedimento, os grupos são comparados através de alguma medida de similaridade (ou dissimilaridade) previamente definida (Mingoti, 2017).

No presente estudo a medida de similaridade utilizada foi o método de ligação completa. Neste método, a similaridade é definida pelos elementos que são “menos semelhantes” entre si (Mingoti, 2017). Em cada estágio do processo de agrupamento, a medida é calculada para todos os pares de grupos, sendo, então, combinados em um único aqueles que apresentarem o menor valor da distância, isto é, o menor valor de máximo.

A Análise de Agrupamentos se faz presente em várias situações, entre elas em Geografia, na classificação de cidades, estados ou regiões de acordo com variáveis físicas, demográficas e econômicas (Mingoti, 2017) e será aplicada neste trabalho para separar os estados em grupos de acordo com seus indicadores mais significativos para simplificar o planejamento da substituição dos veículos. A natureza dos dados levantados e a análise dos Custos Equivalentes Anuais indicarão a(s) melhor(es) política(s) de substituição de veículos.

## 2.6.2 Análise de Componentes Principais

A técnica denominada de análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) tem o objetivo de explicar a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório, composto de p-variáveis aleatórias numéricas, através da construção de combinações lineares das variáveis originais. Estas combinações lineares são chamadas de componentes principais e são não correlacionadas entre si. Em geral, deseja-se obter redução do número de variáveis a serem avaliadas, ou seja, a informação contida nas p-variáveis originais é substituída pela informação contida em k ( $k < p$ ) componentes principais (Mingoti, 2017).

Seja  $Z_i = (X_i - \mu_i) / \sigma_i$ , onde  $E(X_i) = \mu_i$  é o valor esperado e  $Var(X_i) = \sigma_i$  é a variância de  $X_i$  onde  $i=1,2,\dots,p$ . A matriz  $P_{p \times p}$  é a matriz de covariâncias das variáveis  $Z_i$ . Se a técnica de componentes principais for aplicada à matriz  $P_{p \times p}$ , as componentes principais construídas serão combinações lineares das variáveis  $X_i$  padronizadas.

Os autovalores da matriz  $P_{p \times p}$  são denotados por  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_p$  e os correspondentes autovetores normalizados por  $e_1, e_2, \dots, e_p$ , onde  $e_i = [e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ip}]$ . Então  $Y_j$ , a j-ésima componente principal da matriz  $P_{p \times p}$ ,  $j=1,2,\dots,p$  é definida pela Equação 3:

$$Y_j = e_j ' Z = e_{j1} Z_1 + e_{j2} Z_2 + \dots + e_{jp} Z_p \quad (3)$$

Sendo que:

- A variância de  $Y_j$  é igual a  $\lambda_j$ ,  $j = 1,2,\dots,p$ , e a covariância entre  $Y_j$  e  $Y_k$  é igual a zero, para qualquer  $j \neq k$ ;
- A correlação entre a componente  $Y_j$  e a variável padronizada  $Z_i$  é igual a:

$$r_{Y_j, Z_i} = r_{Y_j, X_i} = e_{ji} \sqrt{\lambda_j}$$

e conseqüentemente, as variáveis  $Z_i$  com os maiores coeficientes na componente principal  $Y_j$  são as mais correlacionadas com a componente.

- A variância total do vetor aleatório  $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_p)$  é igual ao traço da matriz  $P_{p \times p}$ , que é igual ao valor p, ou seja, o número de variáveis medidas em cada elemento amostral. Portanto, a proporção da variância total explicada pela j-ésima componente principal é igual a  $\lambda_j/p$ ,  $j = 1,2,\dots,p$ .

É comum utilizar a PCA para condução de análise estatística de dados ou para a simples ordenação (*ranking*) dos elementos amostrais observados, com o intuito de identificar aqueles que estão com maiores ou menores valores globais das componentes. Onat *et al.* (2019) apresentou uma estrutura integrada de avaliação de sustentabilidade aplicada às tecnologias de veículos elétricos nos Estados Unidos. Para o presente estudo a PCA será utilizada para ordenar os carros dos piores para os melhores escores, ou seja, o primeiro componente será considerado um indicador de desempenho onde os veículos em situação mais crítica terão os escores mais significativos e deverão ser os primeiros a serem substituídos.

## 2.7 SUMÁRIO DAS PESQUISAS APRESENTADAS

O objetivo desse Capítulo foi identificar o estado da arte em modelos de substituição de equipamentos tanto na prática quanto na literatura de pesquisa publicada. Esta análise centrou-se em estudos e pesquisas de substituição de equipamentos que são aplicáveis ou motivados pela substituição de frotas de veículos. A principal questão que foi abordada foi como identificar candidatos de substituição entre os membros da frota para que os custos totais sejam minimizados ao longo do tempo. A Tabela 3 apresenta um resumo da literatura revisada neste Capítulo.

Tabela 3 - Sumário dos trabalhos apresentados na Revisão de Literatura

(continua...)

<b>Fonte</b>	<b>Propósito</b>	<b>Frota</b>	<b>Método</b>	<b>Parâmetros</b>
EILON, S. et al. (1966): A study in equipment replacement	Definição do limite de tempo de vida ótimo	Empilhadeiras	Programação não-linear	Preços de aquisição e revenda e custos de manutenção
DRINKWATER, R.W.; HASTINGS, N.A.J. (1967): An economic replacement model	Definição do limite de tempo ótimo de reparo	Veículos militares	Programação dinâmica e simulação Monte Carlo	Tempos e custos de reparo
NAKAGAWA, T.; OSAKI, S. (1974): The optimum repair limit replacement policies	Definição do limite de tempo ótimo de reparo	Caso com ativos únicos	Programação não-linear	Tempos para falha e para reparos
REES, L.P. et al. (1982): A network simulation model for police patrol vehicle maintenance and replacement analysis	Previsão de demanda de substituição	Viaturas policiais	Simulação de Markov	Estado dos veículos

SIMMS, B.W. et al. (1984): Optimal buy, operate and sell policies for fleets of vehicles	Modelo de gestão de frota de ônibus considerando idade, quantidade e quilometragem	Ônibus urbanos	Programação linear e dinâmica	Idade, número de veículos, quilometragem e custos operacionais, de manutenção e de aquisição
DIETZ, D.C.; KATZ, P.A. (2001): US WEST implements a cogent analytical model for optimal vehicle replacement	Aplicação em uma empresa de telecomunicações baseado na idade, tipo, custo de substituição e manutenção estimados	Veículos particulares	Modelo baseado em processo	Idade, tipo e custos estimados de substituição e manutenção
MERCURI, R. et al. (2002): Options for refuelling hydrogen fuel cell vehicles in Italy	Comparação dos impactos causados por veículos movidos a hidrogênio e demais veículos	Veículos movidos a células de hidrogênio	Abordagem da Via de Impacto	Custos externos e emissões
WEISSMAN, J. et al. (2003): Computerized equipment replacement methodology	Definição do limite de tempo de vida ótimo e identificação de um <i>ranking</i> multi-atributo de ativos	Veículos públicos	Programação não-linear	Custos do ciclo de vida
HARTMAN, J.C. (2004): Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand	Definição do cronograma de substituição ótimo e níveis de utilização associados	Caso com múltiplos ativos	Programação dinâmica	Custos operacionais e de manutenção
DAVENPORT, N.S. et al. (2005): Development and application of a vehicle procurement model for rural fleet asset management	Previsão de condição de frota incluindo fatores socioeconômicos	Vans de passageiros	Regressão	Idade, quilometragem, modelo e capacidade
SUZUKI, Y.; PAUTSCH, G.R. (2005) A vehicle replacement policy for motor carriers in an unsteady economy	Relação entre a política de substituição e variações nos preços de revenda e prêmios de seguros	Tratores	Programação dinâmica	Custos operacionais, custos de seguro e depreciação
SPITZLEY, D.V. et al. (2005): Life cycle optimization of ownership costs and emissions reduction in US vehicle retirement decisions	Definição do ciclo de vida ótimo baseado nos custos de propriedade e redução das emissões	Veículos de passeio	Programação dinâmica	Custos operacionais e de emissão de gases poluentes
LIN, J. et al. (2007): An analysis on long term emission benefits of a government vehicle fleet replacement plan in northern Illinois	Substituição de veículos públicos antigos visando à redução das emissões	Veículos públicos	Método de Weibull	Idade, marca, modelo, preço de aquisição e rotina de manutenção
PEDRAZA-MARTINEZ, A.J.; VAN WASSENHOVE, L.N. (2012): Vehicle Replacement in the International Committee of the Red Cross	Mudança na política de substituição baseada nos dados de campo	Caminhonetes 4x4	Programação dinâmica	Idade, quilometragem, custos operacionais e qualidade das estradas

KAGAWA, S. et al. (2013): Better cars or older cars?: Assessing CO <sub>2</sub> emission reduction potential of passenger vehicle replacement programs	Substituição de carros velhos para redução da emissão de CO <sub>2</sub>	Veículos de passeio	Programação linear	Idade e emissões de CO <sub>2</sub>
MESSAGIE, M. et al. (2013): Key outcomes from Life Cycle Assessment of vehicles, a state of the art literature review	Visão geral dos principais achados em Avaliação do ciclo de vida	Diferentes veículos elétricos	Avaliação do ciclo de vida	Questões metodológicas e resultados
MIRAGLIA, S.G.E.K; GOUVEIA, N. (2014): Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras	Avaliação do impacto econômico de eventos de saúde com a poluição do ar	Veículos em geral	Metodologia DALY	Mortalidade atribuível as concentrações de material particulado
BATISTA, T. et al (2015): Vehicle environmental rating methodologies: Overview and application to light-duty vehicles	Visão global de metodologias de avaliação ambiental de veículos	Veículos leves	Várias metodologias	Emissão de poluentes e gases do efeito estufa
EHSANI, M. et al (2015): Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport	Aplicação de modelo de consume de combustível e emissão de CO <sub>2</sub>	Diferentes tipos de veículo	Programação dinâmica	Diferentes tipos de combustível, estradas, motor e efeito do vento
REDMER, A. (2016): Strategic Vehicle Fleet Management – The Replacement Problem	Minimização dos custos de utilização e propriedade considerando limitações orçamentárias	Caminhões	Programação dinâmica	Idade, quilometragem e custos fixos e variáveis
ZHOU, M. et al (2016): A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing	Revisão dos modelos de consumo de combustível	Vários modelos	Várias metodologias	Fatores relacionados à viagem, clima, estradas, veículo, tráfego e ao motorista
AFRINALDI, F. et al. (2017): Minimizing economic and environmental impacts through an optimal preventive replacement schedule: Model and application	Minimização dos impactos econômicos e ambientais de componentes de veículos	Ônibus	Algoritmo genético	Tempo para falha e custos de substituição preventiva e corretiva
GARCIA, R.; FREIRE, F. (2017): A review of fleet-based life-cycle approaches focusing on energy and environmental impacts of vehicles	Revisão de abordagens com foco na energia e nos impactos ambientais dos veículos	Veículos movidos a combustíveis alternativos	Várias metodologias	Novas tecnologias veiculares
GIORDANO, A. et al (2018): Environmental and economic comparison of diesel and battery electric delivery vans to inform city logistics fleet replacement strategies	Comparação entre vans movidias a diesel e baterias elétricas	Vans elétricas e movidas a diesel	Custos equivalentes anuais	Custos operacionais, consumo de combustível e quilometragem anual
ZHENG, S.; CHEN, S. (2018): Fleet replacement decisions under demand and fuel price uncertainties	Decisão de substituição sob incerteza no preço de combustíveis	Embarcações	Simulação de Monte Carlo	Parâmetros de rota, demanda e tipos de embarcação

LIN, B., JIA, Z. (2019): Impacts of carbon price level in carbon emission trading market	Impacto de diferentes taxas de Crédito Carbono no consumo de energia, emissões de CO <sub>2</sub> e na economia	Emissões de CO <sub>2</sub> em geral	Modelo recursivo dinâmico	Preços do Carbono no Esquema de Comércio de Emissões
ONAT, N.C. (2019): Eco-efficiency of electric vehicles in the United States: A life cycle assessment based principal component analysis	Avaliação de sustentabilidade aplicada às tecnologias de veículos elétricos nos Estados Unidos	Veículos elétricos	Análise de componentes principais e Avaliação do ciclo de vida	Fatores ambientais e o custo do ciclo de vida

Fonte: O Autor (2019).

Como visto, questões ambientais como a emissão de gases do efeito estufa e outros poluentes pelos veículos automotores têm se tornado bastante relevantes pelos estudos mais recentes. Contudo, no Brasil, essa temática ainda é pouco avaliada pelas organizações públicas.

O propósito deste trabalho é, a partir da identificação do estado da arte em modelos de substituição de equipamentos, desenvolver um método, envolvendo um ou mais modelos, para apoiar os gestores de frota da PF na tomada de decisão relativa à substituição e à aquisição de veículos.

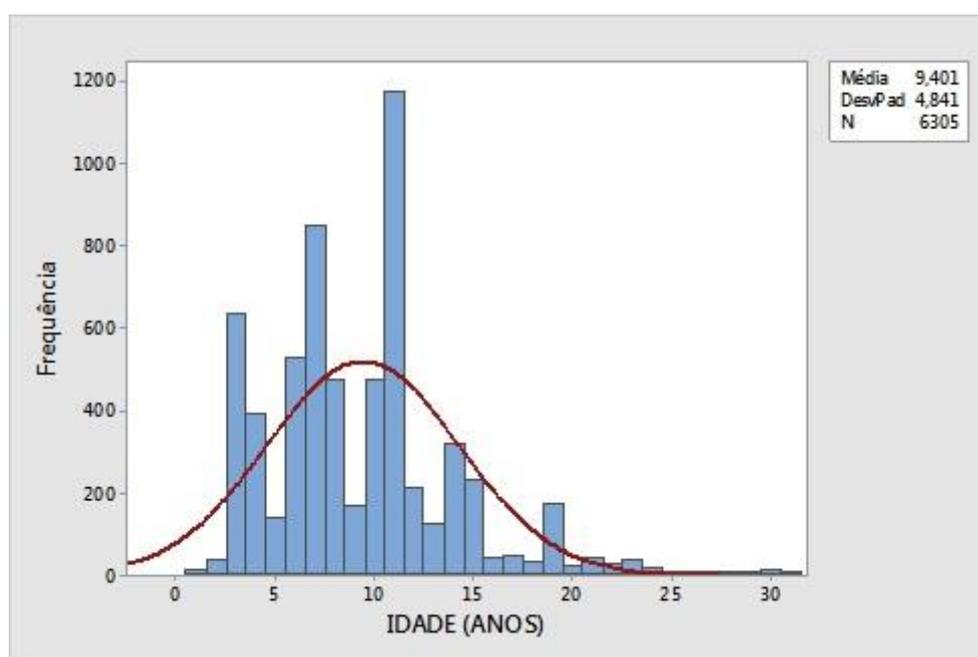
### 3 DIAGNÓSTICO DA FROTA

Para melhor compreensão do problema estudado referente à gestão da frota da Polícia Federal, o presente capítulo apresentará um panorama atual das condições dos veículos pertencentes à instituição.

#### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo levantamento feito através do Sistema Eletrônico de Patrimônio da PF de julho de 2018, cerca de 41% dos veículos da instituição têm 10 anos ou mais de idade. A Figura 7 apresenta a distribuição da quantidade de veículos pela idade em anos.

Figura 7 - Frequência dos veículos por idade (em anos)



Fonte: O Autor (2019).

A Instrução Normativa nº 1 de 21 de junho de 2007 da Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação (SLTI) do Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG) dispõe sobre a gestão dos veículos pertencentes à Administração Pública Federal. A IN nº 1/2007, posteriormente complementada pela IN nº 03 de 15 de maio de 2008, trouxe exigências para a aquisição de veículos através do preenchimento de alguns documentos tais

como o Mapa de Controle do Desempenho e Manutenção do Veículo Oficial, onde devem ser informados mensalmente para cada veículo a distância percorrida, o consumo de combustível e a quilometragem rodada por litro, além das despesas com manutenção/conservação e reparos. Esses dados servirão de subsídio para a elaboração do Plano Anual de Aquisição de Veículos (PAAV), em que deverá ser informado quais veículos estão em situação passível de substituição.

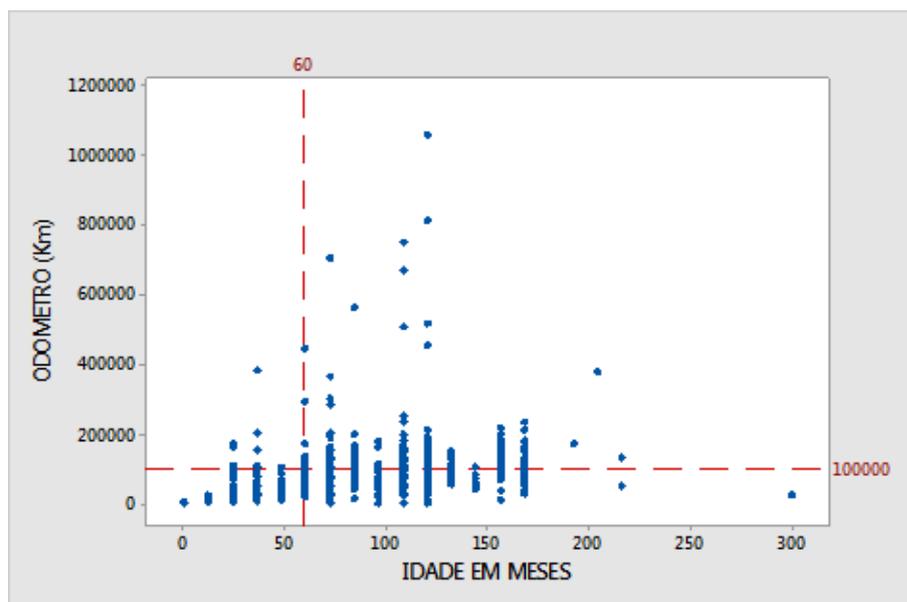
A Polícia Federal está implementando um sistema informatizado para que os gestores de frota dos estados insiram os dados necessários para preenchimento do Mapa de Controle exigido pela IN 03/2008. Contudo, os critérios objetivos para estabelecer o momento ideal de troca serão definidos pela Diretoria de Logística. Atualmente, a política que está sendo definida é de cinco anos de fabricação, 100.000 quilômetros rodados ou custo de manutenção na ordem de 50% do valor do veículo, o que acontecer primeiro. Entretanto, cada estado tem sua própria logística de utilização e a qualidade das estradas varia muito de região para região, logo definir uma política única sem considerar as particularidades de utilização e localização pode gerar perdas econômicas, seja pela subutilização ou utilização excessiva dos veículos.

