PROJETO DE GRADUAÇÃO

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA VIA ALGORITMOS GENÉTICOS DA CADEIA CINEMÁTICA AUTOMOTIVA POR MEIO DE INVESTIGAÇÃO DAS RAZÕES DE TRANSMISSÃO

Por,

Gino Bertollucci Colherinhas

Pedro Henrique Coelho Dias

Brasília, 27 de Junho de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA VIA ALGORITMOS GENÉTICOS DA CADEIA CINEMÁTICA AUTOMOTIVA POR MEIO DE INVESTIGAÇÃO DAS RAZÕES DE TRANSMISSÃO

POR,

Gino Bertollucci Colherinhas – 09/0043014
Pedro Henrique Coelho Dias – 09/0030796

Relatório submetido para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, UnB/ ENM (Orientador) _____

Profª. Dianne Magalhães Viana, UnB/ ENM _____

Prof. Marcus Vinicius Girão de Morais, UnB/ ENM _____

Brasília, 27 de Junho de 2014

Dedicatória

Em memória ao nosso amigo Frederico Régis, que passou por nossas vidas tanto nos bons momentos, quanto nos momentos mais difíceis do curso. Mas que sempre esteve disposto a nos ajudar e que sempre nos fará recordar boas lembranças.

Gino Bertollucci Colherinhas
Pedro Henrique Coelho Dias

RESUMO

O objetivo do projeto é a otimização por algoritmos genéticos da relação entre aceleração, economia de combustível e máxima velocidade para um veículo automotivo, por meio da seleção da cadeia cinética mais adequada. Para isso será feita uma investigação do desempenho de diferentes configurações de razão de transmissão das diversas marchas, eixos e raio da roda, utilizando métodos probabilísticos. O estudo será realizado em um sistema de transmissão manual. O trabalho torna-se pertinente para aplicação em fase prévia de projetos automotivos, tendo em vista que a seleção da cadeia cinemática é feita geralmente pela experiência do projetista e baseada em análises complexas de cálculo, o que dificulta a repetitividade do processo. No final do projeto, espera-se ter indicativos matemáticos para justificar a seleção de uma determinada configuração de cadeia cinemática, i.e., um veículo que obtenha ótima eficiência.

ABSTRACT

The target of this project is the optimization by genetic algorithm of the relation between acceleration, fuel economy and maximum velocity of an automotive vehicle by selecting the best fit powertrain configuration. To achieve this goal, the performance of several gears, axles and rolling ratios are going to be investigated using probabilistic methods. The study is going to be made at a manual transmission. Since the powertrain selection nowadays is usually chosen based on the designer experience and under complex calculations without reproducibility, this work is going to be applicable at the initial stage of automotive projects. In the end of this project, it is hoped to obtain mathematical evidence to justify the selection of a powertrain configuration, i.e., a high efficiency vehicle.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 A CADEIA CINEMÁTICA 3

2.1 MOTOR 3

2.1.1 Seleção do Motor 8

2.2 FORÇAS RESISTIVAS 10

2.2.1 Seleção do Chassi 13

2.3 SISTEMA DE TRASMISSÃO 14

2.4 SELEÇÃO DA CADEIA CINEMÁTICA 23

2.5 AVALIAÇÃO DA CADEIA CINEMÁTICA 31

2.5.1 Simulação do Teste de Aceleração 31

2.5.2 Simulação do Teste de Economia de Combustível 35

3 OTIMIZAÇÃO POR ALGORÍTMOS GENÉTICOS 41

3.1 ALGORITMOS GENÉTICOS 42

3.2 CODIFICAÇÃO 43

3.3 CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL 44

3.4 FUNÇÃO OBJETIVO 45

3.5 SELEÇÃO 45

3.5.1 Roleta 45

3.5.2 Torneio 46

3.5.3 Dizimação 47

3.6 CRUZAMENTO 47

3.7 MUTAÇÃO 48

3.8 CONVERGÊNCIA 49

4 OTIMIZAÇÃO DA CADEIA CINEMÁTICA 50

4.1 DEFININDO OS CROMOSSOMOS 50

4.1.1 Razão do eixo traseiro – Ra 50

4.1.2 Raio da Roda – rr 50

4.1.3 Razões de Trasmissão – Rt 51

4.2 CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL 54

4.3 DELIMITAÇÃO DO GENE NA REGIÃO VIÁVEL 54

4.4 FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO 55

4.5 OPERADORES GENÉTICOS 56

4.5.1 Reprodução 56

4.5.2 Cruzamento 57

4.5.3 Mutação 57

4.6 ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL 58

4.6.1 Pontos Flutuantes (Implementação de uma codificação Real) 60

5 RESULTADOS 61

5.1 RESULTADOS UTILIZANDO CODIFICAÇÃO BINÁRIA 61

5.2 RESULTADOS UTILIZANDO CODIFICAÇÃO REAL (PONTOS FLUTUANTES) 65

5.2.1 Otimização Pura 66

5.2.2 Otimização Ponderada 69

6 CONCLUSÕES 72

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

8 ANEXOS 75

8.1 TESTE DE ACELERAÇÃO E AVALIAÇÃO 75

8.2 TESTE DE ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL 78

8.3 ALGORITMO GENÉTICO 80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Acomodação da Cadeia Cinemática (Hoff e Gregory 2003) - modificado 3
Figura 2.2 Motor de combustão interna de 4 tempos movido a gasolina (Pulkrabek 1997) 4
Figura 2.3 Comparação de diagramas típicos pressão-volume para ciclo Diesel (CI) e gasolina (Ciclo Otto). Motores operando com 100% do acelerador atuado (Pulkrabek 1997) 5
Figura 2.4 Dinamômetro usado para medir Torque e Potência de saída do motor (Pulkrabek 1997)..... 5
Figura 2.5 Diagrama típico de motor 4 tempos de combustão interna mostrando a definição de pressão média efetiva (Pulkrabek 1997) 6
Figura 2.6 Performance típica de motor a gasolina operando com 100% do acelerador atuado (Hoff e Gregory 2003) - modificado 7
Figura 2.7 Mapa de performance de motor a gasolina sobreposto com forças resistivas (Hoff e Gregory 2003)..... 8
Figura 2.8 Regressão polinomial dos Valores calculados da Potência do Motor em função da Rotação do Motor 9
Figura 2.9 Diagrama de corpo livre para veículo andando em pista inclinada (Gillespie 1992)..... 10
Figura 2.10 Deformação do Pneu (Gillespie 1992) 11
Figura 2.11 Forças Resistivas em função da velocidade do veículo e do percentual de inclinação (Hoff e Gregory 2003) - modificado 12
Figura 2.12 Potência de resistência em função da velocidade do veículo e do percentual de inclinação (Hoff e Gregory 2003) - modificado 13
Figura 2.13 1994 Saturn SL2 (CarsDirect s.d.) 13
Figura 2.14 Caixa de Redução do sistema de transmissão manual (Gillespie 1992) 14
Figura 2.15 Curvas características de Torque e Potência para um Motor a gasolina (Hoff e Gregory 2003) - modificado 15
Figura 2.16 Curvas características de Torque e Potência para um Motor ideal (Hoff e Gregory 2003) - modificado 16
Figura 2.17 Potência de Tração disponível de um Motor ideal comparado com um Motor típico com sistema de transmissão (Hoff e Gregory 2003) - modificado 16
Figura 2.18 Modelo de Caixa de Transmissão (Gillespie 1992)- modificado 17
Figura 2.19 Esquema de veículo com tração traseira e transmissão manual (Hoff e Gregory 2003) - modificado 18
Figura 2.20 Variação da eficiência do sistema de transmissão com Torque de 5ª e 1ª marchas a 2500 rpm (Hoff e Gregory 2003) - modificado 19
Figura 2.21 Cinemática de uma roda ideal (Gillespie 1992) 20
Figura 2.22 Efeito das perdas por fricção na Potência disponível para transmissão manual (Hoff e Gregory 2003) - modificado 23
Figura 2.23 Comparação de Razões de Transmissão para sistema manual, automático e CVT (Hoff e Gregory 2003) 28
Figura 2.24 Gráfico de correlação entre Razão de Transmissão na primeira marcha, distribuição de Razões de Transmissão, Potência e Torque Máximo do motor (Hoff e Gregory 2003) 28
Figura 2.25 Velocidade Máxima Final para as duas diferentes razões N/v (Hoff e Gregory 2003) - modificado 29
Figura 2.26 Seleção de primeira razão de transmissão para suprir requisito de projeto (Hoff e Gregory 2003) - modificado 30
Figura 2.27 Espaçamento Geométrico para transmissão com 5 marchas (Hoff e Gregory 2003) - modificado 30