A Figura 8 apresenta a situação da frota se forem considerados como parâmetros somente a idade e a quilometragem. As linhas vermelhas apresentam os limites de acordo com a política de substituição desejada e percebe-se que a grande maioria dos veículos da frota estão acima dos limites almejados.

Se forem considerados os veículos com mais de 5 anos, estes somam aproximadamente 74% da frota de Sedans, Caminhonetes, Hatchs e Camionetas (SUV). Em relação à quilometragem, os veículos que já rodaram mais de 100.000 km são aproximadamente 29% de toda a frota da PF.

Outra questão importante é a idade em que os veículos estão sendo alienados. A média de idade dos veículos vendidos nos últimos quatro leilões foi de 12,5 anos, ou seja, bem superior à política almejada de 5 anos. Por tal razão, descobrir o momento ótimo de substituição, seja ele superior, inferior ou próximo a 5 anos pode trazer benefícios econômicos e logísticos à instituição.

Figura 8 - Gráfico de pontos com a situação atual de veículos da PF



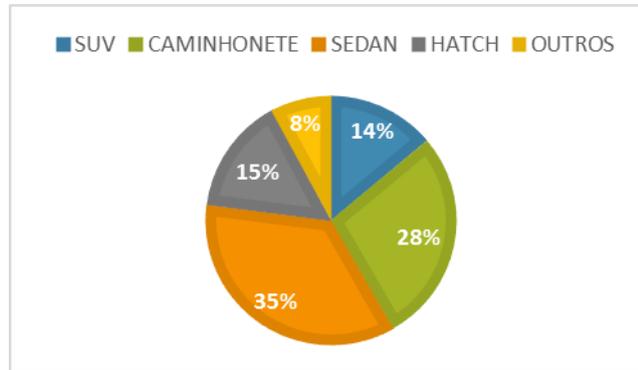
Fonte: O Autor (2019).

Para os fins desta pesquisa foram considerados os veículos mais utilizados e que estão efetivamente em operação, ou seja, aqueles que demandam recursos de manutenção e abastecimento. Foram analisados nesta pesquisa as Caminhonetes, Camionetas (SUV) e os veículos tipo Sedan e Hatch totalizando 4.718 unidades. Destes, cerca de 460 veículos estão aguardando baixa ou os procedimentos para realização de leilão, em razão de sinistro ou por estarem antieconômicos.

### 3.2 SITUAÇÃO DA FROTA

Para a definição da metodologia mais adequada é necessária uma análise robusta para se conhecer o panorama atual e desenhar as possibilidades de resolução do problema. Para alcançar esse objetivo foram levantados os tipos de veículos mais relevantes para as atividades exercidas pela PF e sua distribuição segundo o Sisvia é apresentada na Figura 9.

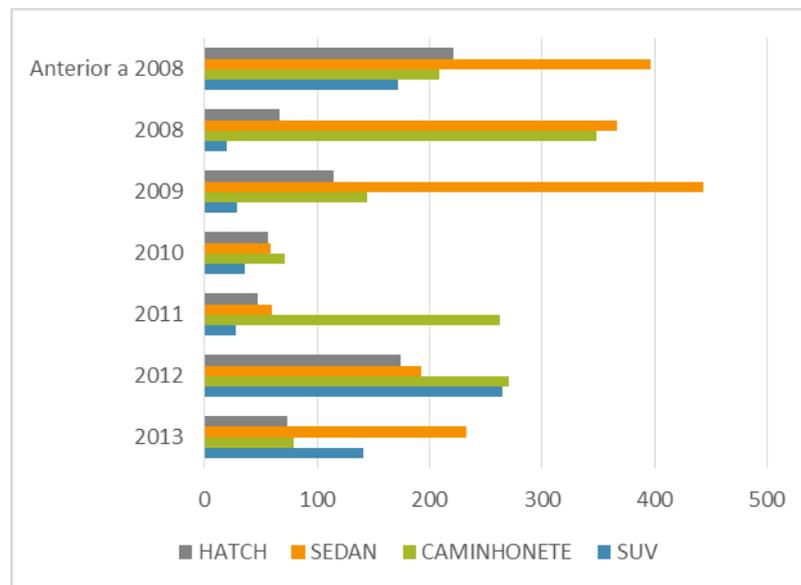
Figura 9 - Gráfico de setores com a proporção dos tipos de veículos da PF



Fonte: O Autor (2019).

Em relação à idade destes veículos, a Figura 10 apresenta a distribuição da quantidade em relação ao ano de fabricação da frota considerando como ano base 2018 e o quantitativo de veículos a partir daqueles com mais de 05 (cinco) anos, ou seja, aqueles aptos a serem substituídos segundo a política que se planeja implementar na instituição é considerável.

Figura 10 - Relação entre os tipos de veículos e o ano de fabricação



Fonte: O Autor (2019).

Percebe-se que grande parte dos veículos da instituição estão com mais de 10 anos principalmente os Sedans e a renovação da frota terá que ser planejada em fases em virtude do impacto orçamentário de uma única aquisição.

Uma particularidade de uma instituição de Segurança Pública como a PF é que dentro da mesma frota e de uma mesma localidade, o mesmo modelo e tipo de veículo pode ter utilizações distintas e conseqüentemente processos de deterioração diferentes. Segundo o Sisvia, a relação entre as viaturas ostensivas e descaracterizadas e entre os veículos próprios e apreendidos é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Tipos de propriedade e identificação

<b>OSTENSIVAS</b>	<b>DESCARACTERIZADAS</b>	<b>PRÓPRIOS</b>	<b>APREENDIDOS</b>
856 (13,53%)	5.473 (86,47%)	4.933 (77,94%)	1.396 (22,06%)

Fonte: O Autor (2019).

Através do *software* Minitab® foram calculadas as estatísticas descritivas da idade e quilometragem dos veículos analisados, quais sejam, aqueles que estão efetivamente sendo utilizados e constam nos contratos de manutenção e combustível e os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Estatísticas Descritivas dos Veículos por tipo

a) Hatch										
<b>Variável</b>	<b>Identificação</b>	<b>N</b>	<b>N*</b>	<b>Média</b>	<b>DesvPad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Q1</b>	<b>Mediana</b>	<b>Q3</b>	<b>Máximo</b>
<b>Idade</b>	CARACTERIZADO	8	0	7,25	3,37	2,00	4,00	7,50	9,75	12,00
	DESCARACTERIZADO	163	0	7,153	3,204	2,000	3,000	7,000	10,000	15,000
<b>Hodômetro</b>	CARACTERIZADO	8	0	68088	55855	1986	20026	61481	126905	142226
	DESCARACTERIZADO	163	0	74589	84526	185	34814	60451	93357	744291

b) Sedan										
<b>Variável</b>	<b>Identificação</b>	<b>N</b>	<b>N*</b>	<b>Média</b>	<b>DesvPad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Q1</b>	<b>Mediana</b>	<b>Q3</b>	<b>Máximo</b>
<b>Idade</b>	CARACTERIZADO	13	0	8,000	3,136	3,000	5,500	8,000	11,000	12,000
	DESCARACTERIZADO	170	0	8,706	2,738	1,000	6,000	10,000	10,000	15,000
<b>Hodômetro</b>	CARACTERIZADO	13	0	62331	30447	8245	36523	70332	77922	113808
	DESCARACTERIZADO	170	0	95094	89287	2060	56553	84938	116736	799927

c) Caminhonete

Variável	Identificação	N	N*	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Idade	CARACTERIZADO	36	0	7,833	2,772	4,000	4,500	8,000	11,000	11,000
	DESCARACTERIZADO	200	0	6,965	2,513	2,000	4,000	7,000	8,000	13,000
Hodômetro	CARACTERIZADO	36	0	79369	45750	1000	38630	72746	111511	189270
	DESCARACTERIZADO	200	0	85534	58961	1000	48356	70518	111045	557755

d) Camioneta (SUV)

Variável	Identificação	N	N*	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Idade	CARACTERIZADO	54	0	5,796	1,664	3,000	4,000	6,000	7,000	12,000
	DESCARACTERIZADO	120	0	6,958	2,994	3,000	4,000	7,000	8,000	18,000
Hodômetro	CARACTERIZADO	54	0	46710	32008	429	21995	42604	63655	128950
	DESCARACTERIZADO	120	0	93353	120401	1000	33237	57016	102257	800000

Fonte: O Autor (2019).

Pela análise inicial dos resultados observa-se que os veículos descaracterizados são mais utilizados que os ostensivos visto que, apesar da média de idade ser semelhante, a quilometragem é consideravelmente maior nas viaturas descaracterizadas. Essa situação pode ser explicada pelo fato de os veículos velados serem usados em todas as atividades rotineiras e dissimuladas, enquanto os carros caracterizados são requisitados nas operações e atividades estritamente policiais.

### 3.3 QUALIDADE DAS ESTRADAS

Um ponto importante que pode influenciar diretamente na política de gestão e renovação da frota de veículos é a qualidade das rodovias por onde estes trafegam. Segundo a Pesquisa de Rodovias 2017 realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), a ausência de condições adequadas de segurança e qualidade nas rodovias brasileiras tem elevado os custos de operação dos serviços de transporte, uma vez que seu inadequado estado de conservação implica frequentes ocorrências de avarias em pneus, rodas, suspensões e a maior necessidade de manutenção dos veículos e no aumento do consumo de combustível, entre outros.

Como citado, a qualidade das rodovias impacta o consumo de combustível dos veículos e, conseqüentemente, as emissões de poluentes atmosféricos. A referida pesquisa CNT revela que 61,8% (65.332 km) do total das rodovias analisadas apresentam condições

inapropriadas. O estado geral é regular em 33,6% da extensão, ruim em 20,1% e péssimo em 8,1%. No tocante ao critério pavimento, 50,0% da extensão possui deficiências, sendo 34,0% classificados como regular, 13,2% como ruim e 2,8% como péssimo. Enfatiza-se que as rodovias não pavimentadas correspondem a 78,7% (1.365.426 km) de toda malha rodoviária brasileira (1.735.621 km). A Tabela 6 apresenta a situação das rodovias por estado e a proporção entre a extensão total pesquisada e os trechos que apresentaram alguma deficiência.

Tabela 6 - Situação das estradas por Estado

UF	Extensão Total pesquisada - km	Pavimento (km)				% trechos deficientes
		Regular	Ruim	Péssimo	Total	
AC	1.348	800	49	429	1.278	95
AL	787	166	28	0	194	25
AM	1.022	301	456	65	822	80
AP	505	302	0	0	302	60
BA	8.866	2.970	788	278	4.036	46
CE	3.618	1.328	380	202	1.910	53
DF	415	100	4	0	104	25
ES	1.745	509	463	85	1.057	61
GO	6.665	2.224	1.041	132	3.397	51
MA	4.647	1.291	1.086	271	2.648	57
MG	15.076	5.403	3.122	240	8.765	58
MS	4.468	1.828	304	92	2.224	50
MT	4.842	1.763	1.188	80	3.031	63
PA	3.892	1.989	612	1.004	3.605	93
PB	1.711	586	122	0	708	41
PE	3.183	849	337	64	1.250	39
PI	3.417	1.511	142	81	1.734	51
PR	6.336	2.227	815	95	3.137	50
RJ	2.555	583	392	39	1.014	40
RN	1.894	689	180	114	983	52
RO	1.849	530	38	20	588	32
RR	1.005	400	99	10	509	51
RS	8.818	2.793	1.083	216	4.092	46
SC	3.249	1.005	607	26	1.638	50
SE	657	111	160	66	337	51
SP	10.002	1.744	318	151	2.213	22
TO	3.242	1.960	190	73	2.223	69

Fonte: Relatório CNT de Rodovias 2017 - Adaptado.

### 3.4 SUSTENTABILIDADE NA POLÍCIA FEDERAL

Conforme apresentado, em resposta à demanda mundial pelo desenvolvimento sustentável, as organizações perceberam que o foco exclusivo na excelência operacional não será mais suficiente para permanecer competitivo; elas precisam abordar as demandas de sustentabilidade como questões críticas de negócios. Rezende (2015) elenca algumas ações que podem ser consideradas sustentáveis em alguma das três perspectivas, que já são aplicadas pontualmente ou em caráter permanente no contexto da Polícia Federal.

#### I. Sustentabilidade Social:

- a. Investimento em capacitação (desenvolvimento de novas competências);
- b. Programas de responsabilidade social externa;
- c. Política de governança corporativa e transparência;
- d. Combate à discriminação e apoio às mulheres e minorias;
- e. Código de ética ou código de conduta;
- f. Ações voltadas à qualidade de vida no trabalho.

#### II. Sustentabilidade Ambiental:

- a. Projetos e iniciativas para controle e redução da poluição do solo e promoção da reciclagem;
- b. Controle/redução do consumo de energia/ eficiência energética;  
Controle/redução da poluição do ar (controle dos níveis de poluição; estabelecimento de critérios para emissão de gases; tecnologias menos poluentes; uso de equipamentos que reduzam a poluição; ações voltadas à compensação ou neutralização da produção de carbono);

#### III. Sustentabilidade Econômica:

- a. Desenvolvimento de iniciativas de redução de custos;
- b. Programas de gestão da qualidade, eficiência produtiva;
- c. Investimento em melhoria da infraestrutura (instalações físicas, materiais e equipamentos) e das tecnologias;
- d. Incentivo e investimento em projetos inovadores (novos produtos, serviços e processos organizacionais).

Este trabalho apresenta metodologia que visa atingir, em alguma medida, os três pilares representativos do desenvolvimento sustentável. As perspectivas ambiental e econômica são mais facilmente visualizadas, contudo o pilar referente às práticas sociais também pode ser atendido, seja como um programa de responsabilidade social, seja como uma ação voltada à qualidade de vida no trabalho (público interno) ou para a população em geral.

### 3.5 QUESTÃO AMBIENTAL

A questão ambiental se tornou bastante relevante ao redor do globo nos últimos anos. Para conter a poluição vários países anunciaram planos de proibir a venda de automóveis movidos a combustíveis fósseis nos próximos anos, entre eles, poluidores históricos como China e Índia. França e Reino Unido anunciaram o fim da venda de carros novos a diesel e gasolina até 2040. Na Áustria, isso poderá vigorar já em 2020. Na Noruega o prazo previsto é 2025 e, na Holanda, 2030.

O governo brasileiro, por sua vez, está elaborando o Rota 2030, nova política industrial para o setor automotivo. Mas não deve haver, pelo menos na primeira fase, regras para estimular o desenvolvimento de carros elétricos e híbridos (com motor elétrico e outro a combustão) no país. Entre as propostas discutidas para o novo programa está a de alíquotas menores do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para carros elétricos. No Brasil, não há carros de passeio a diesel, apenas veículos leves comerciais, caminhões e ônibus.

Além disso, no dia 16 de outubro de 2018 a Comissão de Assuntos Econômicos do Senado Federal aprovou o Projeto de Lei nº 454/2017 que pretende alterar a Lei de Redução da Emissão de Poluentes (Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993) para vedar a comercialização de veículos movidos a combustão no País a partir de 2060. O objetivo do projeto é substituir gradualmente os carros movidos a gasolina e diesel pelos veículos elétricos ou aqueles que usam exclusivamente biocombustíveis, de acordo com a Tabela 7. Atualmente o projeto está na relatoria da Comissão de Meio Ambiente aguardando emissão de relatório.

Tabela 7 - Substituição gradual dos veículos movidos a combustão

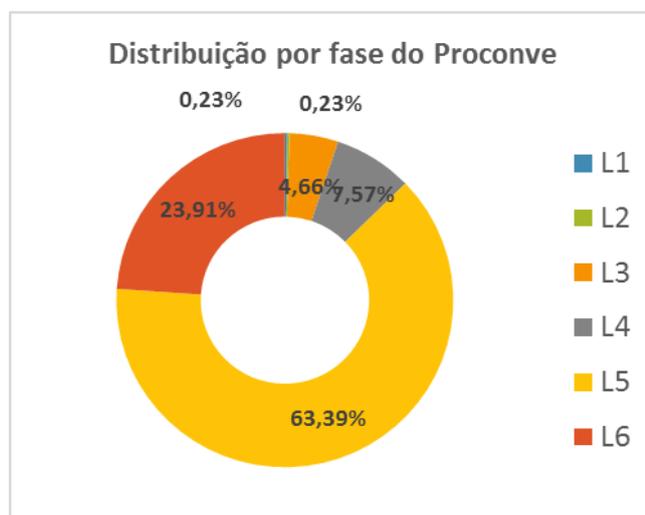
<b>Ano</b>	<b>Proporção de veículos vendidos movidos a combustíveis fósseis</b>
2030	90%
2040	70%
2050	10%
2060	0%

Fonte: O Autor (2019).

### 3.5.1 Situação da frota de acordo com o Proconve

A Figura 11 apresenta a situação da frota circulante de automóveis da PF separados de acordo com as fases do Proconve cujos limites máximos por etapa foram apresentados na Tabela 2.

Figura 11 - Proporção de veículos da PF por fase do Proconve



Fonte: O Autor (2019).

Afere-se do gráfico que aproximadamente 76% dos veículos da PF tem data de fabricação anterior à última fase do Proconve (2013). Esse fato acarreta limites superiores de tolerância a emissão de gases poluentes como monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

Em relação ao fator de emissão de CO<sub>2</sub>, este varia de acordo com o ano de fabricação dos veículos e o tipo de combustível como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> por combustível

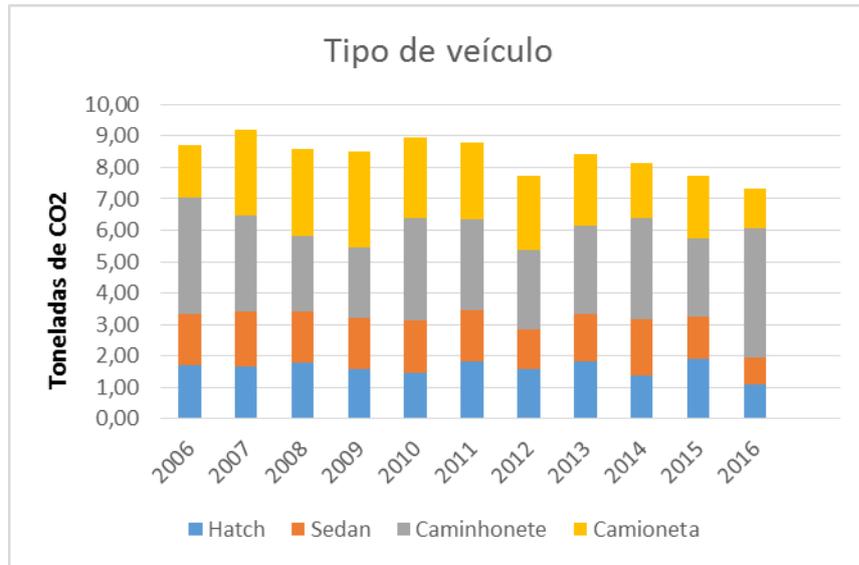
Ano	Fator de Emissão por combustível (Kg/L)	
	Gasolina	Diesel
1990	2,261	2,686
1991-1997	2,261	2,674
1998	2,243	2,646
1999	2,232	2,631
2000	2,220	2,613
2001-2004	2,212	2,603
2005-2014	2,212	2,603

Fonte: CETESB (2017) – Adaptado.

### 3.5.2 Emissões

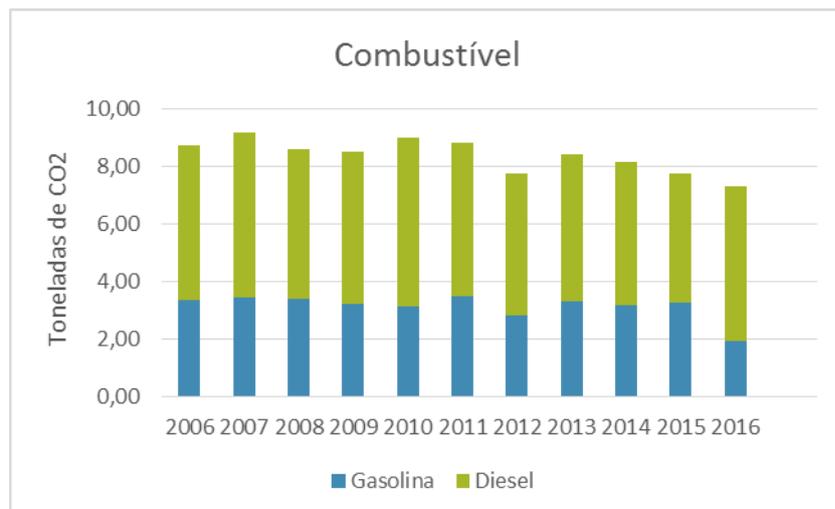
As Figuras 12 e 13 apresentam as emissões em toneladas de CO<sub>2</sub> geradas pelos veículos da PF em média por ano de fabricação, por tipo de veículo e por combustível respectivamente.

Analisando a Figura 12 percebe-se que os veículos que mais contribuíram com emissões de CO<sub>2</sub> no período analisado foram as caminhonetes. Enquanto os veículos hatch foram responsáveis pela emissão de 1.496 toneladas de CO<sub>2</sub>, os sedans contribuíram com 1.930 toneladas, as camionetas com 1.782 e as caminhonetes geraram aproximadamente 3.254 toneladas de dióxido de carbono em 2018.

Figura 12 - Emissões de CO<sub>2</sub> por tipo de veículo

Fonte: O Autor (2019).

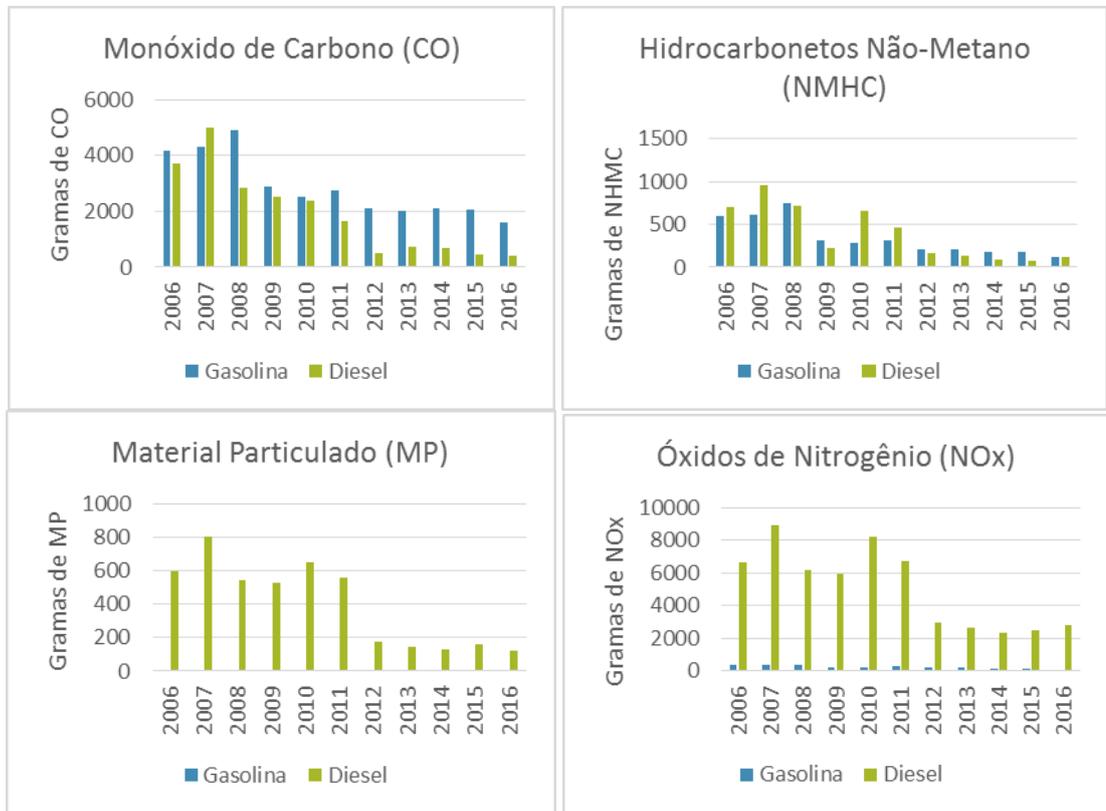
As médias de emissões de gás carbônico dos veículos movidos a gasolina com data de fabricação no período analisado tiveram uma redução de 42%, o que corresponde a quase 710.000 quilogramas de CO<sub>2</sub> por veículo no ano de 2018. Já os veículos abastecidos com diesel mantiveram praticamente constantes os níveis de emissões entre 2006 e 2016, apesar de apresentarem queda nos anos anteriores.

Figura 13 - Emissões de CO<sub>2</sub> por tipo de combustível

Fonte: O Autor (2019).

A Figura 14 apresenta os dados de emissões dos demais poluentes estudados neste trabalho por tipo de combustível.

Figura 14 - Emissões de poluentes por tipo de combustível



Fonte: O Autor (2019).

A análise dos dados demonstra que a redução média de emissões de veículos movidos a gasolina com data de fabricação no período analisado foi de 62% para CO, 81% para NMHC, 23% para material particulado e 78% para NO<sub>x</sub>. Em relação aos veículos abastecidos com diesel a redução das emissões dos poluentes indicados é mais relevante: 88% para CO, 83% para NMHC, 80% para MP e 58% para NO<sub>x</sub>.

#### 4 METODOLOGIA

Para a resolução do problema apresentado foi elaborada uma metodologia que aplica técnicas de Engenharia Econômica e Estatística Multivariada. A Figura 15 apresenta um esquema do método que será aplicado nesta pesquisa.

Figura 15 - Esquema da metodologia aplicada



Fonte: O Autor (2019).

A primeira etapa será a coleta e análise dos dados constantes do Sistema de Viaturas da PF e de outras fontes como o sítio eletrônico da Agência Nacional do Petróleo e da tabela Fipe. Com essas informações serão definidos os indicadores de gestão de frota mais adequados, como os custos equivalentes anuais. A partir de uma análise de regressão, serão identificadas as variáveis que explicam significativamente a variação dos custos operacionais. Por fim, duas técnicas multivariadas serão aplicadas, a primeira para definir os grupos de estados com o comportamento mais semelhante dos dados e a segunda fará uma ordenação dos veículos de cada grupo em termos da condição que apresentam com o intuito de priorizar a substituição daqueles em pior situação.

## 4.1 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Todos os dados analisados referentes à frota da PF foram retirados do Sisvia. O sistema começou a ser implementado no final de 2017 em substituição a outro que não atendia mais às necessidades da instituição devido às novas exigências legais. Entretanto, por ser relativamente recente, ainda há resistência para seu uso por parte de alguns servidores.

O sistema possui vários campos, mas os principais são as características do veículo como marca, modelo e identificação. Outras informações importantes que devem ser inseridas são o ano de fabricação e a quilometragem atualizada. Por último, devem ser informadas pelos gestores de frota todas as despesas com manutenção tanto preventiva quanto corretiva e com abastecimento pelo tipo de combustível.

Durante a coleta de dados foi identificada uma grande quantidade de erros de digitação e uma baixa adesão de algumas unidades no cadastro dos veículos, o que acarretou em um processo de análise mais atento e a exclusão de vários veículos do estudo por causa de dados incorretos ou inconsistentes. Para o presente estudo, o ano de 2018 foi considerado como ano base e foram coletados os dados descritos nas subseções a seguir para definição dos indicadores e elaboração dos modelos apresentados neste capítulo.

### 4.1.1 Custos operacionais ou Custo Total Médio (CTM)

Os Custos operacionais são formados por:

- *Custos de manutenção*: foram consideradas as despesas preventivas como troca de óleo e substituição de peças como pneus e bateria assim como as despesas corretivas, que ocorreram em razão das condições de operação como motor, suspensão e ar condicionado;
- *Custos de abastecimento*: foram consideradas todas as despesas com combustível, inclusive analisando o preço médio da gasolina e do diesel por estado no ano de 2018 segundo levantamento da Agência Nacional do Petróleo (ANP).

#### 4.1.2 Custo de Revenda

Os custos de revenda foram retirados do índice de preços médios de veículos publicado pela Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (Fipe) em seu sítio eletrônico. Foram considerados os modelos e anos dos veículos em posse da Polícia Federal analisados no presente estudo.

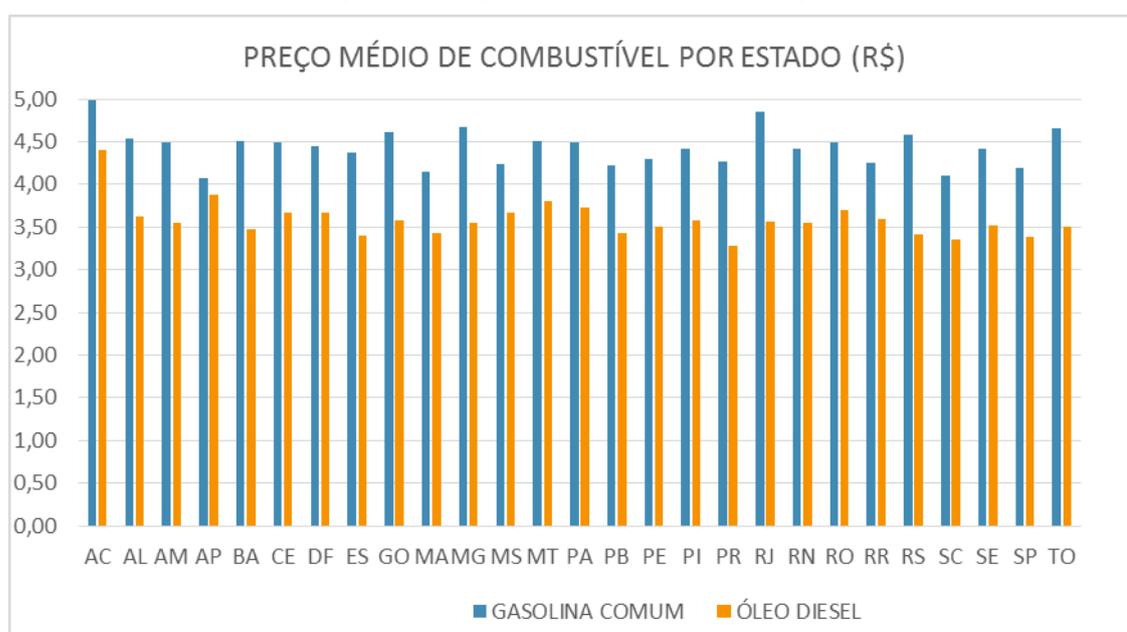
#### 4.1.3 Custo de Aquisição

Os valores considerados foram os preços dos veículos adquiridos na última licitação realizada pela instituição no ano de 2016 onde foram adquiridos cerca de 1.000 veículos de vários tipos e modelos.

#### 4.1.4 Preço médio do combustível por estado

O preço dos combustíveis é outro parâmetro importante que impacta relevantemente nos custos operacionais. A Figura 16 apresenta os preços médios por unidade federativa do valor da gasolina e do óleo diesel no ano de 2018.

Figura 16 - Preços médios dos combustíveis por estado



Fonte: Agência Nacional do Petróleo (ANP) – Adaptado.

Em relação ao preço da gasolina a variação foi de 18% entre o estado com valor mais alto (Acre) e o de menor valor (Amapá), ambos da Região Norte. Quanto ao óleo diesel essa diferença foi de 25% entre os estados do Acre com o preço médio mais alto e o Paraná com o menor (um estado da Região Norte e outro do Sul).

## 4.2 DEFINIÇÃO DOS INDICADORES

Os principais objetivos para a definição de políticas de gestão de frota eficientes são:

- (i) Reduzir custos de manutenção e abastecimento;
- (ii) Diminuir o número de falhas em operação;
- (iii) Manter frota apta para operar;
- (iv) Evitar acidentes;
- (v) Manter frota em conformidade com os padrões de emissões.

Os objetivos (i), (ii), (iii), (iv) e (v) estão diretamente relacionados, respectivamente, a critérios econômicos, confiabilidade dos veículos, disponibilidade da frota, segurança e critérios ambientais e, para alcançá-los, faz-se necessária a determinação de indicadores.

Segundo Matos (2017), um indicador traduz o objetivo (que é descritivo) em um número, por meio de um método de cálculo, tornando-o mensurável, ou seja, o número obtido deve sempre ser interpretado, considerando restrições e fatores subjetivos ao processo em análise. Quanto menor o efeito das subjetividades, melhor será o indicador e quando não houver um único número que expresse claramente o objetivo, deve-se avaliar uma composição. Portanto, é comum utilizar um grupo de indicadores para avaliar se um objetivo está sendo alcançado.

As características para indicadores eficientes são:

- Estabilidade: indicadores devem ser o mais estáveis possível, isto é, representativos e comparáveis em dimensões diferentes, reagindo proporcionalmente às variações operacionais e reduzindo o máximo esse efeito sobre os resultados obtidos. Por exemplo, diferentes tamanhos de frota, variação da quilometragem ou horas de operação. Assim, em geral, indicadores devem ser proporcionais, uma relação entre, no mínimo, duas variáveis. Exemplos: custo de manutenção (R\$/km; R\$/h; R\$/veículo); padrão de emissões (% reprovações; multas/veículo);

- Simplicidade: quanto mais simples, melhor será o entendimento;
- Baixo custo: se requerer muitos recursos para obter os dados para cálculo, perde-se a aplicabilidade do indicador;
- Rastreabilidade: todos os resultados devem ser auditáveis, ou seja, ter a capacidade de resgatar a base de dados que o originou;
- Seletividade: O excesso de indicadores é tão ruim quanto a falta. O melhor sempre será monitorar apenas os fatores considerados críticos para a capacitação ou desempenho do setor e, a partir deles, desenvolver camadas de análise buscando estruturar relações de causa e efeito.

#### **4.2.1 Indicadores econômicos/logísticos**

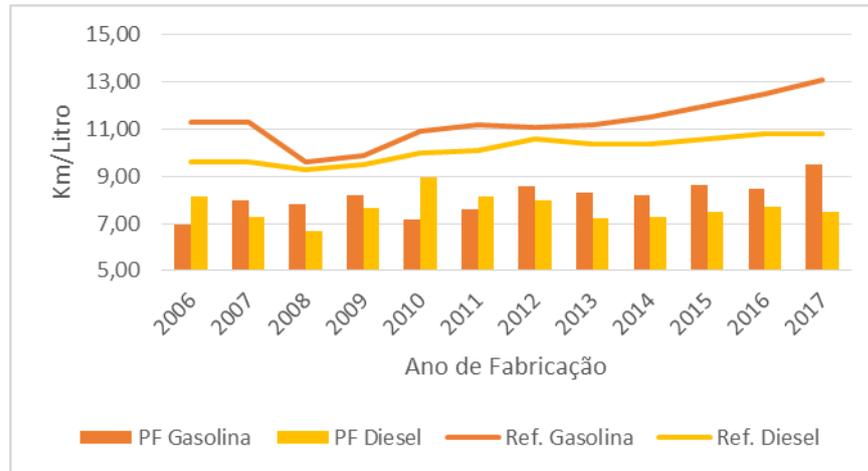
Neste tópico serão apresentados os indicadores econômicos e logísticos aplicados no desenvolvimento da metodologia apresentada.