Figura 2.28 Curvas de Potência disponível (Hoff e Gregory 2003) - modificado 31
Figura 2.29 Teste de Economia de Combustível da União Européia ECE-15 (DieselNet s.d.)..... 36
Figura 2.30 Teste de Economia de Combustível do Japão JC08 (DieselNet s.d.) 36
Figura 2.31 Variação da velocidade com o tempo transcorrido de teste para simular o transito de um veículo em área urbana (EPA s.d.) 37
Figura 3.1 Fluxograma de um algoritmo genético 43
Figura 3.2 Definição dos componentes de um cromossomo 44
Figura 3.3 Seleção através do método da roleta 46
Figura 3.4 Seleção pelo método de torneio (Mognon 2004) 47
Figura 3.5 Cruzamento de ponto único 48
Figura 3.6 Cruzamento de ponto duplo 48
Figura 3.7 Cruzamento de pontos aleatórios 48
Figura 3.8 Mutação do cromossomo em um único nucleotídeo 49
Figura 4.1 Distribuição Densidade de Probabilidade para as diferentes relações de transmissão Rt da Tabela 4.1. 52
Figura 4.2 Tempo computacional gasto para a primeira simulação – MATLAB 2012b 59
Figura 4.3 Tempo computacional gasto utilizando estratégias de programação – MATLAB 2012b ... 60
Figura 5.1 Resultado da otimização aplicando a metodologia proposta comparando com o Saturn SL2 62
Figura 5.2 Evolução das Curvas de (a) Consumo de Combustível, (b) Tempo de 0 a 100 km/h, (c) Velocidade Máxima no processo de otimização realizado..... 63
Figura 5.3 Curvas de (a) Aceleração (g); (b) Velocidade (km/h) em função do tempo (s)..... 64
Figura 5.4 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) do Saturn SL2 e do veículo otimizado..... 64
Figura 5.5 Resultados da Otimização (Fitness x Gerações) das configuração de melhor fitness e suas médias, e os valores máximos para os veículos de Passeio e Esporte, assim como o veículo original. 66
Figura 5.6 Teste de Aceleração (Aceleração x Tempo) para o Veículo Original (Saturn SL2) e para o Melhor Fitness..... 67
Figura 5.7 Teste de Aceleração (Velocidade x Tempo) para o Veículo Original (Saturn SL2) e para o Melhor Fitness..... 68
Figura 5.8 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) do Saturn SL2 e do veículo otimizado..... 68
Figura 5.9 Teste de Aceleração (Aceleração x Tempo) para veículos de Passeio e Esporte 69
Figura 5.10 Teste de Aceleração (Velocidade x Tempo) para veículos de Passeio e Esporte 70
Figura 5.11 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) dos veículos de Passeio e Esporte..... 70
Figura 5.12 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) para todos os veículos em questão..... 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores experimentais da Pressão Média Efetiva em função da Rotação do Motor com acelerador 100% atuado (Hoff e Gregory 2003) - modificado 8
Tabela 2.2 Valores calculados da Potência do Motor em função da Rotação do Motor (Hoff e Gregory 2003) - modificado 9
Tabela 2.3 Constantes obtidas na regressão polinomial 10
Tabela 2.4 Coeficientes de Resistência à rolagem para pneus em diferentes condições de superfícies (Hoff e Gregory 2003) - modificado 11
Tabela 2.5 Coeficientes de arrasto para veículos modernos (Hoff e Gregory 2003) - modificado 12
Tabela 2.6 Especificações de raio de roda típicos para carros de passeio (Yokohoma 2008) 21
Tabela 2.7 Dados de transmissão de veículo médio (Hoff e Gregory 2003) - modificado 22
Tabela 2.8 Valores da Caixa de Transmissão (Hoff e Gregory 2003) - modificado 23
Tabela 2.9 Chassis e Motores selecionados para veículos nos EUA (Hoff e Gregory 2003) 25
Tabela 2.10 Valores correspondentes das Transmissões (Hoff e Gregory 2003) 26
Tabela 2.11 Tratamento de dados da Tabela 2.9 e Tabela 2.10 (Hoff e Gregory 2003) 27
Tabela 4.1 Razões de transmissão para diferentes carros (Hoff e Gregory 2003) 51
Tabela 4.2 Médias e desvios padrões para as Rts da Tabela 4.1 52
Tabela 5.1 Resultados das otimizações reais das configurações dos veículos de Espote e Passeio em comparação com o Saturn SL2 e a otimização “Pura” 65

LISTA DE SÍMBOLOS

Índices:

f	Eixo dianteiro
r	Eixo traseiro
H	Direção horizontal
V	Direção vertical
i	i-ésimo incremento temporal
o	Valor inicial do parâmetro
$wheel$	Roda
eng	Motor
$trans$	Caixa de transmissão
in	Entrada
out	Saída

Volumes, massas, áreas, distâncias e ângulos

Símbolos Latinos

A_f	Área Frontal	$[m^2]$
b	Distância do centro de gravidade do veículo até o eixo dianteiro	$[m]$
c	Distância do centro de gravidade do veículo até o eixo traseiro	$[m]$
h	Altura do veículo	$[m]$
h_{HL}	Distância do chão até o ponto da força de carregamento de reboque	$[m]$
h_{WR}	Distância do chão até o ponto de atuação da Força de resistência do ar ou Arrasto	$[m]$
L	Distância entre eixos	$[m]$
m_f	Massa de combustível	$[kg]$
R	Distância entre os centros do eixo de saída do motor	$[m]$
r_r	Raio da roda	$[m]$
S_i	Posição presente	$[m]$
S_n	Distância total percorrida	$[m]$
V_d	Volume deslocado no pistão	$[l]$
V_f	Volume total de combustível utilizado	$[l]$
w	Largura do veículo	$[m]$
W_b	Distância entre eixos	$[m]$

Símbolos Gregos

θ	Ângulo de inclinação do chão em relação à direção horizontal	[°]