##### **4.2.1.1 Rendimento**

Esse parâmetro é calculado em quilômetros por litro de combustível (km/L) e tem impacto tanto nos aspectos econômicos quanto ambientais. Veículos com rendimento baixo consomem mais combustível e conseqüentemente ocasionam mais emissões de gases por quilômetro rodado. Para efeito de comparação do rendimento da frota da PF com a o da frota convencional, foram utilizados como referência os dados extraídos do Relatório de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo 2017 e o resultado é apresentado na Figura 17.

Nota-se da análise do gráfico que o rendimento da frota da PF é consideravelmente menor do que o constante do relatório da CETESB. Isso pode se dever ao fato de as viaturas policiais serem mais exigidas em razão das atividades exercidas.

Figura 17 - Comparação do rendimento da frota com a referência



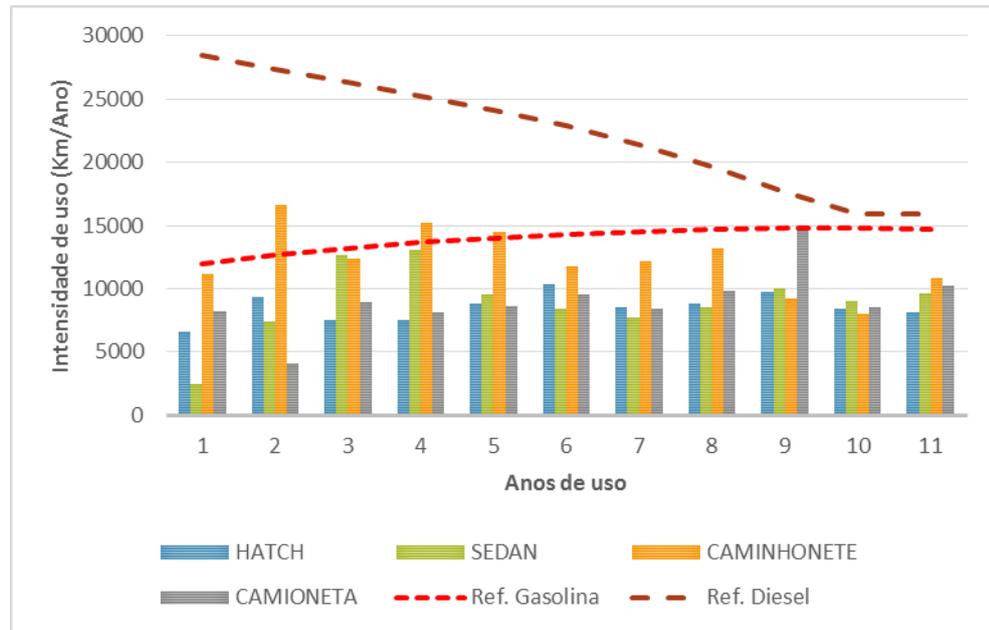
Fonte: O Autor (2019).

#### 4.2.1.2 Intensidade de uso (Km/ano)

Análise semelhante ao rendimento foi feita em relação à intensidade de uso (quilômetros rodados) dos veículos ao longo dos anos. A referência foi o Relatório da CETESB 2017 que também dividiu os veículos por tipo de combustível e os resultados são apresentados na Figura 18.

Considerando que os veículos tipo Hatch e Sedan utilizam gasolina e as Caminhonetes e Camionetas são abastecidas com Diesel, as comparações são feitas com as suas respectivas referências. Observa-se que os veículos da PF, em média, rodam menos durante o ano comparados com a média nacional, mas o comportamento das caminhonetes é similar com uma tendência de queda ao longo do tempo enquanto os demais veículos não apresentaram padrão definido durante o período analisado.

Figura 18 - Comparação da intensidade de uso da frota com a referência



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.2.1.3 Relação Efetivo por Frota de veículos

Outro indicador relevante é a relação entre o número de servidores e a quantidade de veículos disponíveis em determinada unidade da instituição. Teoricamente quanto maior for esse índice, maiores serão os custos operacionais da unidade visto que a utilização dos veículos será mais intensa e, em média, esses equipamentos circularão mais. A Tabela 9 apresenta essa relação por estado.

Tabela 9 - Relação Efetivo/Frota por estado (continua...)

UF	Efetivo/frota	UF	Efetivo/frota
AC	2,09	PB	1,75
AL	1,54	PE	1,96
AM	2,18	PI	1,86
AP	2,46	PR	2,16
BA	1,70	RJ	1,86
CE	1,69	RN	1,91
DF	1,82	RO	1,96
ES	1,91	RR	1,83

GO	2,00	RS	2,15
MA	1,89	SC	1,92
MG	1,71	SE	1,83
MS	1,90	SP	1,83
MT	1,78	TO	1,78
PA	2,17		

Fonte: O Autor (2019).

#### 4.2.1.4 Custo Equivalente Anual (EAC)

O intervalo ideal entre substituições é obtido a partir dos Custos Equivalentes Anuais (*Equivalent Annual Costs* – EAC), calculado de acordo com a Equação 4 (Jardine & Tsang, 2013).

$$EAC(n) = \frac{A + (\sum_{t=1}^n C_t r^{t-1}) - S_n r^n}{1 - r^n} \cdot i \quad (4)$$

Em que:

1.  $A$  é o custo de aquisição do equipamento.
2.  $C_t$  é o custo de manutenção e operação no  $t$ -ésimo período, assumindo ser pago no fim do período,  $i = 1, 2, \dots, n$ .
3.  $S_n$  é o valor de revenda do equipamento no final do  $n$ -ésimo período de operação,  $i = 1, 2, \dots, n$ .
4.  $r$  é o fator de desconto.
5.  $i$  é a taxa econômica de reajuste.
6.  $n$  é a idade em períodos (como anos) do equipamento quando substituído.
7.  $EAC(n)$  é o custo equivalente anual para o ano  $n$ .

O momento ótimo de substituição será quando o EAC for mínimo no período de tempo considerado. O fator de desconto  $r$  é calculado em função da taxa econômica  $i$  conforme a equação 5. A taxa econômica  $i$  representa a taxa econômica utilizada, por exemplo, índice geral de preços do mercado (IGP-M), índice nacional de preços ao

consumidor amplo (IPCA), índice geral de preços – disponibilidade interna (IGP-DI), dentre outras disponíveis no mercado.

$$r = \frac{1}{(1+i)} \quad (5)$$

Por fim, após a mensuração dos valores dos custos equivalentes anuais, estes serão divididos pela intensidade de uso (km/ano) e será encontrado o indicador de custos por quilômetro (R\$/km).

#### 4.2.2 Indicadores ambientais

Os indicadores apresentados neste tópico são referentes aos impactos ambientais causados pelas emissões de poluentes dos veículos automotores e os custos financeiros decorrentes que podem ser mensurados.

##### 4.2.2.1 Estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida dos carros

A seguir, apresenta-se o método utilizado por Kagawa et al (2013) para estimar o ciclo de vida do CO<sub>2</sub> dos carros da instituição. Se o consumo médio de combustível (km/l) de um automóvel fabricado no ano  $n$  é representado por  $c_{med}(n)$  e a quilometragem anual média de um veículo for representada por  $q$  (km), o consumo anual de combustível deste veículo  $C_{Anual}(n)$  pode ser calculado usando a Equação 6:

$$Cb_{Anual}(n) = \frac{q}{c_{med}(n)} \quad (6)$$

Portanto, as emissões de CO<sub>2</sub> do tanque para a roda (*tank to wheel*) derivadas do consumo de combustível gerado durante o uso do carro,  $R_g(s)$ , podem ser estimadas como mostrado abaixo (Equação 7) usando emissões específicas,  $f_g$ , (Tabela 8) que representam emissões de CO<sub>2</sub> (t CO<sub>2</sub>-eq) diretamente produzidas pela combustão de 1 litro de combustível.

$$R_g(s) = Cb_{Anual}(n) \cdot f_g = \frac{q}{c_{med}(n)} \cdot f_g \quad (7)$$

#### 4.2.2.2 Emissões dos demais poluentes

O cálculo das emissões dos demais poluentes analisados utilizou os valores dos fatores de emissão apresentados na Tabela 2 para cada caso e foram multiplicados pela distância média percorrida pelos veículos durante o ano de 2018.

O custo total de emissão dos poluentes analisados  $C_{TOTAL}$  é calculado pela Equação 8:

$$C_{TOTAL} = \sum_{POL} EF_{POL} \cdot q \cdot C_{POL} \quad (8)$$

em que:

$EF_{POL}$  é o fator de emissão do poluente em g/km;

$q$  é a distância percorrida durante o ano em km;

$C_{POL}$  é o custo dos danos ambientais de cada poluente em R\$.

#### 4.2.2.3 Custos ambientais

Neste tópico serão apresentadas as duas metodologias apresentadas nesta pesquisa que mensuram os custos econômicos decorrentes dos danos ambientais causados pelas emissões de gases poluentes gerados pelos veículos automotores.

##### 4.2.2.3.1 Metodologia ExternE

Os dados da Tabela 1 fornecem um ponto de partida para discussões sobre os custos das emissões. Os dados são determinados usando metodologias e práticas padrão, no entanto, os valores resultantes têm um alto grau de incerteza. Por exemplo, os estudos da ExternE na União Europeia, dos quais os dados da Tabela são derivados, relataram que os custos de danos unitários das emissões de CO<sub>2</sub> no intervalo de confiança de 95% variam de US\$ 0,005 / kg a US\$ 0,19 / kg (Comissão Européia, 1997). Devido ao elevado grau de incerteza nos dados deste tipo, os valores da Tabela 1 são considerados ilustrativos e são utilizados apenas para fornecer uma indicação de como a substituição ideal do veículo, baseada exclusivamente nos

custos externos dos poluentes atmosféricos, pode variar da base da massa de emissões individuais ou custos privados (Spitzley et al, 2005).

#### 4.2.2.3.2 *Crédito Carbono*

Há um consenso crescente entre governos e empresas sobre o papel fundamental da precificação de carbono na transição para uma economia descarbonizada. Para os governos, a precificação de carbono é um dos instrumentos do pacote de políticas climáticas necessário para reduzir as emissões. Na maioria dos casos, é também uma fonte de receita, o que é particularmente importante em um ambiente econômico de restrições orçamentárias. O preço do carbono pode assumir diferentes formas. No presente estudo, a precificação de carbono refere-se a iniciativas que estabelecem um preço explícito nas emissões de GEE, ou seja, um preço expresso como um valor por tonelada de equivalente de dióxido de carbono (tCO<sub>2</sub>e).

### 4.3 ANÁLISE PRELIMINAR

O objetivo típico dos problemas de substituição de veículos é encontrar o tempo em que o custo total é minimizado. Preliminarmente serão mensurados, dentre os indicadores apresentados, quais os mais significativos que serão utilizados na metodologia desenvolvida.

#### 4.3.1 **Análise da Regressão**

Neste tópico será realizada uma análise de regressão para identificar quais variáveis influenciam de forma significativa o custo total médio. A Tabela 10 apresenta os resultados desta análise.

Em um primeiro momento a idade média dos veículos ser negativamente relacionada com os custos parece ser incompatível. Contudo, frequentemente ocorre na instituição que à medida que os veículos vão se tornando menos confiáveis devido à idade e a quilometragem avançadas, esses equipamentos vão sendo menos utilizados gastando menos combustível e a manutenção realizada é básica o suficiente para que o veículo não quebre. Em último caso

esses veículos são abandonados nos depósitos esperando o momento de serem vendidos em leilão, o que pode levar anos.

Tabela 10 - Estimação do modelo (variável dependente: Custo Médio Total – R\$)

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>
Idade Média (anos)	-1234	507	0,024**
Situação Estradas (%)	6435	2865	0,036**
Quilometragem Média (km)	0,0103	0,0174	0,561
Área (km <sup>2</sup> )	-0,00062	0,00189	0,746
Intensidade Uso (km/ano)	0,251	0,126	0,061*
Relação Efetivo/Frota	621	714	0,395
Preço médio combustível (R\$)	6977	2450	0,010***
Rendimento (km/L)	298803	298803	0,848

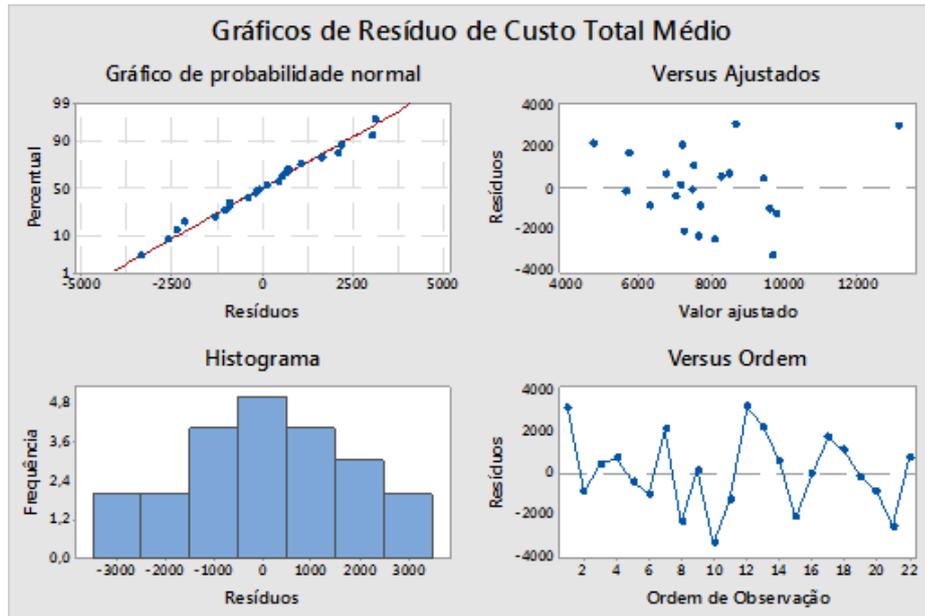
Fonte: O Autor (2019).

\*\*\*, \*\*, \* Coeficiente significativo para 1%, 5% e 10% respectivamente

Em razão disso, como a idade média não representa fidedignamente o comportamento dos veículos em relação aos seus custos operacionais e com os resultados encontrados na análise da regressão, para a presente pesquisa, foram consideradas somente as variáveis que apresentaram valor  $p$  inferior a 10% e coeficientes positivos, ou seja, que impactaram positivamente no aumento dos custos operacionais. Para verificar a significância destes preditores foi realizada uma análise dos resíduos através do *software* Minitab® e os resultados são apresentados na Figura 19.

O histograma claramente apresenta forma de sino, o que indica uma situação de normalidade no comportamento dos resíduos. O gráfico de probabilidade revela leves desvios da linearidade nas pontas inferiores e superiores, mas, em geral, o gráfico também é consistente com a hipótese de normalidade. O gráfico da sequência de resíduos não demonstra que haja autocorrelação entre os erros.

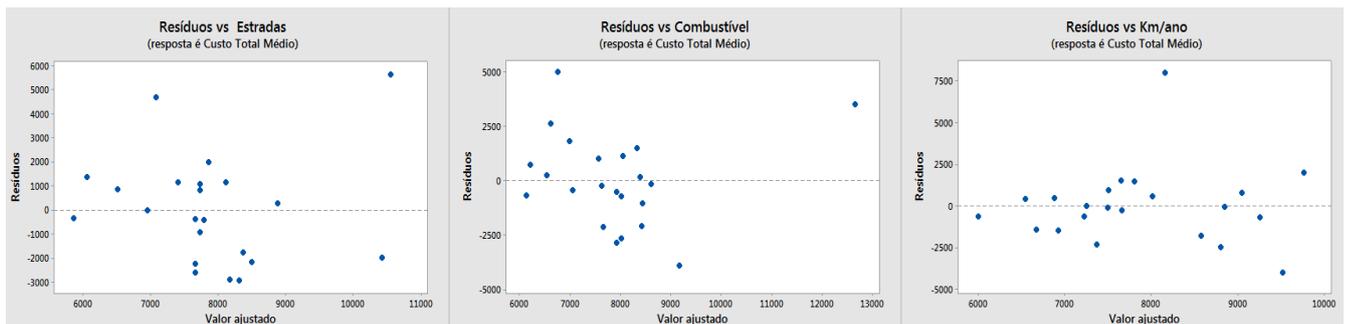
Figura 19 – Análise dos Resíduos



Fonte: O Autor (2019).

Para o teste de heteroscedasticidade, o gráfico dos resíduos contra os valores ajustados não apresenta nenhum padrão claro, indicando uma situação de homoscedasticidade, contudo serão analisados os gráficos dos resíduos contra cada preditor isoladamente e o resultado é demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Gráficos dos resíduos contra cada preditor



Fonte: O Autor (2019).

Os gráficos de resíduos para os três preditores mostram que não há padrão “leque” ou “funil” pronunciados consistentes, portanto, isso favorece a hipótese de homoscedasticidade (variância constante). Com os resultados apresentados, podemos considerar que as três

variáveis analisadas influenciam significativamente na variação dos Custos Médios dos veículos.

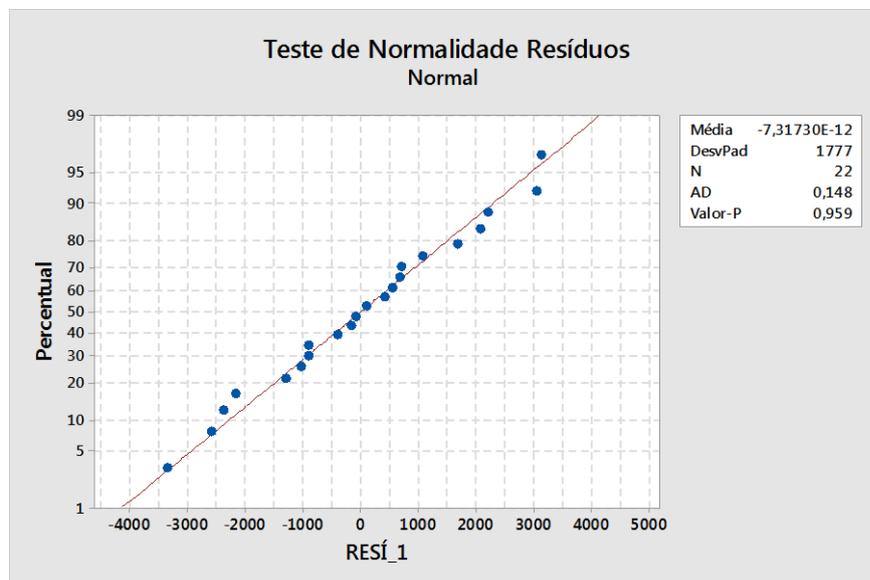
Por último será realizado o *teste de Anderson Darling (A-D)*, um dos mais amplamente utilizados para não normalidade por causa de seu poder (Doane & Seward, 2014). O teste A-D é baseado em um gráfico de probabilidade. Quando os dados se ajustam bem à distribuição hipotética, o gráfico estará próximo a uma reta.

As hipóteses para o teste Anderson Darling são:

- $H_0$ : os dados seguem uma distribuição normal;
- $H_1$ : os dados não seguem uma distribuição normal.

Se o valor- $p$  do teste for menor que o nível de significância considerado pode-se concluir que os dados não seguem a distribuição especificada. Além disso, em geral, quanto melhor a distribuição se ajusta aos dados, menor será a estatística A-D. A Figura 21 exibe o gráfico de probabilidade e a estatística A-D para os dados analisados.

Figura 21 – Teste de normalidade da Regressão



Fonte: O Autor (2019).

A estatística de Anderson Darling encontrada foi igual a 0,148 e o valor- $p$  mensurado teve valor de 0,959. Esses resultados indicam forte evidência de que os dados avaliados provêm de uma distribuição normal.

#### 4.4 APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

Em razão da dificuldade de se trabalhar com o planejamento de aquisição e renovação da frota de 26 estados e o Distrito Federal separadamente, será realizada uma análise de agrupamentos (*clusters*) para separar os estados por suas similaridades em relação aos indicadores mais significativos considerando os resultados da análise da regressão mensurados no item anterior.

Para definir um *ranking* com os veículos com escores mais elevados sendo aqueles que devem ser substituídos primeiramente, será utilizada a técnica de estatística multivariada da análise de componentes principais sendo utilizados neste método os indicadores que explicam o comportamento dos veículos. A aplicação destes dois métodos será demonstrada no Capítulo 5.

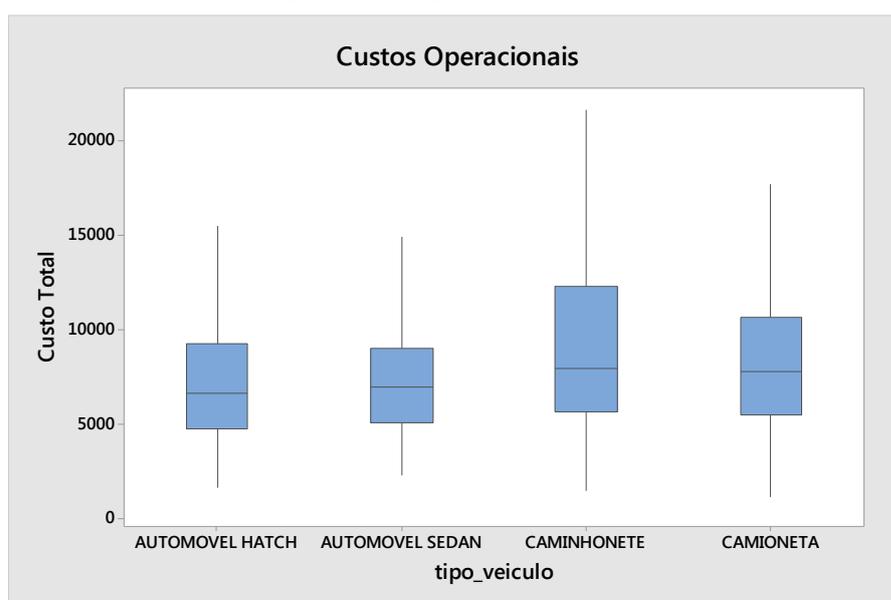
## 5 ESTUDO DE CASO

Atualmente, a Polícia Federal é uma instituição que goza de considerável credibilidade junto à população, sendo uma das principais referências positivas da ação estatal. Porém, a manutenção desses índices de aprovação e confiança passa necessariamente por medidas que possibilitem à PF estar equipada, de forma padronizada, para atuar de forma similar em todo o território nacional.

### 5.1 CONTEXTO DA POLÍCIA FEDERAL

O Brasil é um país de dimensões continentais e com grandes diferenças geográficas entre seus estados. É esperado, portanto, que haja significativa dispersão no comportamento dos veículos da frota. Quanto maior a dispersão, mais imprevisíveis eles serão e isso dificulta o planejamento de substituições. Por exemplo, se um item apresenta falhas em uma ampla faixa de quilometragem (entre 60.000 a 150.000km), certamente, haverá maior dificuldade na definição do melhor momento para uma substituição programada. A partir do gráfico da Figura 22, observa-se que há uma maior dispersão dos custos totais para as Caminhonetes e uma menor variação nos Sedans.

Figura 22 - Boxplot dos custos totais



Fonte: O Autor (2019).

Em razão desse comportamento e também por serem os veículos com maior quantitativo na frota e consequentemente os mais relevantes para a instituição, esses dois tipos de veículos foram considerados nos cálculos dos custos equivalentes anuais e posteriormente na análise de componentes principais.

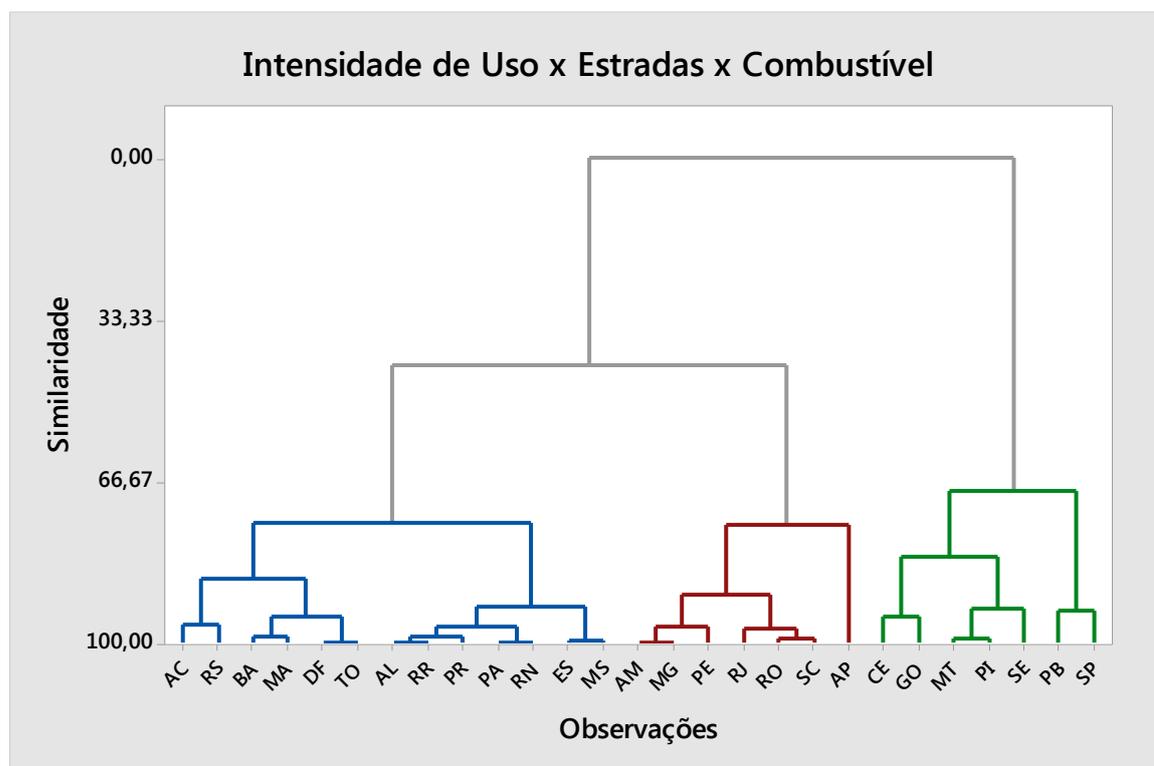
A associação desses fatores explica as dificuldades da gestão de frota da PF. Por consequência, é de se esperar que duas frotas, com o mesmo perfil de equipamentos, tenham diferentes resultados de manutenção, planos e resultados de custo e confiabilidade, bem como recursos necessários para execução das tarefas. Exemplificando: sistemas de ar sofrerão mais em frotas que operem próximo ao mar; pneus sofrerão mais fadiga da carcaça em vias irregulares ou com paralelepípedos; motores e sistema de transmissão serão mais sobrecarregados em rotinas operacionais com alta carga e paradas frequentes; os freios serão menos exigidos em rotas com menos paradas e carga; veículos que trabalhem em regime estacionário, utilizarão mais os sistemas de ar, motriz e elétrico em detrimento da suspensão, transmissão, freios e direção (Matos, 2017).

## 5.2 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

Devido à propriedade da hierarquia, é possível construir um gráfico chamado de dendrograma que representa a “árvore” ou a história do agrupamento. Neste gráfico, a escala vertical indica o nível de similaridade enquanto no eixo horizontal são marcados os elementos amostrais em uma ordem conveniente relacionada à história do agrupamento. As linhas verticais, partindo dos elementos agrupados, têm altura correspondente ao nível em que os elementos foram considerados semelhantes, isto é, a distância do agrupamento ou o nível de similaridade (Mingoti, 2017).

Após a aplicação da análise de agrupamentos (*clusters*), o dendrograma apresentou três grupos distintos. Para analisar a situação da frota, estes grupos de estados com observações similares foram estudados juntos. As variáveis consideradas foram aquelas significativas e positivamente relacionadas em relação aos custos operacionais na análise de regressão, quais sejam, situação das estradas, preço médio de combustível e intensidade de uso. Foram considerados nesta análise os veículos do tipo Sedan e as Caminhonetes (maior amostragem) e o dendrograma resultante é apresentado na Figura 23. O método utilizado foi ligação completa com distância euclidiana.

Figura 23 - Dendrograma com grupos de estados similares em termos de intensidade de uso, qualidade das estradas e preço do combustível



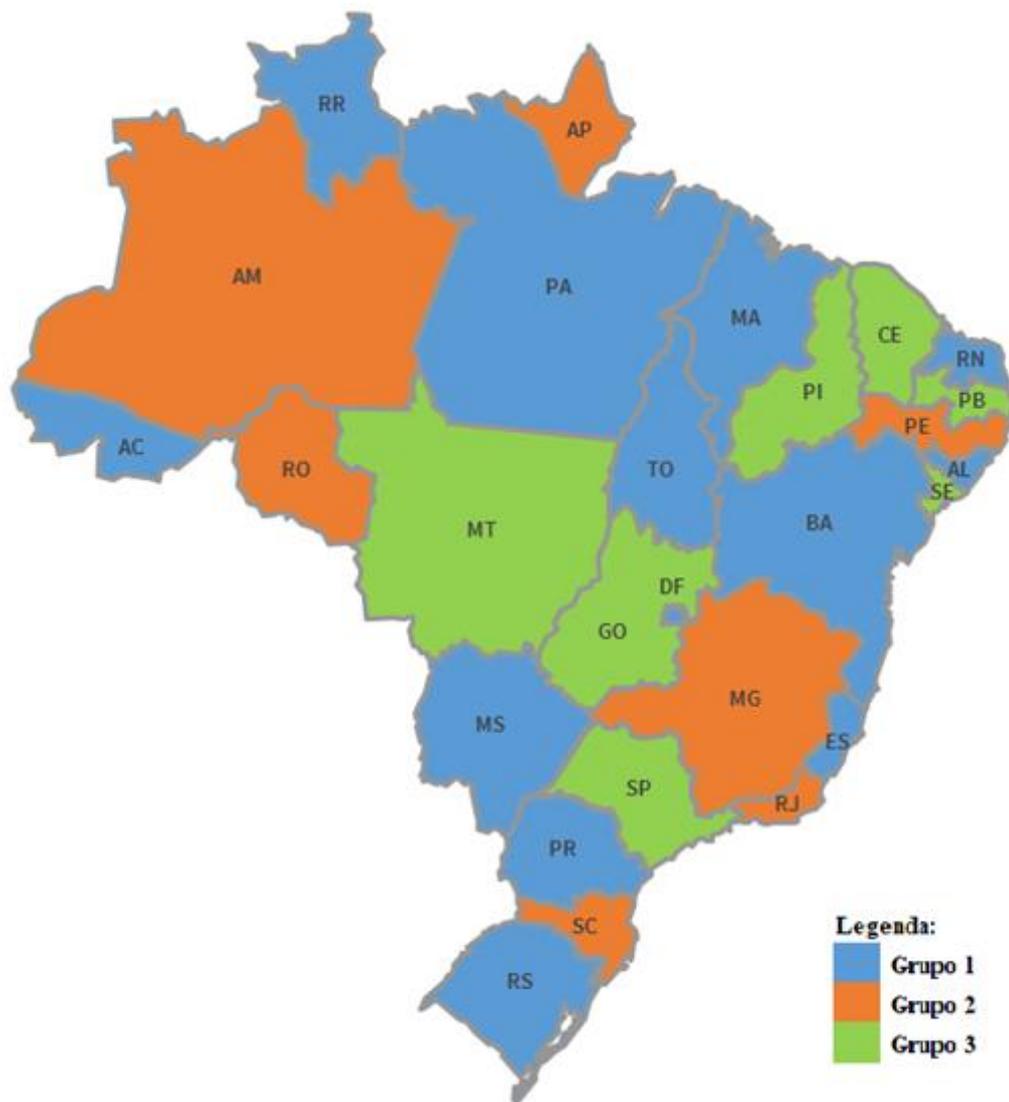
Fonte: O Autor (2019).

Os agrupamentos ficaram assim divididos:

- Grupo 1 (Azul): Acre, Alagoas, Rio Grande do Sul, Bahia, Distrito Federal, Tocantins, Maranhão, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Pará, Rio Grande do Norte, Roraima e Paraná;
- Grupo 2 (Vermelho): Amazonas, Amapá, Minas Gerais, Pernambuco, Rondônia, Rio de Janeiro e Santa Catarina;
- Grupo 3 (Verde): Ceará, Goiás, Mato Grosso, Piauí, Sergipe, Paraíba e São Paulo.

Para melhor visualização dos grupos, a Figura 24 apresenta um mapa com estados de um mesmo grupo com a mesma cor. Observa-se que os estados similares em termos de utilização e que compõem um determinado grupo não são, necessariamente, da mesma região geopolítica e podem estar geograficamente distantes uns dos outros (por exemplo, AC, RN e RS fazem parte do mesmo Grupo 1).

Figura 24 - Divisão dos estados em grupos



Fonte: O Autor (2019).

### 5.3 RESULTADOS

Neste tópico serão definidos os resultados numéricos mensurados aplicando-se as equações apresentadas no Capítulo 2 e as análises decorrentes desses resultados.

### 5.3.1 Custos Equivalentes Anuais

A primeira análise apresenta o cálculo do Custo Anual Equivalente de cada grupo para os veículos do tipo Caminhonete e Sedan. Em um primeiro momento foi considerado o horizonte de tempo de cinco anos, um dos critérios para substituição de veículos constante do Sisvia e será aumentado caso não se encontre o EAC mínimo dentro deste período.

A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados no cálculo além da média e do coeficiente de variação para cada grupo e os resultados dos custos equivalentes anuais para as caminhonetes estão demonstrados na Figura 25.

Tabela 11 – Variáveis utilizadas no cálculo do EAC das Caminhonetes

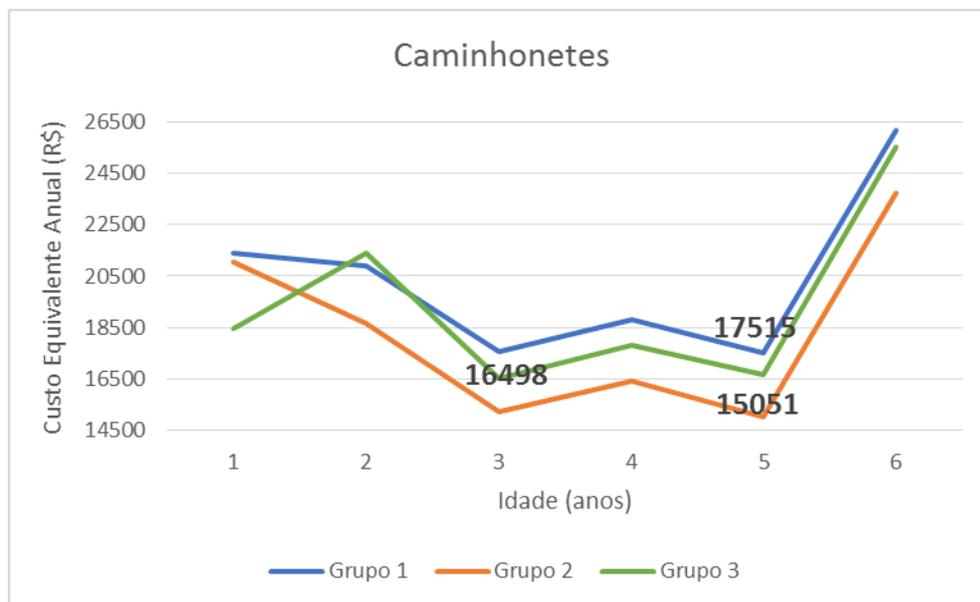
	<b>Idade (anos)</b>	<b>Custos Operacionais (\$)</b>	<b>Valor de Revenda (\$)</b>
Grupo 1	1	9.678,52	100.457,00
	2	11.996,33	92.067,00
	3	7.691,60	88.823,00
	4	8.629,29	74.968,00
	5	9.910,44	72.486,00
	6	6.758,54	70.120,00
	Média	9.110,79	
	CV	20%	
Grupo 2	1	9.347,30	100.457,00
	2	7.847,81	92.067,00
	3	5.199,88	88.823,00
	4	6.071,23	74.968,00
	5	7.122,67	72.486,00
	6	4.431,75	70.120,00
	Média	6.670,10	
	CV	27%	
Grupo 3	1	6.745,67	100.457,00
	2	15.929,38	92.067,00
	3	3.488,57	88.823,00
	4	7.911,73	74.968,00
	5	9.627,49	72.486,00
	6	6.927,06	70.120,00
	Média	8.438,32	
	CV	50%	

Fonte: O Autor (2019).