Forças, potências, torques, pressões e outros

Símbolos Latinos

a_{eff}	Aceleração efetiva	$[m/s^2]$
a_{max}	Aceleração máxima possível	$[m/s^2]$
a_x	Aceleração do sistema na direção do movimento	$[m/s^2]$
$BMEP$	Pressão Média Efetiva (Brake Mean Pressure)	$[kPa]$
BP	Potência de saída (Brake Power)	$[kW]$
$BSFC$	Consumo específico de combustível (Brake Specific Fuel Consumption)	$[g/kWhr]$
BT	Torque de saída	$[N.m]$
$d_{m_{fuel}}$	Fluxo mássico de combustível	$[kg/s]$

F	Força medida na balança	$[N]$
GR	Força devido à inclinação	$[N]$
HL	Força de carregamento de reboque	$[N]$
$Lift$	Força de Sustentação do ar	$[N]$
N'	Força Normal que o chão realiza sobre o carro	$[N]$
N	Rotação do motor	$[rpm]$
P	Potência	$[kW]$
P_{RL}	Potência de resistência	$[kW]$
P_{r_r}	Potência da Força de Resistência à Rolagem	$[kW]$
P_{TE}	Potência da Força de Tração	$[kW]$
RL	Força resistiva resultante	$[N]$
RR	Força de resistência à rolagem	$[N]$
t_{0-100}	Tempo de aceleração	$[s]$
TE	Força de tração do veículo	$[N]$
t_i	Tempo transcorrido de teste	$[s]$
v	Velocidade linear do veículo	$[m/s]$
v_{ar}	Velocidade relativa do ar	$[m/s]$
v_{m_f}	Velocidade do veículo em 45 segundos	$[m/s]$
W	Peso do veículo (no centro de gravidade)	$[N]$
WR	Força de resistência do ar ou Arrasto	$[N]$
z	Número de revoluções do motor por ciclo	$[rpm]$
Símbolos Gregos		
ω	Velocidade ângular	$[rad/s]$

Razões, propriedades e coeficientes

Símbolos Latinos		
g	Gravidade	$[m/s^2]$
Cd	Coeficiente de arrasto	
ec	Economia de combustível	$[km/l]$
inc	Incremento temporal	$[s]$
Ko	Coeficiente de Resistência à Rolagem	
nov	Eficiência do sistema de transmissão	
P	Pressão absoluta	$[kPa]$
R	Constante ideal dos gases para ar seco	
Rt	Razão de Trasmissão de eixo traseiro	
Rv	Relação entre velocidade de rotação do motor e a velocidade do veículo	
T	Temperatura absoluta	[°C]
Símbolos Gregos		
μ_{peak}	Máximo coeficiente de fricção das rodas com o asfalto	
ρ	Densidade do ar	$[kg/m^3]$
ρf	Densidade do combustível	$[kg/m^3]$

1 INTRODUÇÃO

O foco deste Projeto de Graduação é o estudo da Cadeia Cinemática de automóveis médios de passeio. A Cadeia Cinemática possui a função de gerar potência e transmiti-la para as rodas, de maneira que o veículo se movimente, sendo formada tipicamente por um motor, um sistema de transmissão e rodas. O sistema de transmissão é composto por vários mecanismos de redução de rotação e transformação de movimento. Os parâmetros que definem a operacionalidade do sistema de transmissão alteram o desempenho do veículo. Projetistas automotivos devem pensar em vários aspectos para determinar esses parâmetros de forma que sejam alcançados diversos requisitos de projeto como a máxima aceleração, velocidade final, economia de combustível, velocidade a uma determinada inclinação, entre outros. Muitas vezes, no entanto, esses requisitos não podem ser atingidos de forma simultânea ou de maneira ótima.

A natureza conflitante desses requisitos dificultam os projetos automotivos. Uma configuração de Cadeia Cinemática que aumenta a aceleração é naturalmente prejudicial para a economia de combustível. Essas duas características, entretanto, são cada vez mais requisitadas pelo mercado automotivo e pelas leis regulamentadoras. Atualmente, a seleção dos parâmetros da Cadeia Cinemática é feita com base na experiência do projetista e sobre análises complexas, o que dificulta a repetitividade do método utilizado, já que as decisões de projeto não são replicáveis em um código computacional. Um vasto campo de aplicação de métodos computacionais de otimização é, portanto, uma boa solução sobre este impasse.

Nesse contexto, o objetivo deste projeto é propor um método de otimização da Cadeia Cinemática para apoio ao projeto de automóveis de passeio, permitindo obter configurações com relação ótima entre aceleração, velocidade máxima e economia de combustível.

Os parâmetros que serão otimizados são: as relações de transmissão da caixa de transmissão e de eixo traseiro e o tamanho da roda. Para isso, cada configuração diferente será avaliada por meio da simulação de dois testes. O primeiro é o teste de aceleração regulamentado pela *Society of Automotive Engineers (SAE)* denominado *Vehicle Acceleration Measurement* de código J1491 que determina a máxima aceleração e a velocidade final máxima do veículo. O outro teste é regulamentado pela *United States Environmental Protection Agency,* denominado *Federal Urban Dynamometer Driving Schedule,* e permite determinar o consumo de combustível do veículo em km/l. Nos testes são usados parâmetros, definições e conceitos que serão detalhados no capítulo 2.

Através da avaliação sobre os objetivos são atribuídas notas para as configurações de Cadeia Cinemática que serão usadas em um Algoritmo Genético que otimizará os valores iniciais. Este método de otimização foi escolhido devido as suas vantagens na investigação de funções descontínuas com muitas variáveis e pelo uso de variáveis discretas. O capítulo 3 define o cromossomo e descreve o

funcionamento dos mecanismos do Algoritmo Genético, detalhando a criação da população inicial, a função objetivo (calculada a partir da avaliação da cadeia cinemática), a reprodução, cruzamento, mutação e os critérios de convergência.

O capítulo 4 descreve como o Algoritmo Genético é aplicado à Cadeia Cinemática, sendo explicitada a constituição do cromossomo, a metodologia para a criação da população inicial e o objetivo como função da máxima aceleração, máxima velocidade final e mínimo consumo de combustível do veículo considerado. Explicita-se também como foram construídos os algoritmos para a seleção, cruzamento e mutação dos indivíduos.

O algoritmo desenvolvido foi aplicado para configurações diferentes de otimização e função objetivo. Primeiramente foi feita uma otimização com o algoritmo em codificação binaria. Posteriormente a otimização foi feita com o algoritmo em codificação real, sendo que esta foi realizada para três diferentes situações quanto à ponderações da função objetivo. O primeiro caso não se adicionou ponderações à função objetivo, no segundo caso priorizou-se a ponderação para se obter um veículo esporte e, por último, um veículo de passeio. Os resultados obtidos para esses casos estão no capítulo 6.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo realizado tanto no tocante a metodologia de otimização, quanto a comparação dos resultados com veículos comerciais. Por fim apresentam-se nos anexos os testes normatizados e o algoritmo desenvolvido.

2 A CADEIA CINEMÁTICA

A Cadeia Cinemática Automotiva é o conjunto de sistemas que gera potência e a transporta para o chão. Existem inúmeros modelos de cadeia cinemática para um automóvel. Tipicamente os veículos são distinguidos pelas rodas que recebem tração (Tração Dianteira (FWD), Tração Traseira (RWD), Tração nas Quatro Rodas (4WD)), pela localização do motor (frente, meio, trás), pela orientação do motor (longitudinal, transversal) e pelo tipo de transmissão (manual, automática, CVT). Os veículos também são diferenciados pelo tipo de energia usada como os veículos movidos a combustíveis fósseis (Ignição por Centelha (SI) e Ignição por Compressão (CI)), veículos elétricos e veículos híbridos. A cadeia cinemática deve se encaixar no veículo sem interferir na função dos outros sistemas como a suspenção, direção e arrefecimento.

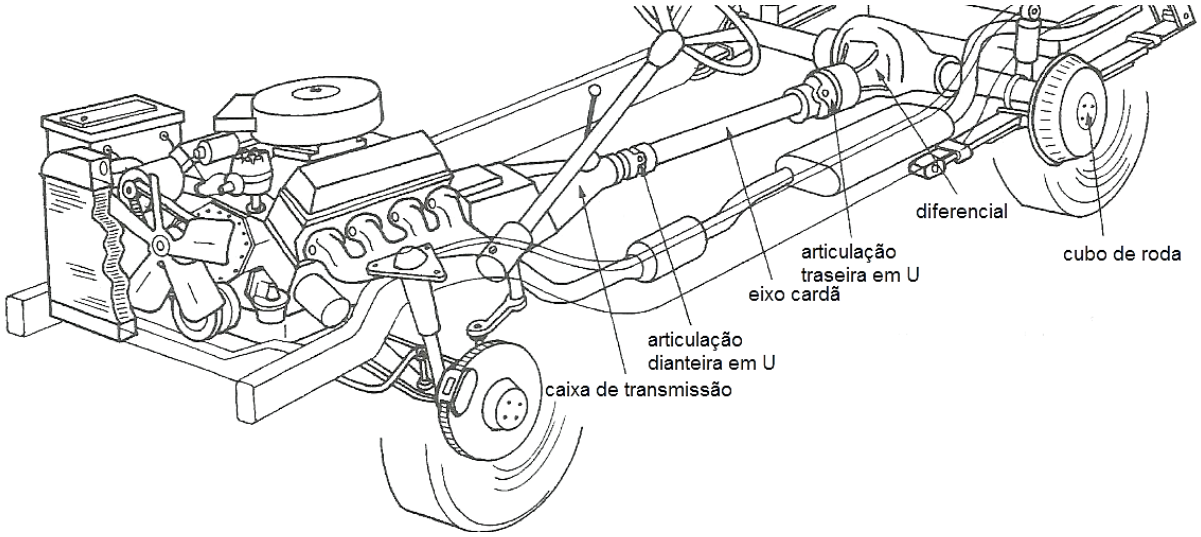


Figura 2.1 Acomodação da Cadeia Cinemática (Hoff e Gregory 2003) - modificado

Este capítulo irá explicar em detalhes cada componente da Cadeia Cinemática, sendo necessário definir importantes conceitos a cerca do motor, devido às características de propulsão, de chassi e das forças resistivas que irão atuar sobre o automóvel. Para a otimização será preciso avaliar as diferentes configurações de razões de transmissão por meio da simulação de um teste de aceleração e de um teste de economia de combustível, utilizando o mesmo motor e o mesmo chassi em todos os casos. A seleção do motor e chassi, assim como o detalhamento dos testes, será feito logo em seguida.

2.1 MOTOR

O Motor é o componente mais importante da Cadeia Cinemática, sendo responsável por transformar a energia química do combustível em energia cinética para o sistema. Para projetar uma cadeia cinemática é fundamental entender o sistema propulsor que será usado.

Neste Projeto de Graduação a modelagem será feita com um motor de quatro tempos movido à gasolina. A descrição do motor é mostrada na Figura 2.2 onde uma mistura de gasolina e ar é puxada para o motor (passo A), que é então comprimida (passo B). Para iniciar a ignição da mistura, no passo C, uma vela é acionada, liberando uma grande quantidade de energia que explode a mistura. A mistura então expande realizando trabalho no pistão. Finalmente, a válvula de exaustão se abre e os gases provenientes da combustão são retirados do cilindro pelo pistão (passo D). O ciclo leva duas revoluções ou 4 tempos do pistão para ser completa.

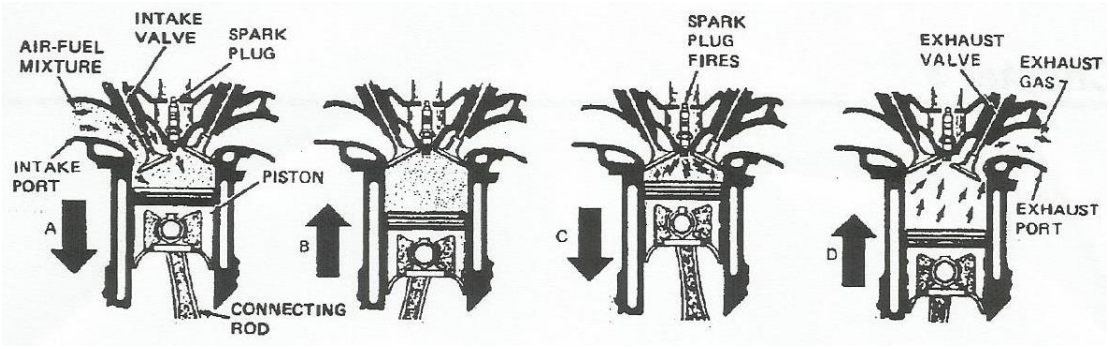


Figura 2.2 Motor de combustão interna de 4 tempos movido a gasolina (Pulkrabek 1997)

Um controle de válvulas é usado para controlar as velas e as válvulas de admissão e exaustão. Para controlar a Potência fornecida por esse tipo de motor, deve-se controlar a quantidade de ar introduzida. O pedal de aceleração é conectado a uma válvula que controla esse fluxo, logo, o motorista não controla de forma direta o fluxo de gasolina, mas sim o de ar.

Potência é produzida pelo calor liberado no processo de combustão causando um aumento de pressão no cilindro. Esse aumento de pressão empurra o pistão, sendo essa força transformada em força rotacional pelo virabrequim resultando em uma Velocidade de Rotação do Motor (N). Um diagrama típico de pressão-volume é mostrado na Figura 2.3 pelo ciclo Otto, comparado com um ciclo Diesel sobre condições genéricas. O Trabalho realizado por ciclo é numericamente igual a área sobre essa curva.

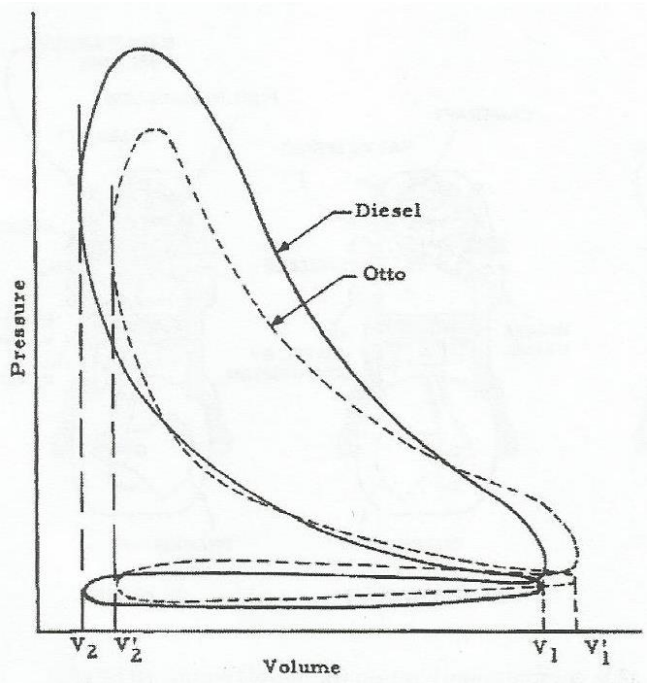


Figura 2.3 Comparação de diagramas típicos pressão-volume para ciclo Diesel (CI) e gasolina (Ciclo Otto). Motores operando com 100% do acelerador atuado (Pulkrabek 1997)