Segundo Doane & Seward (2014), o coeficiente de variação (CV) é o desvio padrão expresso como uma porcentagem da média e é indicado para comparar a dispersão em conjuntos de dados com médias muito diferentes. No estudo do comportamento das caminhonetes percebe-se que a maior média e o menor CV pertencem ao Grupo 1. Esse fato pode ser explicado pelos valores dos custos operacionais serem os mais elevados dos três grupos, mas com pouca diferença entre os períodos. Já no Grupo 3 o coeficiente de variação foi o mais alto visto que tanto o menor (ano 3) quanto o maior valor de custos (ano 2) no geral pertencem a este grupo. Isso pode ser explicado pela falta de padronização dos estados deste grupo em relação às revisões programadas e ao consumo de combustível.

Da análise do gráfico da Figura 25, depreende-se que tanto no Grupo 1 quanto no Grupo 2 das caminhonetes, o menor valor de EAC foi no quinto ano. Isso indica que, em princípio, o momento ótimo de substituição das Caminhonetes está compatível com a política que se pretende adotar de substituição a cada 5 anos. Contudo, o EAC do Grupo 2 é R\$ 2.464,00 mais barato do que no grupo 1, o que em um período de 5 anos traz um benefício econômico, em média, de  $5 \times 2.464 = \text{R\$ } 12.320,00$ , ou seja, utilizar uma caminhonete nos estados do segundo grupo é consideravelmente mais econômico do que no primeiro.

Figura 25 - EAC das Caminhonetes



Fonte: O Autor (2019).

O resultado para o Grupo 3 foi diferente. Primeiramente o gráfico não apresentou o desenho esperado com o valor do Custo Equivalente no primeiro ano abaixo do segundo. Isso pode ter ocorrido, segundo Jardine & Tsang, (2013), pelo fato de existir um aumento substancial dos custos operacionais no ano 2 em comparação com o ano 1 (para este grupo o custo do ano 2 é cerca de 2,3 vezes o custo do ano 1). Porém, o que o gráfico apresenta é o menor valor de EAC no ano 3, contudo, com valores bem próximos dos encontrados para o quinto ano. Isso sugere que uma substituição das Caminhonetes dos estados do grupo 3 também pode ser considerada após o quinto ano de utilização.

Outro ponto relevante visualizado nos três gráficos consiste nos valores próximos dos custos equivalentes entre o terceiro e quinto ano das caminhonetes. Isso pode ser explicado pelo comportamento similar do EAC das caminhonetes nos três grupos. Apesar dos valores distintos, os custos no terceiro ano caem em relação ao segundo, têm acréscimos nos dois anos subsequentes e no sexto ano sofrem um decréscimo considerável. Avaliando os custos de manutenções preventivas para várias caminhonetes depreende-se que as revisões dos anos 2 e 4 são significativamente mais caras que nos anos anteriores, explicando a queda dos custos nos anos 3 e 5.

A mesma análise foi realizada com os veículos do tipo Sedan com os parâmetros indicados na Tabela 12 e os gráficos dos custos equivalentes anuais para os veículos do tipo Sedan apresentados na Figura 26.

Tabela 12 - Variáveis utilizadas no cálculo do EAC dos Sedans (continua...)

	<b>Idade (anos)</b>	<b>Custos Operacionais (\$)</b>	<b>Valor de Venda (\$)</b>
	1	9.595,55	54.264,00
	2	7.330,79	49.798,00
	3	4.322,64	41.006,00
	4	6.365,68	37.101,00
Grupo 1	5	8.052,46	35.520,00
	6	3.385,50	32.449,00
	7	5.620,10	30.029,00
	8	7.206,84	28.768,00
	Média	6.484,94	
	CV	31%	

	1	5.207,80	54.264,00
	2	6.639,76	49.798,00
	3	8.071,72	41.006,00
	4	8.956,27	37.101,00
Grupo 2	5	8.371,83	35.520,00
	6	8.811,28	32.449,00
	7	10.935,17	30.029,00
	8	10.169,42	28.768,00
	Média	8.395,41	
	CV	22%	
<hr/>			
	1	5.263,29	54.264,00
	2	7.205,93	49.798,00
	3	13.283,20	41.006,00
	4	8.405,84	37.101,00
Grupo 3	5	5.190,83	35.520,00
	6	7.776,15	32.449,00
	7	6.330,65	30.029,00
	8	8.154,16	28.768,00
	Média	7.701,26	
	CV	33%	
<hr/>			

Fonte: O Autor (2019).

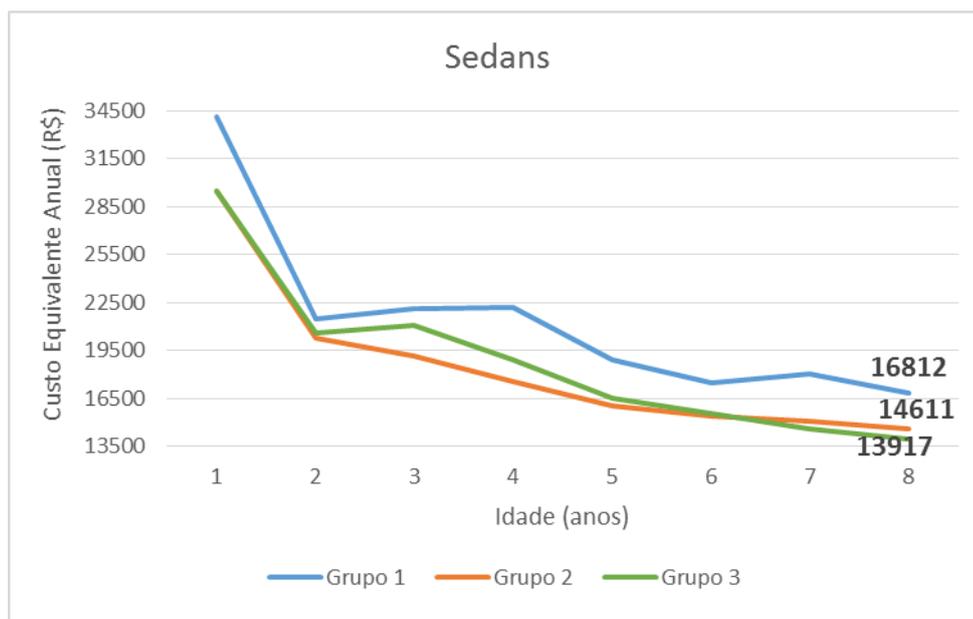
Na análise do comportamento dos veículos do tipo Sedan, os coeficientes de variação dos Grupos 1 e 3 estão bem próximos apesar da diferença considerável das respectivas médias, o que pode indicar perfis de utilização semelhantes, mas custos operacionais discrepantes. Já o Grupo 2 apresentou uma dispersão relativa consideravelmente menor visto que os custos operacionais deste grupo tiveram pouca variação entre os anos estudados demonstrando que tais veículos não sofreram desgaste relevante ao longo do tempo que tenha impactado no aumento de custos.

Para os veículos do tipo Sedan, o custo equivalente mínimo não foi encontrado no horizonte de 5 anos e por essa razão este foi prolongado até o limite de 8 anos, o maior período onde se conseguiram os dados utilizados neste estudo. Em relação aos resultados, primeiramente, na análise do Grupo 1, o menor valor ocorreu primeiramente no sexto ano, mas após um aumento no sétimo ano, teve uma queda e o menor valor ficou no oitavo ano como nos outros grupos.

Para os Grupos 2 e 3 ocorreu que em um período de 8 anos, o EAC decresceu continuamente com um pequeno aumento do segundo para o terceiro ano no gráfico do Grupo

3. Analisando os resultados apresentados nos gráficos destes grupos, fica evidente a semelhança das curvas, com uma diferença no quinto ano de aproximadamente R\$ 400,00 a menos para o Grupo 3.

Figura 26 - EAC dos Sedans



Fonte: O Autor (2019).

Essa situação não indica necessariamente que os veículos destes grupos devam ser substituídos a partir dos 8 anos de fabricação. Na realidade, no presente estudo, a razão para a diminuição do EAC é que, dada a prática estabelecida em algumas unidades da instituição, qualquer custo de manutenção evitável após uma certa idade não é incorrido. Se uma decisão for tomada para aumentar a vida útil após os 5 anos, custos adicionais de manutenção devem ser incorridos nos anos anteriores.

Além disso, no oitavo ano, o EAC do Grupo 2 é cerca de R\$ 500,00 mais alto que o do Grupo 3. Se considerarmos um período de 8 anos para substituição, a economia de rodar com um veículo Sedan nos estados do Grupo 2 comparados ao Grupo 3 será de  $8 \times 500 = \text{R\$ } 4.000,00$  em média.

Pode-se depreender da análise dos gráficos que a utilização dos veículos nos estados do Grupo 1 é, em média, mais severa do que nos outros grupos, visto que os valores dos Custos Equivalentes Anuais foram mais elevados nos dois casos estudados. Essa situação pode ser

explicada por estradas em piores condições, o preço mais alto do combustível e/ou maior quilometragem rodada por ano dos veículos nestes estados.

Para os Grupos 2 e 3 o comportamento dos veículos destes estados foi semelhante, sendo que as Caminhonetes foram mais exigidas nos estados do Grupo 3 enquanto os Sedans foram mais onerosos nos estados do Grupo 2 considerando os Custos Equivalentes Anuais.

No geral, as Caminhonetes apresentaram um ciclo de vida econômica mais curto (5 anos) do que os veículos do tipo Sedan, apesar de serem equipamentos mais robustos. Uma hipótese para este fato é, além de possuírem custos de manutenção mais elevados, a utilização destes veículos em situações que exigem mais do equipamento como estradas não pavimentadas e terrenos irregulares enquanto os Sedans são mais utilizados dentro das cidades com pavimentação melhor e distâncias menores.

### 5.3.2 Custos ambientais

A segunda análise considera os custos ambientais, ou seja, os prejuízos ao meio ambiente e à saúde causados pelas emissões de gases poluentes pelos veículos da frota da PF. Foram considerados dois valores, um máximo e um mínimo, de acordo com o intervalo de custos por tonelada de poluentes apresentado na Tabela 13.

Tabela 12 - Custos das emissões (continua...)

Tipo de veículo	Idade (anos)	Custos Ambientais (R\$/tonelada)	
		Máximo	Mínimo
Caminhonetes	1	1.637,43	260,59
	2	1.203,15	142,84
	3	1.414,60	207,82
	4	1.229,98	162,84
	5	1.243,38	147,16
	6	3.057,14	195,88
	7	3.775,00	202,59
	8	2.623,02	174,91
	9	2.842,68	155,92
	10	4.416,46	472,29

	1	154,21	47,83
	2	248,26	77,53
	3	319,65	99,52
	4	270,19	83,86
Sedans	5	227,95	70,85
	6	301,15	94,00
	7	301,16	94,10
	8	293,25	91,10
	9	302,70	92,75
	10	321,38	102,04

Fonte: O Autor (2019).

A tabela 13 apresenta esses valores para os dois tipos de veículos estudados nesta seção em reais por tonelada dos poluentes dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não-metano (NMHC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP) emitidos no ano de 2018.

Pela análise dos dados, fica evidente o aumento considerável dos custos ambientais decorrentes dos veículos mais antigos em relação aos mais novos. Uma Caminhonete, em média, com 10 anos custaria R\$ 2.779,00 a mais que uma com 1 ano, ou seja, um aumento de 63% no caso mais extremo. Para os Sedans este aumento seria de 52%.

Por outro lado, hipoteticamente, se consideramos os benefícios gerados pela renovação da frota em função dos créditos de carbono que poderiam ser obtidos se a política da instituição fosse considerada no programa *State and Trends of Carbon Pricing* do Banco Mundial, os retornos seriam relevantes. Segundo o Banco Mundial, para cumprir os compromissos do Acordo do Clima de Paris o preço da tonelada de carbono deveria estar entre US\$ 40 a US\$ 80 em 2020 e US\$ 50 a US\$ 100 em 2030.

Para esse cálculo foram considerados os veículos com ano de fabricação de 2006 e 2015 e suas respectivas emissões. A tabela 14 apresenta os valores em toneladas de CO<sub>2</sub>.

Tabela 14 - Emissões em toneladas de CO<sub>2</sub>

<b>Tipo veículo</b>	<b>2006</b>	<b>2015</b>
Sedan	1,646	1,378
Caminhonete	3,687	2,451

Fonte: O Autor (2019).

Se todos os veículos com data de fabricação de 2006 fossem substituídos por veículos de 2015 e esses créditos de carbono pudessem ser vendidos no mercado de valores ao preço de U\$ 80,00 a tonelada, os benefícios seriam da ordem de U\$ 21,00 por Sedan. As Caminhonetes, por sua vez, neste intervalo de 10 anos, trariam uma economia aproximada de U\$ 99,00 por veículo, considerando a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e o custo carbono estimado de U\$ 80,00.

Os valores mensurados dos custos ambientais foram incorporados aos custos operacionais e então foram calculados novos custos equivalentes anuais. Contudo, devido à magnitude destes valores ser bem menor que a dos custos operacionais, eles não levaram à alteração do período ótimo de substituição e por essa razão não foram apresentados. No entanto, o cálculo dessas emissões e custos no mínimo informa sobre o impacto da frota da PF para o meio ambiente e a sociedade e devido à sua relevância, este indicador foi considerado na análise dos componentes principais.

### **5.3.3 Ordenação dos veículos pela Análise dos Componentes Principais**

Em razão de restrições orçamentárias e da grande quantidade de veículos da instituição em condições de substituição e mesmo com a divisão dos grupos formados na análise de agrupamentos, estes dificilmente poderão ser trocados em um mesmo momento. Por conseguinte, a definição de um *ranking*, considerando os indicadores desenvolvidos neste trabalho, poderá ser uma opção objetiva para a seleção dos veículos em piores condições que serão substituídos prioritariamente a cada período de troca mensurado pela análise do Custo Equivalente Anual.

Para a presente análise foram considerados os Custos Equivalentes Anuais (EAC), a Idade, o Hodômetro (quilometragem) e a quantidade de Emissões de poluentes por ano de cada veículo. Através da Análise dos Componentes Principais (PCA) estas variáveis foram transformadas em três componentes principais normalizados utilizando-se o *software* Minitab® e foram mensurados os escores do primeiro componente desses veículos para se realizar sua ordenação considerando os grupos formados na análise de *clusters*. Por fim, ilustrativamente, será apresentada uma lista com os vinte piores veículos do tipo Sedan e Caminhonete de cada grupo que deverão ter prioridade na substituição.

Segundo Loesch & Hoeltgebaum (2012) para determinar o número de componentes principais a considerar podem ser utilizados dois critérios:

- Reter os componentes principais cujos autovalores, caso padronizados, sejam maiores que 1;
- Reter tantos componentes principais até que o valor acumulado atinja um mínimo aceitável, como 0,7.

No presente estudo, nos três grupos, pelo menos um desses critérios foi alcançado para os dois primeiros componentes e um único gráfico de escores para cada grupo será necessário com os resultados sendo apresentados nas Tabelas 15, 17 e 19 e nas Figuras 27, 28 e 29 para os grupos 1, 2 e 3 respectivamente. O mesmo gráfico será apresentado de duas formas, uma com a divisão por tipo de veículos e a outra por estados.

### 5.3.3.1 Resultados - Grupo 1

Tabela 15 – Autoanálise da Matriz de Correlação do Grupo 1

a) Autovalores – Grupo 1

	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>
Autovalor	1,6201	1,0158	0,9583	0,4057
Proporção	0,405	0,254	0,240	0,101
Acumulado	0,405	0,659	0,899	1,000

b) Autovetores – Grupo 1

<b>Variável</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>
Idade	-0,595	0,169	-0,515	-0,593
Hodômetro atual	-0,694	-0,113	-0,052	0,709
Emissões/ano	0,013	-0,975	-0,158	-0,154
EAC/Km	0,405	0,087	-0,841	0,349

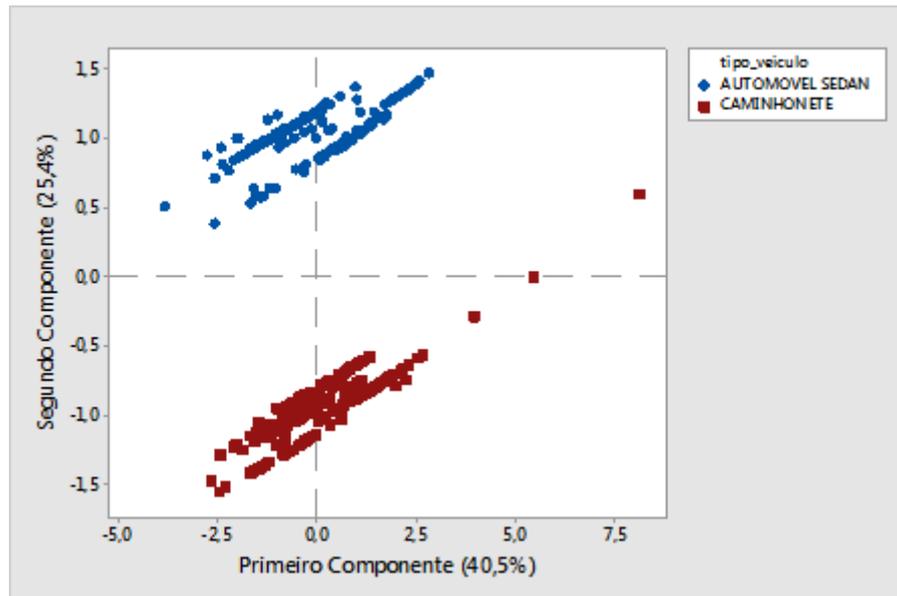
Fonte: O Autor (2019).