O Torque de saída (BT) é uma medida do momento torsor do eixo de saída do motor, uma vez que a distância do motor para o dinamômetro (R) é conhecida. Um teste pode ser feito com um dinamômetro projetado para medir e absorver esse torque. Este dispositivo é mostrado na Figura 2.4:

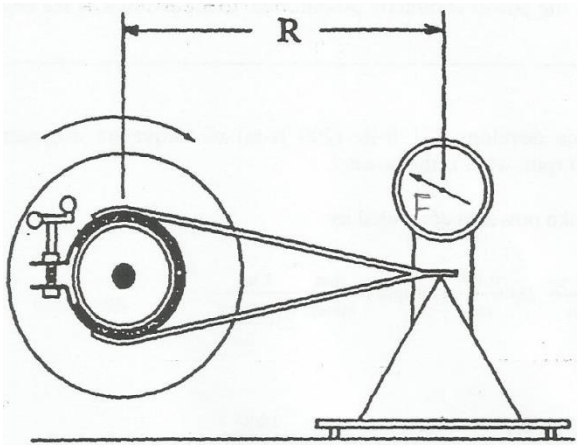


Figura 2.4 Dinamômetro usado para medir Torque e Potência de saída do motor (Pulkrabek 1997)

A força medida na balança permite o calculo do Torque de saída (BT):

$$BT = F \cdot R \tag{2.1}$$

A Potência de saída pode ser calculada conforme a Equação 2.2.

$$BP = 2\pi \cdot BT \cdot N \tag{2.2}$$

Sendo n a rotação do motor

A Pressão Média Efetiva ($BMEP$) é definida como a pressão exercida ao pistão em cada tempo de realização de trabalho em um ciclo. Ela é ilustrada na Figura 2.5:

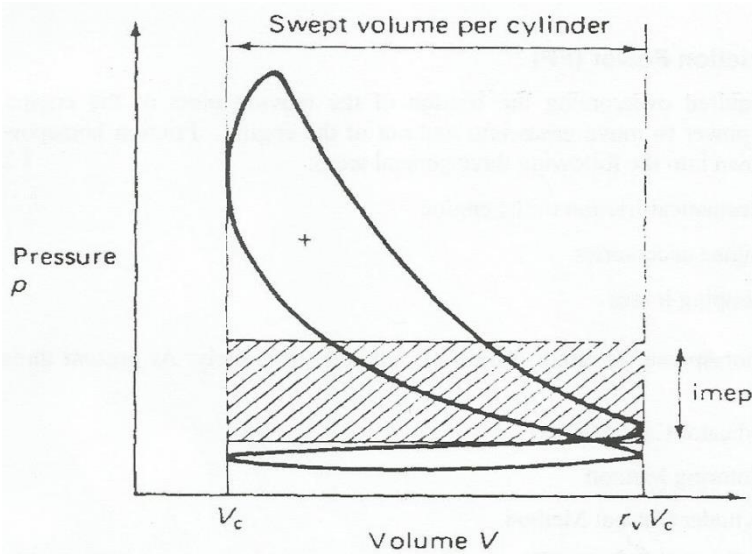


Figura 2.5 Diagrama típico de motor 4 tempos de combustão interna mostrando a definição de pressão média efetiva (Pulkrabek 1997)

Esse parâmetro ($BMEP$) é útil para comparar motores de diferentes tamanhos, velocidades de operação e tipo. Ele pode ser usado como uma normatização da Potência e do Torque:

$$BMEP = \frac{BP \cdot z}{V_d \cdot N} = \frac{2\pi \cdot BT \cdot z}{V_d} \tag{2.3}$$

Sendo:

V_d, o volume deslocado no pistão;

z, o numero de revoluções do motor por ciclo (igual a 2 para motor de 4 tempos).

O consumo específico de combustível ($BSFC$) é a razão entre o fluxo de combustível usado (dm_{fuel}) pela Potência (BP):

$$BSFC = \frac{dm_{fuel}}{BP} \tag{2.4}$$

A Figura 2.6 mostra perfis típicos de curvas de Potência, Torque e Consumo Específico de Combustível ($BSFC$):

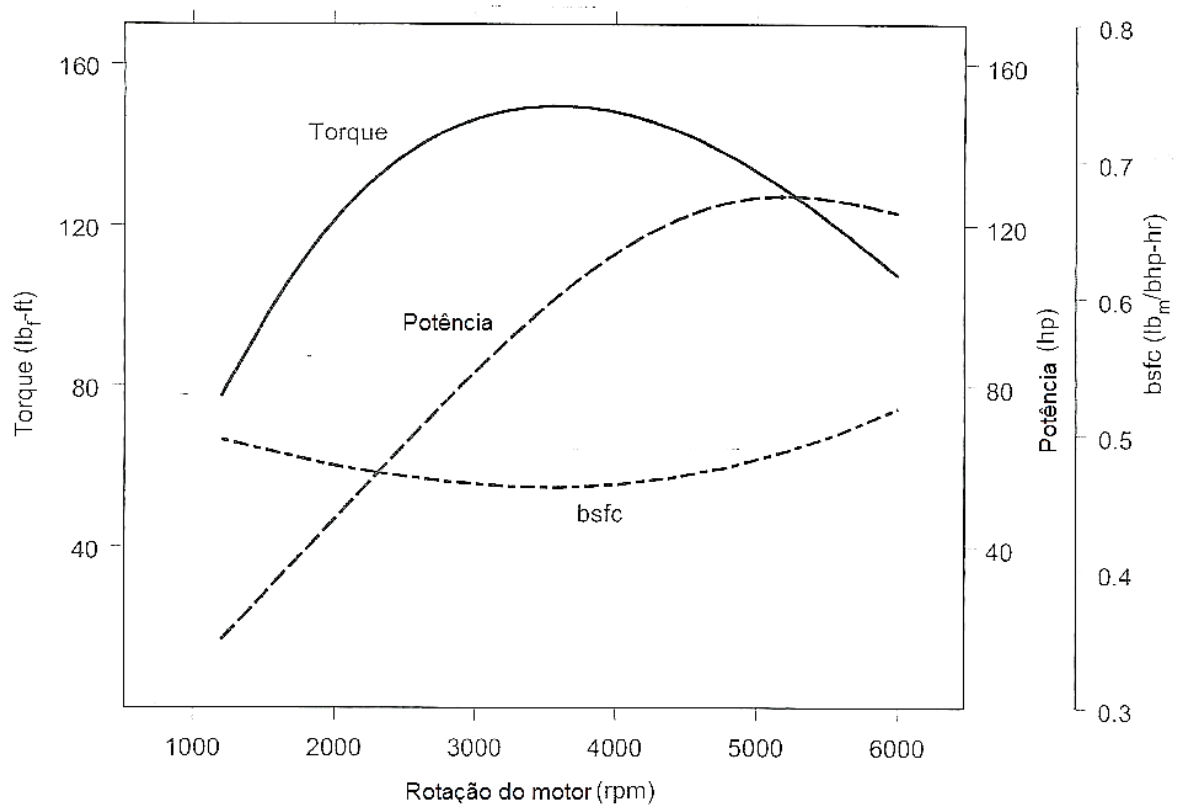


Figura 2.6 Performance típica de motor a gasolina operando com 100% do acelerador atuado (Hoff e Gregory 2003) - modificado

A Figura 2.7 mostra um gráfico típico de $BMEP$ pela velocidade do motor. As linhas circulares indicam valores de $BSFC$ constante. Note que há um ponto de máxima eficiência, ou seja, mínimo $BSFC$. A intenção para economia de combustível é utilizar o motor nesta região.