Analisando os resultados do primeiro grupo depreende-se que os dois primeiros componentes principais explicam 65,9% da variação dos dados. O gráfico de escores (Figura

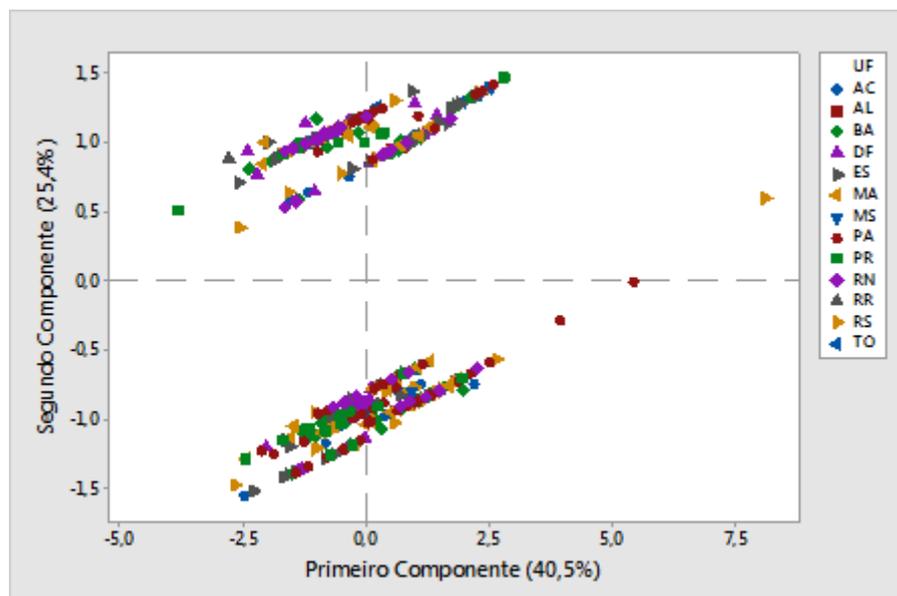
27a) evidenciou a formação de agrupamentos distintos entre os dois tipos de veículos. Na porção superior do gráfico estão os veículos tipo Sedan e na porção inferior as Caminhonetes. No segundo gráfico (Figura 27b), três Caminhonetes podem ser consideradas *outliers*, duas do Pará e uma do Rio Grande do Sul.

Figura 27 - Gráficos de escores-Grupo 1

(a) Por tipo de veículos



(b) Por estados



Fonte: O Autor (2019).

As variáveis que mais contribuem para o primeiro componente principal (PC1) são Hodômetro (-0,694), Idade (-0,595) e EAC/Km (0,405). PC1 pode ser definido como uma comparação entre o índice de desempenho referente à idade e quilometragem com a variável referente ao custo equivalente por quilômetro, uma vez que o valor do coeficiente de emissões/ano é pequeno em comparação com as demais variáveis. O segundo componente principal (PC2) pode ser considerado um índice global de emissões/ano visto que esta variável está fortemente correlacionada (-0,975) com PC2 em comparação com as outras variáveis.

Considerando esta análise e os escores mais significativos de PC1, foi elaborado o ordenamento dos veículos do Grupo 1, fortemente influenciado pelas variáveis Idade e Hodômetro. O *ranking* dos 20 veículos com os escores mais significativos para o primeiro grupo é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Ranking dos 20 piores veículos do Grupo 1

Ordem	UF	Tipo de veículo	Idade	Km	Ordem	UF	Tipo de veículo	Idade	Km
1	PR	SEDAN	15	230.375	11	ES	CAMINHONETE	11	185.374
2	RR	SEDAN	14	177.146	12	DF	SEDAN	15	130.421
3	RS	CAMINHONETE	4	300.765	13	PA	CAMINHONETE	12	162.040
4	ES	SEDAN	15	152.735	14	MA	SEDAN	10	183.304
5	RS	SEDAN	12	189.631	15	MA	SEDAN	14	130.897
6	AC	CAMINHONETE	11	196.928	16	DF	CAMINHONETE	10	180.500
7	PR	CAMINHONETE	12	182.613	17	ES	SEDAN	14	128.400
8	MA	CAMINHONETE	9	220.192	18	BA	SEDAN	10	174.005
9	DF	SEDAN	14	153.766	19	PA	CAMINHONETE	8	196.132
10	BA	SEDAN	11	189.407	20	ES	SEDAN	10	168.065

Fonte: O Autor (2019).

Os 20 primeiros veículos estão bem divididos com 8 Caminhonetes e 12 Sedans. Em relação aos estados também com Espírito Santo com 4, Maranhão e Distrito Federal com 3 e Paraná, Rio Grande do Sul, Bahia e Pará com 2 veículos. Um caso interessante é a Caminhonete da terceira posição que com apenas 4 anos já rodou mais de 300 mil quilômetros. Pode ter ocorrido um erro de inserção desse dado no sistema, mas esse veículo deve ser investigado.

## 5.3.3.2 Resultados - Grupo 2

Tabela 13 - Autoanálise da Matriz de Correlação do Grupo 2

## a) Autovalores – Grupo 2

	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>
Autovalor	2,0432	0,9571	0,7166	0,2831
Proporção	0,511	0,239	0,179	0,071
Acumulado	0,511	0,750	0,929	1,000

## b) Autovetores – Grupo 2

<b>Variável</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>
Idade	0,571	0,109	-0,559	-0,592
Hodômetro atual	0,620	-0,197	-0,186	0,737
Emissões/ano	0,268	0,895	0,342	0,100
EAC/Km	-0,467	0,384	-0,733	0,311

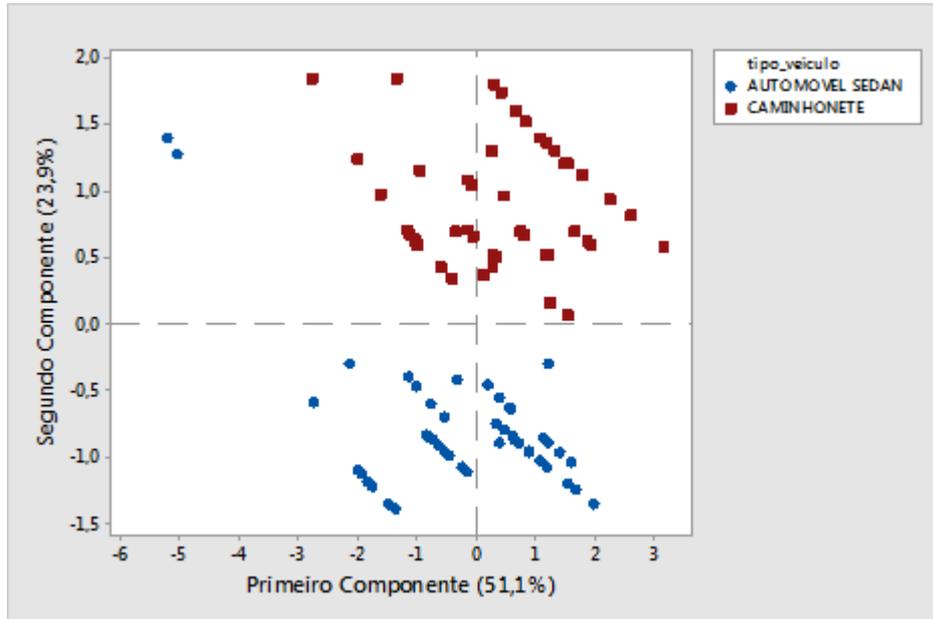
Fonte: O Autor (2019).

Na análise do Grupo 2, percebe-se que 75% da variação dos dados é explicada pelos dois primeiros componentes principais e a posição dos veículos é mais dispersa, porém, assim como no Grupo 1, o gráfico de escores (Figura 28a) apresenta agrupamentos distintos entre os dois tipos de veículos. Neste grupo, na porção superior do gráfico estão as Caminhonetes enquanto que na porção inferior os veículos tipo Sedan. No segundo gráfico (Figura 28b), dois veículos do tipo Sedan podem ser considerados *outliers*, um de Pernambuco e outro do Amazonas.

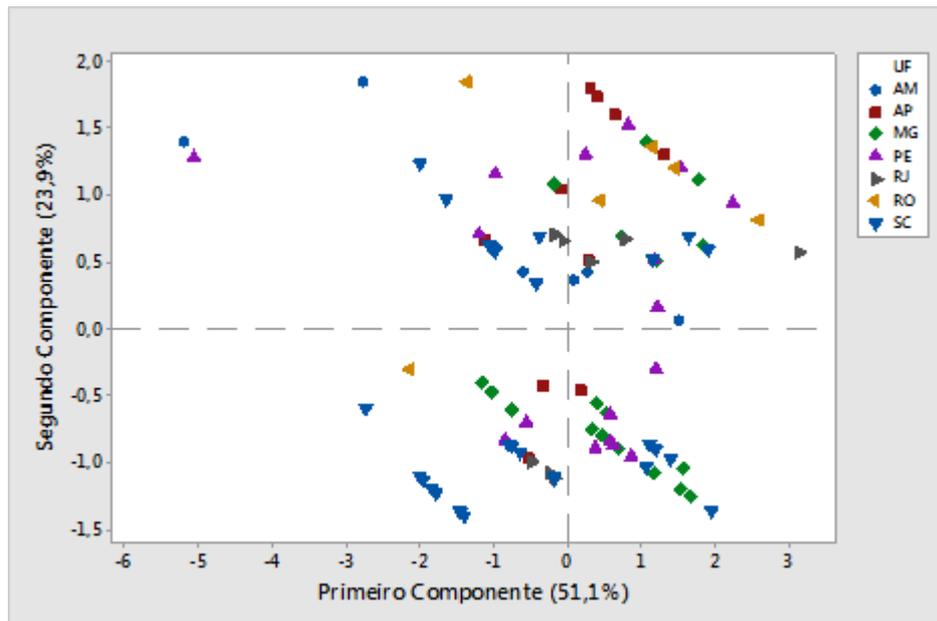
No Grupo 2 as variáveis que mais se correlacionam com o primeiro componente principal (PC1) são Hodômetro (0,620), Idade (0,571) e EAC/Km (-0,467). PC1 pode ser classificado como uma comparação entre o índice de desempenho referente à idade, hodômetro e emissões/ano com o custo equivalente anual. Neste grupo o segundo componente principal pode ser definido como um índice de desempenho formado pelos coeficientes de emissões por ano e o custo equivalente por quilômetro uma vez que as outras variáveis possuem valores pequenos em relação a elas.

Figura 28 - Gráficos de escores - Grupo 2

a) Por tipo de veículos



b) Por estados



Fonte: O Autor (2019).

O ordenamento dos veículos do segundo grupo, também foi fortemente influenciado pelas variáveis Idade e Hodômetro, contudo tanto neste grupo quanto no primeiro, o que ocasionou a discriminação dos agrupamentos entre os tipos de veículos foi PC2 fortemente

correlacionado com a variável Emissões/ano. O *ranking* dos 20 veículos com os escores mais significativos de PC1 para o Grupo 2 é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Ranking dos 20 piores veículos do Grupo 2

Ordem	UF	Tipo de veículo	Idade	Km	Ordem	UF	Tipo de veículo	Idade	Km
1	RJ	CAMINHONETE	12	149.066	11	PE	CAMINHONETE	11	78.697
2	RO	CAMINHONETE	11	129.229	12	MG	SEDAN	10	115.217
3	PE	CAMINHONETE	11	111.456	13	AM	CAMINHONETE	7	120.511
4	SC	SEDAN	10	136.587	14	RO	CAMINHONETE	12	70.515
5	SC	CAMINHONETE	10	108.997	15	SC	SEDAN	11	99.478
6	MG	CAMINHONETE	10	105.600	16	AP	CAMINHONETE	11	69.003
7	MG	CAMINHONETE	11	89.216	17	PE	CAMINHONETE	7	106.122
8	MG	SEDAN	10	121.896	18	PE	SEDAN	12	76.562
9	SC	CAMINHONETE	10	96.020	19	MG	CAMINHONETE	8	92.906
10	MG	SEDAN	11	108.030	20	SC	SEDAN	11	89.755

Fonte: O Autor (2019).

Quanto ao ordenamento dos veículos, dos 20 primeiros 13 são Caminhonetes e 7 são Sedans. Em relação aos estados deste grupo, a ordenação dos 20 veículos em pior situação ficou melhor distribuída. O estado de Minas Gerais apresentou 6 veículos seguido por Santa Catarina com 5 veículos na lista e Pernambuco com 4. Neste grupo quase metade dos veículos (9) possui quilometragem menor que 100.000 quilômetros e já está em condição de substituição em razão da idade avançada.

### 5.3.3.3 Resultados - Grupo 3

Tabela 19 - Autoanálise da Matriz de Correlação

a) Autovalores – Grupo 3

	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalor	1,8346	1,0247	0,8847	0,2560
Proporção	0,459	0,256	0,221	0,064
Acumulado	0,459	0,715	0,936	1,000

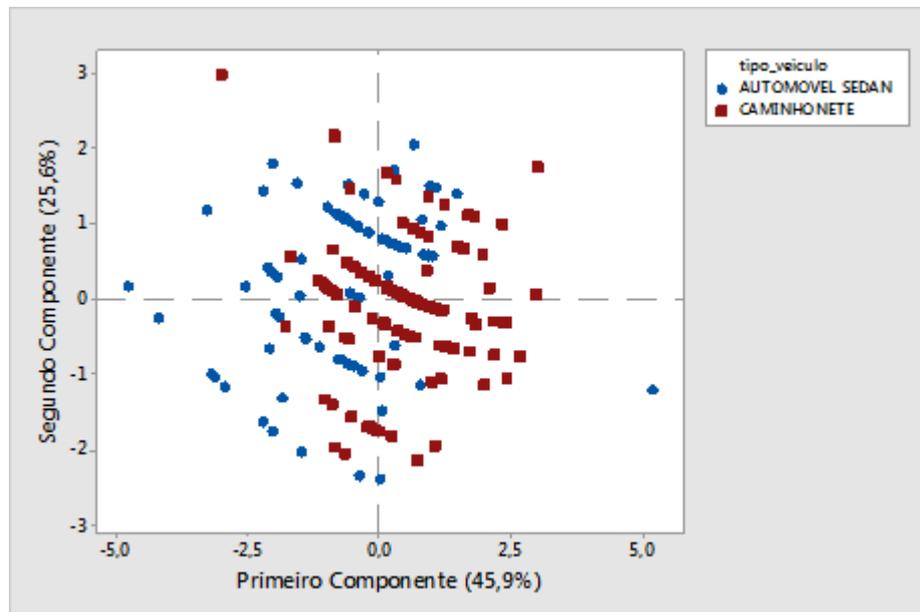
b) Autovetores – Grupo 3

Variável	CP1	CP2	CP3	CP4
Idade	0,281	0,892	0,114	-0,336
Hodômetro atual	0,671	0,025	0,226	0,705
Emissões/ano	0,349	-0,003	-0,936	-0,032
EAC/Km	-0,590	0,452	-0,243	0,623

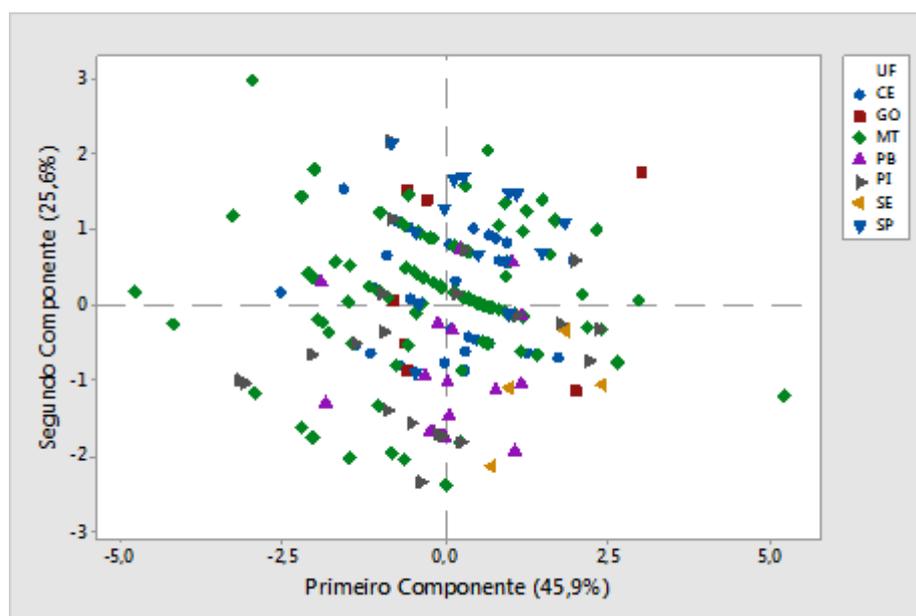
Fonte: O Autor (2019).

Figura 29 - Gráficos de escores - Grupo 3

a) Por tipo de veículos



b) Por estados



Fonte: O Autor (2019).

Os veículos deste grupo ficaram bastante dispersos em relação aos dois componentes principais que explicaram 71,5% da variação dos dados e diferentemente dos dois outros grupos evidenciou pouca discriminação entre os tipos de veículos (Fig. 29a). Neste grupo, a variável que apresentou maior associação positiva com PC1 foi o Hodômetro (0,671) enquanto EAC/Km está negativamente correlacionada (-0,590). Na Figura 29b cinco veículos podem ser considerados *outliers*, todos do estado do Mato Grosso.

Para este grupo, similarmente ao Grupo 2, PC1 pode ser classificado como a comparação entre o índice formado pelos coeficientes de hodômetro, emissões/ano e idade com o custo equivalente anual. Em relação ao segundo componente principal (PC2), a Idade (0,892) e EAC/Km (0,452) estão fortemente correlacionadas positivamente com esta componente. O segundo componente principal do Grupo 3 pode ser definido como um índice de desempenho formado pela idade e EAC/km visto que estes valores são consideravelmente superiores às demais variáveis, que estão próximas de zero.