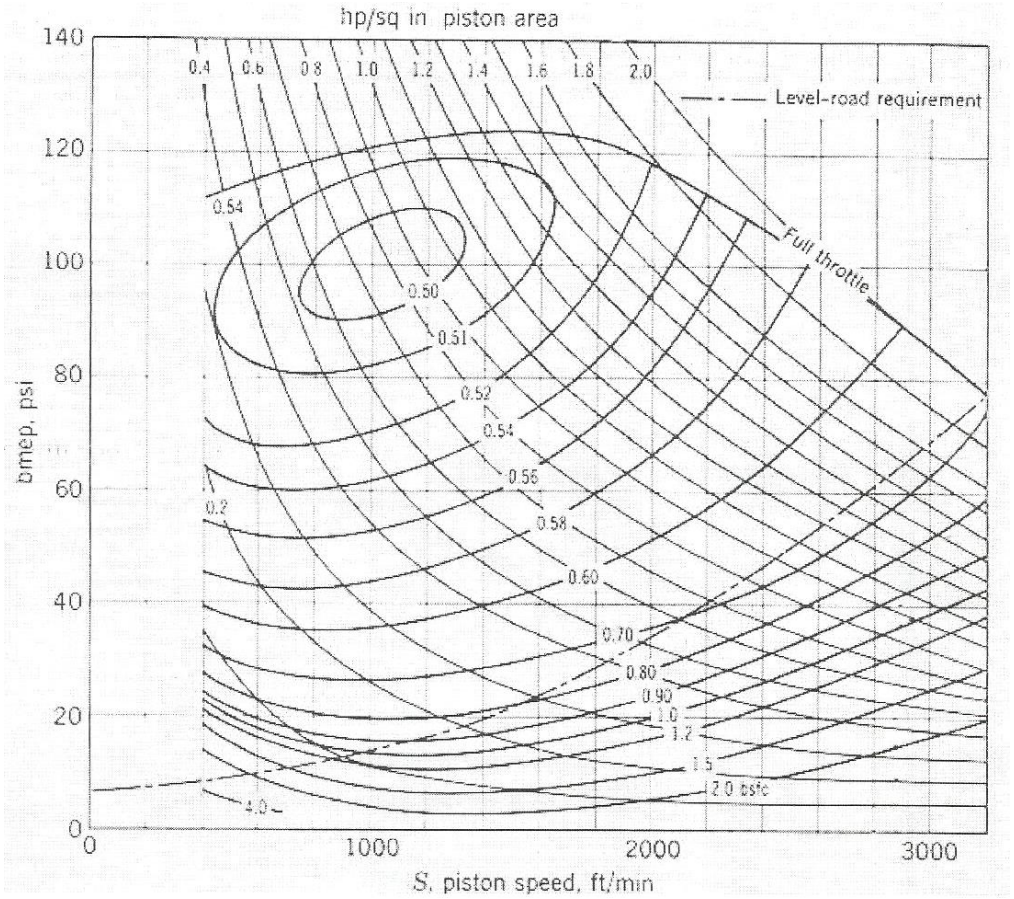


Figura 2.7 Mapa de performance de motor a gasolina sobreposto com forças resistivas (Hoff e Gregory 2003)

2.1.1 Seleção do Motor

O objetivo do projeto não é a otimização do motor, portanto, este componente, assim como o Chassi, será fixado para todos os casos e todos os indivíduos (o conceito de indivíduo será definido no capítulo 4). Assim teremos uma comparação dos parâmetros da Cadeia Cinemática sem nenhum benefício externo para alguma determinada configuração.

Para o Teste de Aceleração e o Teste de Economia de Combustível, será usado um motor com Volume Deslocado (Vd) de 1,9 L, duplo comando de válvulas na cabeça (DOHC) e duas revoluções por ciclo ($z = 2$).

Utilizando Gasolina Comum (C_8H_{17}), foram obtidas tabelas de desempenho deste motor usando um dinamômetro (Hoff e Gregory 2003). A Tabela 2.1 explicita o valor da Pressão Média Efetiva ($BMEP$) para vários valores de Rotação do Motor (N):

Tabela 2.1 Valores experimentais da Pressão Média Efetiva em função da Rotação do Motor com acelerador 100% atuado (Hoff e Gregory 2003) - modificado

N (rpm)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
BMEP (kPa)	743	887	970	1047	1094	1073	1052	1058	1094	1089	1063	1001

Pode-se calcular o valor da Potência do Motor para cada ponto como a razão entre o produto da Rotação do Motor, a Pressão Média Efetiva e o Volume Deslocado pelo Número de Revoluções por Ciclo:

$$BP = \frac{N \cdot BMEP \cdot Vd}{z} \tag{2.5}$$

Após o cálculo para cada ponto de rotação do motor, foi possível confeccionar a Tabela 2.2 que relaciona N com BP:

Tabela 2.2 Valores calculados da Potência do Motor em função da Rotação do Motor (Hoff e Gregory 2003) - modificado

N (rpm)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
BP (W)	5882,1	14044,2	23037,5	33155,0	43304,2	50967,5	58298,3	67006,7	77947,5	86212,5	92569,6	95095,0

Para uso prático, ou seja, utilizando uma rotina computacional, elaborou-se uma regressão polinomial de $BP = BP(N)$ usando o software Excel 2003:

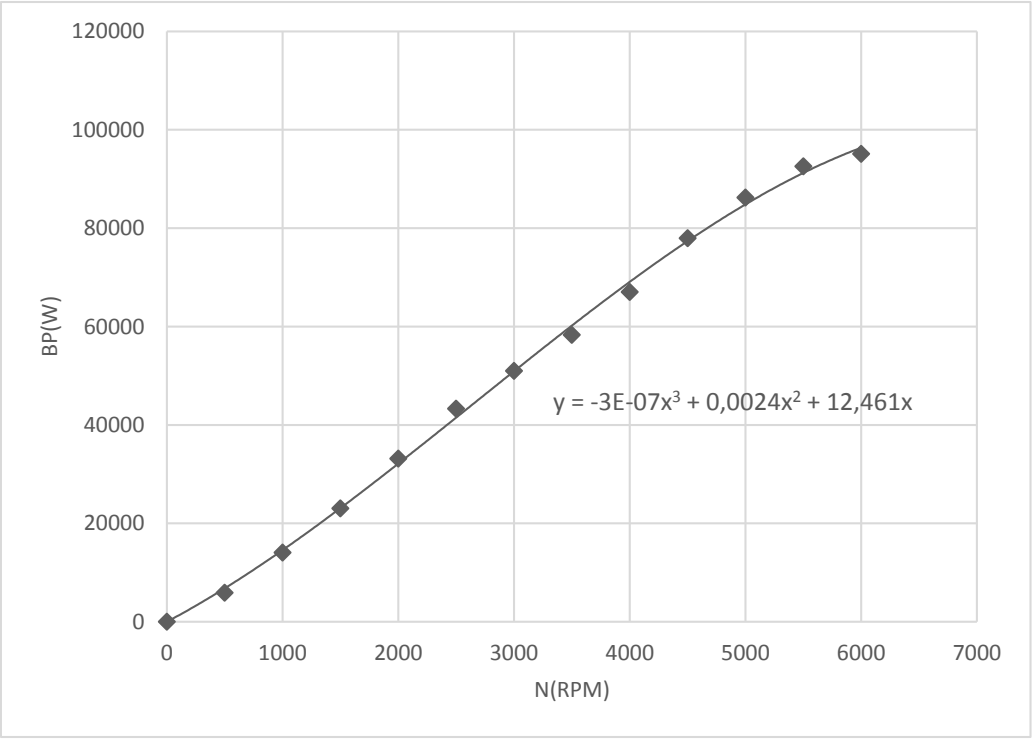


Figura 2.8 Regressão polinomial dos Valores calculados da Potência do Motor em função da Rotação do Motor

As duas propriedades podem então ser relacionadas pelo seguinte polinômio:

$$BP[W](N[rpm]) = -3\times10^{-7} \cdot N^3 + 2,4\times10^{-3} \cdot N^2 + 12,461 \cdot N \tag{2.6}$$

Craig J. Hoff & Greg W. Davis (2003) também fornecem para esse determinado motor que o Consumo Específico de Combustível ($BSFC$) pode ser determinado em função da Pressão Média Efetiva e da Rotação do Motor por meio da seguinte expressão:

$BSFC(i)[g/kWhr](N(i)[rpm], BMEP(kPa)) =$

$$= \begin{cases} a \cdot BMEP + b \cdot BMEP^2 + c \cdot N + d \cdot BMEP \cdot N + e \cdot BMEP^2 \cdot N \\ \qquad + f \cdot N^2 + g \cdot BMEP \cdot N^2 + h \cdot (BMEP \cdot N)^2 \end{cases}\Big|_i, \quad BSFC(i) < 600$$
$$600, \quad BSFC(i) \geq 600 \tag{2.7}$$

As constantes a, b, c, d, e, f, g, h não possuem significado físico. Seus valores são explicitados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Constantes obtidas na regressão polinomial

a	b	c	d	e	f	g	h
1,83	$-1{,}57.10^{-3}$	$4{,}59.10^{-1}$	$-2{,}03.10^{-3}$	$1{,}62.10^{-6}$	$-6{,}02.10^{-5}$	$2{,}76.10^{-7}$	$-2{,}22.10^{-10}$

As propriedades do motor podem então ser utilizadas nas Simulações dos Testes de Aceleração e do Teste de Economia de Combustível conforme explicado posteriormente.

2.2 FORÇAS RESISTIVAS

O diagrama de corpo livre de um veículo andando em um plano inclinado é ilustrado na Figura 2.9.

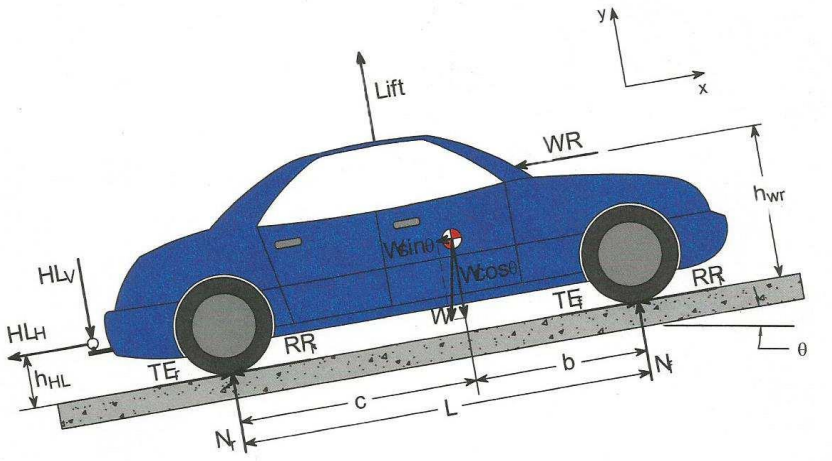


Figura 2.9 Diagrama de corpo livre para veículo andando em pista inclinada (Gillespie 1992)

Índices:

$f \rightarrow$ eixo dianteiro;
$r \rightarrow$ eixo traseiro;
$H \rightarrow$ direção horizontal;
$V \rightarrow$ direção vertical.

Distâncias e ângulo:

$L \rightarrow$ entre eixos;
$c \rightarrow$ do centro de gravidade do veículo até o eixo traseiro;
$b \rightarrow$ do centro de gravidade do veículo até o eixo dianteiro;
$h_{wr} \rightarrow$ do chão até o ponto de atuação da Força de resistência do ar ou Arrasto (WR);
$h_{HL} \rightarrow$ do chão até o ponto da força de carregamento de reboque (HL);
$\theta \rightarrow$ ângulo de inclinação do chão em relação à direção horizontal.

Forças:

$Lift \rightarrow$ de Sustentação do ar;
$W \rightarrow$ Peso (no centro de gravidade);
$N \rightarrow$ Normal (que o chão realiza sobre o carro);
$TE \rightarrow$ de tração do veículo;
$RR \rightarrow$ de resistência à rolagem (interação dos pneus com o chão).

A Força Resistiva Resultante (RL) será igual à soma da Força de Resistência a Rolagem (RR), da Força de Resistência do Ar (WR) e da Força devido à inclinação (GR):

$$RL = RR + WR + GR \tag{2.8}$$

A Resistência à Rolagem (RR) depende do Coeficiente de Resistência à Rolagem (K_o), do peso do veículo (W) e da inclinação (θ):

$$RR = K_o \cdot W \cdot \cos(\theta) \tag{2.9}$$

O coeficiente de resistência à rolagem depende de vários fatores como: superfície da pista, temperatura, pressão, velocidade angular, material, geometria e inclinação do pneu. Isso afeta a deformação do pneu, resultando em uma força contrária ao movimento, conforme a Figura 2.10.

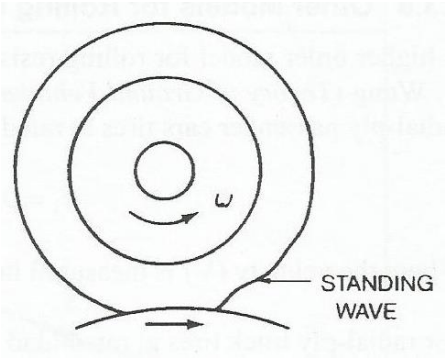


Figura 2.10 Deformação do Pneu (Gillespie 1992)

A Tabela 2.4 mostra valores de K_o para diferentes condições de rolagem:

Tabela 2.4 Coeficientes de Resistência à rolagem para pneus em diferentes condições de superfícies (Hoff e Gregory 2003) - modificado

Superfície da Pista	Ko
Pista Bem Pavimentada - Asfalto	0.010
Pista Bem Pavimentada - Concreto	0.011
Pista pavimentada média	0.015
Pista Gasta	0.035
Pista de Cascalho	0.020-0.025
Pista de Terra	0.045
Areia	0.150-0.300

A Força de resistência do ar (WR) depende do Coeficiente de arrasto (C_d), da área frontal (A_f), da densidade do Ar (ρ) e da velocidade do veículo (v):

$$WR = 0,5 \cdot C_d \cdot A_f \cdot \rho \cdot v \tag{2.10}$$

Considerando o ar como um gás ideal, a sua densidade (ρ) pode ser calculada como a razão entre a pressão absoluta (P) e o produto da temperatura absoluta (T) e a constante ideal dos gases para ar seco (R) (Moran e Shapiro 2008):

$$\rho = \frac{P}{T \cdot R} \tag{2.11}$$

A norma SAE J1263 (JAN2009) regula que a área frontal (A_f) deve ser calculada por 80% da área do retângulo cujos lados são a altura (h) e a largura (w) do veículo:

$$A_f = 0,8 \cdot h \cdot w \tag{2.12}$$

Os parâmetros h, w e C_d são propriedades do Chassi e sua determinação não faz parte dessa obra.