Os tipos de veículos não ficaram bem distribuídos entre os 20 piores com caminhonetes com a grande maioria na lista com 19 veículos enquanto os Sedans tiveram apenas um. Em relação aos estados, Mato Grosso apresentou quase metade dos veículos do *ranking* com 9 veículos enquanto Piauí apareceu com 4 entre os vinte piores do Grupo 3. Neste grupo cabe

investigar o primeiro veículo da lista pois com apenas 6 anos de idade o Sedan de Mato Grosso já circulou mais de 440 mil quilômetros. Além disso, em razão da grande presença de veículos do Mato Grosso entre os piores, cabe verificar se este estado não deveria fazer parte de outro grupo onde se exige mais de seus veículos. O *ranking* dos 20 veículos com os escores mais significativos para o Grupo 3 é apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 20 – Ranking dos 20 piores veículos do Grupo 3

<b>Ordem</b>	<b>UF</b>	<b>Tipo de veículo</b>	<b>Idade</b>	<b>Km</b>	<b>Ordem</b>	<b>UF</b>	<b>Tipo de veículo</b>	<b>Idade</b>	<b>Km</b>
<b>1</b>	MT	SEDAN	6	442.953	<b>11</b>	MT	CAMINHONETE	9	169.660
<b>2</b>	GO	CAMINHONETE	13	203.584	<b>12</b>	GO	CAMINHONETE	6	178.621
<b>3</b>	MT	CAMINHONETE	9	222.906	<b>13</b>	PI	CAMINHONETE	10	157.934
<b>4</b>	MT	CAMINHONETE	7	217.728	<b>14</b>	CE	CAMINHONETE	10	157.155
<b>5</b>	SE	CAMINHONETE	7	175.010	<b>15</b>	SE	CAMINHONETE	9	108.245
<b>6</b>	MT	CAMINHONETE	8	192.545	<b>16</b>	SP	CAMINHONETE	11	141.365
<b>7</b>	PI	CAMINHONETE	8	189.270	<b>17</b>	PI	CAMINHONETE	8	154.074
<b>8</b>	MT	CAMINHONETE	11	167.621	<b>18</b>	CE	CAMINHONETE	7	159.292
<b>9</b>	PI	CAMINHONETE	7	187.887	<b>19</b>	MT	CAMINHONETE	11	133.937
<b>10</b>	MT	CAMINHONETE	8	178.414	<b>20</b>	MT	CAMINHONETE	10	138.732

Fonte: O Autor (2019).

A Análise dos Componentes Principais complementou as informações observadas no método de análise de agrupamentos e demais estatísticas realizadas. A grande dispersão dos dados dos veículos da Polícia Federal torna inviável a definição de uma política única de renovação da frota, sem considerar as peculiaridades de cada estado, a diferente utilização e os tipos dos veículos. A metodologia desenvolvida neste trabalho tem fácil aplicabilidade e pode ser implementada no contexto da Polícia Federal e outras instituições públicas.

## 6 CONCLUSÕES

Os modelos de manutenção existentes na literatura concentram-se principalmente em minimizar apenas os custos totais esperados de manutenção e operações para recomendar as decisões de substituição ideais. No entanto, dadas as prioridades do mundo atual para a sustentabilidade ambiental, os aspectos ambientais de um sistema operacional devem ser levados em conta, mesmo que seus custos sejam indiretos, para planejar um futuro sustentável.

Neste trabalho, em um primeiro momento, foi realizado um diagnóstico da frota da Polícia Federal onde foi apresentado um panorama geral da situação dos veículos como a idade, a quilometragem, a intensidade de uso e o rendimento dos carros, em média, além das emissões de gases poluentes por tipo de veículo e tipo de combustível. Os dados levantados do rendimento dos veículos demonstraram que os veículos policiais são mais exigidos do que a média da frota circulante e que existe muita variação nos dados em razão de outros fatores como a qualidade das estradas e o efetivo de servidores considerado e por esse motivo os estados foram divididos em grupos com observações semelhantes.

Além disso, em razão de uma política de renovação da frota da instituição que se pretende implementar onde os parâmetros para substituição foram definidos como 5 anos ou 100.000 quilômetros rodados, foi aplicado um modelo de análise da vida econômica dos equipamentos para avaliar se essa política realmente é interessante em termos de custos. Os resultados encontrados demonstraram que, para as Caminhonetes, em princípio, 5 anos é um período razoável. Contudo, para os carros tipo Sedan, o custo equivalente anual foi mínimo após o 5º ano e foi diferente entre os grupos. Pode-se considerar, portanto, pela análise dos custos equivalentes anuais, que para o primeiro grupo o momento ótimo de substituição é no sexto ano e para os outros grupos por volta dos oito anos.

A análise dos dados também demonstrou que o segundo e o terceiro anos dos dois tipos de veículos (Caminhonetes e Sedans), no geral, apresentaram os maiores custos operacionais e que estes, em média e diferentemente do modelo de minimização dos custos apresentado por Jardine & Tsang (2013), decresceu com o tempo. Pode-se depreender deste fato que, com a idade, os veículos perdem a confiabilidade e são utilizados com menor intensidade, o que ocasiona redução nos custos de manutenção e abastecimento.

Visto isso, foi apresentado o aumento considerável dos impactos ambientais ocasionados pelos veículos em razão da idade. Essa redução de emissões de gases poluentes dos veículos mais novos se deve não somente à implementação de novas tecnologias como também à diminuição dos limites tolerados pelos regulamentos que se tornaram mais exigentes ao longo do tempo. Em seguida, foram utilizadas duas metodologias que converteram os custos ambientais em custos econômicos e os possíveis benefícios e impactos financeiros foram apresentados.

Por último, considerando a possibilidade de não se conseguir substituir todos os veículos em situação de desfazimento em um mesmo momento, em razão de restrições orçamentárias, foi aplicada uma técnica estatística multivariada denominada análise dos componentes principais. Através deste método, considerando os indicadores mensurados para verificar a condição da frota, foi definido um *ranking* onde os veículos mais pontuados são aqueles que devem ser os primeiros a ser substituídos. A análise desta ordenação corroborou a grande dispersão entre os grupos e por tipo de veículos dentro dos grupos inclusive.

O objetivo do presente estudo foi demonstrar que em razão das dimensões continentais do país e das diferenças logísticas e operacionais na utilização da frota da instituição, definir uma diretriz de substituição única para todos os veículos pode não representar a solução mais adequada. A formação de grupos com características similares pode trazer maiores benefícios econômicos. Além disso, em razão da preocupação crescente com a poluição atmosférica e seus efeitos, devem ser considerados também critérios ambientais na política de renovação a ser implementada.

## 6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A maior limitação do trabalho foi em relação aos dados coletados. A amostra teve que ser reduzida em razão de inconsistências e erros claros de digitação. Consequentemente, foram excluídos da análise da vida econômica vários veículos por falta de dados. Seria interessante ter essas informações para que um planejamento mais preciso pudesse ser feito, pois alguns estados ficaram com amostras bastante reduzidas.

Além disso, como o sistema informatizado é relativamente recente, não há dados históricos para se analisar um horizonte de tempo maior. Outra limitação foi ter que desconsiderar, em razão da dificuldade de mensuração, outros custos como os prejuízos

relativos a um veículo ficar fora de operação devido à quebra ou mal funcionamento ou ainda em desuso ocupando os pátios das unidades da PF pelo Brasil.

Outra limitação foi a definição das metodologias aplicadas para a avaliação dos impactos econômicos das emissões de gases poluentes pelos veículos da frota da PF. A Metodologia *ExternE* aplicada ao cenário brasileiro foi desenvolvida considerando a realidade das cidades europeias.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A aplicação da técnica de análise dos custos equivalentes anuais se aplica em outras situações que trariam resultados relevantes para a Polícia Federal. Uma delas seria considerar a utilização de carros híbridos/elétricos e fazer comparações entre a vida econômica deste modelo com os veículos atuais movidos a combustíveis fósseis.

Outra situação seria considerar a substituição de veículos com pouca utilização por programas de transporte do Governo Federal como o TáxiGov pois, a princípio, com a redução dos custos de aquisição e operação, esta solução poderia se apresentar viável. Outra solução seria estudar a possibilidade de alugar uma parte da frota através de contratos de *leasing*.

Além disso, está em fase de planejamento a implementação de sistema automatizado de controle da frota, com a importação automática de todos os dados dos veículos e dos condutores e, quando em operação, proporcionará acesso completo a uma gama muito maior de informações incluindo a velocidade média e a aceleração dos automóveis, abrindo muitas possibilidades para novos estudos, como a definição do perfil do condutor policial.

Por último, existem vários modelos de substituição de equipamentos que utilizam outras técnicas, tais como programação linear e dinâmica e simulação de Markov e Monte Carlo, que poderiam ser utilizadas no caso da PF e os resultados comparados com aqueles encontrados nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AFRINALDI, F.; TAUFIK; TASMÁN, A.M.; ZHANG, H.C.; HAZAN, A. Minimizing economic and environmental impacts through an optimal preventive replacement schedule: Model and application. **Journal of Cleaner Production**. 143: 882-893, 2017.

ANP. **Série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos/serie-historica-do-levantamento-de-precos-e-de-margens-de-comercializacao-de-combustiveis>. Acesso em: 10 jan. 2019.

BATISTA, T.; FREIRE, F.; SILVA, C.M. Vehicle environmental rating methodologies: Overview and application to light-duty vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 45: 192–206, 2015.

BRASIL. **Instrução Normativa n° 1, de 21 de jun. de 2007**. Dispõe sobre aquisição, reaproveitamento, cadastramento, custo operacional, cessão, alienação, classificação, utilização, características, identificação, definição do quantitativo e licenciamento de veículos, pertencentes à Administração Pública Federal direta, autárquica e Fundacional, integrantes do Sistema de Serviços Gerais-SISG, e dá outras providências, Brasília, DF, jun 2007.

BRASIL. **Instrução Normativa n° 3, de 15 de mai. de 2008**. Dispõe sobre a classificação, utilização, especificação, identificação, aquisição e alienação de veículos oficiais e dá outras providências, Brasília, DF, mai 2008.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. **2º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013**: ano-base 2012: relatório final. Brasília, DF: MMA, 2014. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario\\_de\\_Emissoes\\_por\\_Veiculos\\_Rodoviarios\\_2013.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviarios_2013.pdf). Acesso em: 14 out. 2018.

BRASIL. **Pesquisa CNT de rodovias 2017**: relatório gerencial. Brasília, DF: CNT; SEST; SENAT, 2017. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>. Acesso em: 29 jun. 2018.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B.H. **Análise de investimentos**: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. 11ed. São Paulo: Atlas, 2017.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de emissões veiculares no estado de São Paulo 2017**. São Paulo. 2018. 214p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 04 mar. 2019.

DAVENPORT, N.S.; ANDERSON, M.D.; FARRINGTON, P.A. Development and application of a vehicle procurement model for rural fleet asset management. **Journal of the Transportation Research**. 1927: 123-127, 2005.

DIETZ, D.C.; KATZ, P.A. US WEST implements a cogent analytical model for optimal vehicle replacement. **Interfaces**. 31(5): 65-73. 2001.

DOANE, D.P.; SEWARD, L.E. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. 4ed. Nova York: McGraw Hill Education, 2014.

DRINKWATER, R.W.; HASTINGS, N.A.J. An economic replacement model. **Journal of the Operational Research**. DOI: 10.1057/jors.1967.24.

EHSANI, M.; AHMADI, A.; FADAI, D. Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 53: 1638-1648 (2016).

EILON, S.; KING, J.R.; HUTCHINSON, D.E. A study in equipment replacement. **Journal of the Operational Research**. DOI: 10.1057/jors.1966.7.

EUROPEAN COMMISSION COMMUNITY RESEARCH. **External Costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport**. Bruxelas. 2003. 28p. Disponível em: [www.externe.info/externe\\_2006/methodology.html](http://www.externe.info/externe_2006/methodology.html). Acesso em: 03 mai. 2019.

GARCIA, R.; FREIRE, F. A review of fleet-based life-cycle approaches focusing on energy and environmental impacts of vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 79: 935–945, 2017.

GIORDANO, A.; FISCHBECK, P.; MATTHEWS, H.S. Environmental and economic comparison of diesel and battery electric delivery vans to inform city logistics fleet replacement strategies. **Transportation Research Part D**. 64: 216-229 (2018).

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HARTMAN, J.C. Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand. **European Journal of Operational Research**. 159: 145-165, 2004.

IBAMA. **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – PROCONVE/PROMOT/IBAMA**. 3. ed. Brasília: Ibama/Diqua, 2011. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/phocadownload/veiculosautomotores/manual%20proconve%20promot\\_portugues.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/veiculosautomotores/manual%20proconve%20promot_portugues.pdf). Acesso em: 15 jan. 2019.

IBGE. **Brasil em Síntese: Densidade Demográfica, 2010**. Disponível em: [https://brasilemsintese.ibge.gov.br/images/brasil\\_em\\_sintese/territorio/brasil\\_densidade\\_demografica.pdf](https://brasilemsintese.ibge.gov.br/images/brasil_em_sintese/territorio/brasil_densidade_demografica.pdf). Acesso em: 12 dez. 2018.

JARDINE, A.K.S.; TSANG, A.H.C. **Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications**. 2ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

KAGAWA, S.; HUBACEK, K.; NANSAI, K.; KATAOKA, M.; MANAGI, S.; SUH, S.; KUDOH, Y. Better cars or older cars?: Assessing CO<sub>2</sub> emission reduction potential of passenger vehicle replacement programs. **Global Environmental Change**. 23: 1807-1818, 2013.

LEITE, I.C.; VALENTE, J.G.; SCHRAMM, J.M.A; DAUMAS, R.P.; RODRIGUES, R.N.; SANTOS, M.F.; OLIVEIRA, A.F.; SILVA, R.S.; CAMPOS, M.R.; MOTA, J.C. Carga de doença no Brasil e suas regiões, 2008. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro. 31(7):1551-1564, 2015.

LIN, B.; JIA, Z. Impacts of carbon price level in carbon emission trading market. **Applied Energy**. 239: 157–170, 2019.

LIN, J.; CHEN, C.; NIEMEIER, D.A. An analysis on long term emission benefits of a government vehicle fleet replacement plan in northern Illinois. **Springer Science+Business Media, LLC**. DOI 10.1007/s11116-007-9149-1, 2007.

LOESCH, C.; HOELTGEBAUM, M. **Métodos Estatísticos Multivariados**. São Paulo: Ed. Saraiva, 2012.

MATOS, F.F.C. **Gestão de Manutenção de Frotas**: Orientado pela Eficácia Funcional. Edição do Kindle. 1ed. Frederico Freire de Carvalho Matos Copyright, 2017.

MERCURI, R.; BAUEN, A.; HART, D. Options for refuelling hydrogen fuel cell vehicles in Italy. **Journal of Power Sources**. 106: 353–363, 2002.

MESSAGIE, M.; MACHARIS, C.; MIERLO, J. V. Key outcomes from Life Cycle Assessment of vehicles, a state of the art literature review. **EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium**. 17-20, 2013.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de Estatística Multivariada**: Uma Abordagem Aplicada. 3ª reimpressão. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005.

MIRAGLIA, S.G.E.K.; GOUVEIA, N. Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras. **Ciência & Saúde Coletiva**, 19 (10):4141-4147, 2014.

NAKAGAWA, T.; OSAKI, S. The optimum repair limit replacement policies. **Journal of the Operational Research**. 25 (2): 311-317. 1974.

OBSERVARÓRIO DO CLIMA. **Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris**. São Paulo, 2018. 51p. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 01 mai. 2019.

ONAT, N.C.; KUCUKVAR, M.; AFSHAR, S. Eco-efficiency of electric vehicles in the United States: A life cycle assessment based principal component analysis. **Journal of Cleaner Production**. 212: 515-526, 2019.

PEDRAZA-MARTINEZ, A.J.; VAN WASSENHOVE, L.N. Vehicle Replacement in the International Committee of the Red Cross. **Production and Operation Management Society**. DOI: 10.1111/j.1937-5956.2011.01316.x, 2013.

PEREIRA, D.M. **Determinação do período ótimo de substituição de equipamento médico de alta complexidade por meio de análise de obsolescência**. 2017. Dissertação (Mestrado em Pesquisa Operacional) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFPE, Recife, 2017. p. 77.

REDMER, A. Strategic Vehicle Fleet Management – The Replacement Problem. **Scientific Journal of Logistics**. 12 (1): 17-24, 2016.

REZENDE, J.F.D. **Sustentabilidade e gestão ambiental**. Natal: Epifania, 2015.

REES, L.P.; CLAYTON, E.R.; TAYLOR, B.W.III. Network simulation model for police patrol vehicle maintenance and replacement analysis. **Computers, Environment and Urban Systems**. 07: 191-196, 1982.

SIMMS, B.W.; LAMARRE, B.G.; JARDINE, A.K.S.; BOUDREAU, A. Optimal buy, operate and sell policies for fleets of vehicles. **European Journal of Operational Research**. DOI 10.1016/0377-2217(84)90208-X, 1984.

SPITZLEY, D.V.; GRANDE, D.E.; KEOLEIAN, G.A.; KIM, H.C. Life cycle optimization of ownership costs and emissions reduction in US vehicle retirement decisions. **Transportation Research Part D**. 39: 463–480, 2005.

SUZUKI, Y.; PAUTSCH, G.R. A vehicle replacement policy for motor carriers in an unsteady economy. **Transportation Research Part A**. 39: 463–480, 2005.

UN DOCUMENTS. **Our Common Future**: Report of the World Commission on Environment and Development. Recuperado em 27 June 2013. Disponível em: <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>. Acesso em: 07 ago. 2019.

WEISSMANN, J.; WEISSMANN, A.J.; GONA, S. Computerized equipment replacement methodology. **Transportation Research Record**. DOI: 10.3141/1824-09.

WORLD BANK GROUP. **State and Trends of Carbon Pricing 2018**. Washington D.C. 2018. 62p. Disponível em: <https://worldbank.org>. Acesso em: 21 abr. 2019.

ZHENG, S.; CHEN, S. Fleet replacement decisions under demand and fuel price uncertainties. **Transportation Research Part D**. 60: 153-173, 2018.

ZHOU, M.; ZIN, H.; WHANG, W. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. **Transportation Research Part D** 49: 203–218, 2016.