A Tabela 2.5 mostra valores desses parâmetros para modelos específicos.

Tabela 2.5 Coeficientes de arrasto para veículos modernos (Hoff e Gregory 2003) - modificado

	Cd			Af			Cd*A		
	Baixo	Alto	Média	Baixo	Alto	Média	Baixo	Alto	Média
Carro de Passageiro	0.25	0.39	0.31	1.81	2.68	2.07	0.53	1.04	0.65
Caminhões Leves	0.25	0.57	0.40	2.18	3.26	2.74	0.64	1.86	1.10
Carros Conceituais	0.16	0.22	0.19	1.81	2.07	1.93	0.31	0.45	0.37

A Força devido à inclinação (GR) depende do peso (W) e da inclinação (θ):

$$GR = W \cdot sen(\theta) \tag{2.13}$$

A Potência de Resistência (P_{rl}) é obtida da multiplicação das forças (RL) pela velocidade do veículo (v):

$$P_{RL} = RL \cdot v \tag{2.14}$$

A Figura 2.11 mostra gráficos típicos de forças e potências resistivas variando com a velocidade do veículo e com a inclinação:

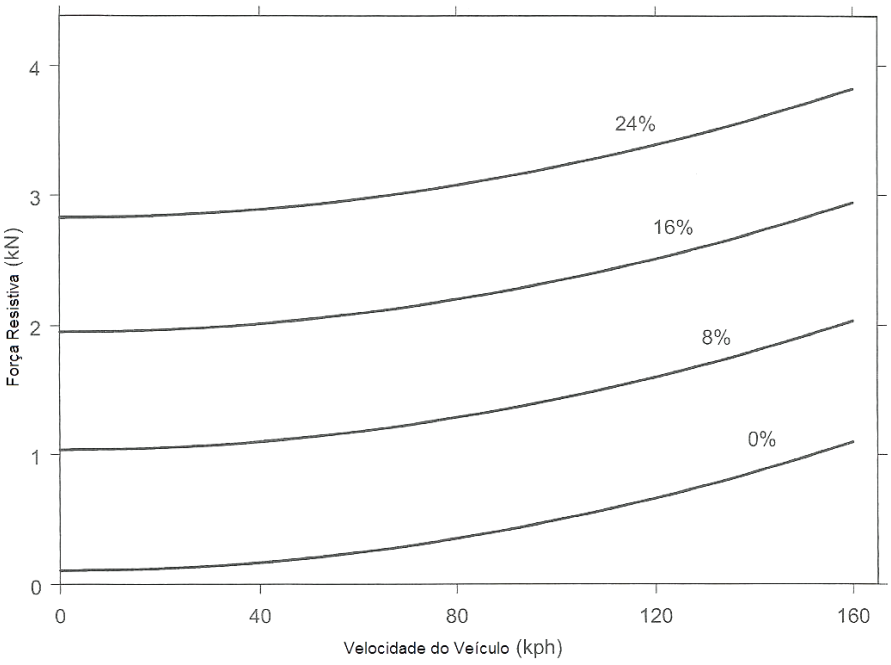


Figura 2.11 Forças Resistivas em função da velocidade do veículo e do percentual de inclinação (Hoff e Gregory 2003) - modificado

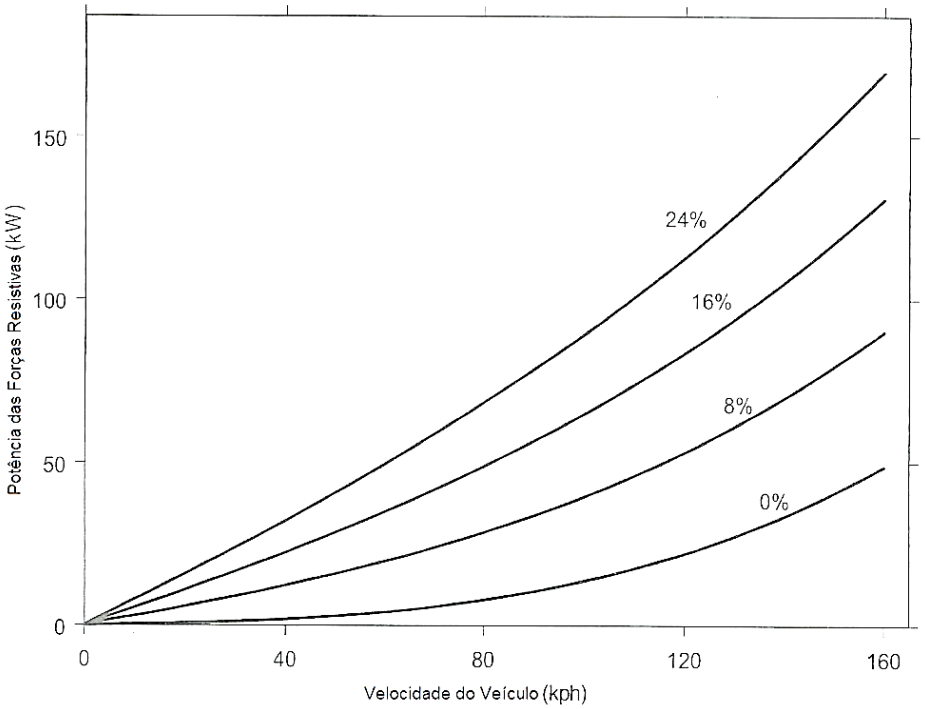


Figura 2.12 Potência de resistência em função da velocidade do veículo e do percentual de inclinação (Hoff e Gregory 2003) - modificado

Essas curvas são essenciais para o dimensionamento da cadeia cinemática.

2.2.1 Seleção do Chassi

Analogamente à Seleção do Motor, não é objetivo do projeto qualquer otimização no Chassi. Logo, esse componente também será constante tanto para o Teste de Aceleração quanto para o Teste de Economia de Combustível. Todos os indivíduos serão comparados para uma mesma configuração de Chassi.

Para as duas simulação será usado o Chassi de um 1994 Saturn SL2 com tração nas rodas traseiras:

Figura 2.13 1994 Saturn SL2 (CarsDirect s.d.)

As propriedades relevantes do Chassi são (CarsDirect s.d.):

- Coeficiente de Arrasto (Cd) = 0.345;
- Altura do Veículo (h) = 67,6 in (1,717 m);
- Largura do Veículo (w) = 52,5 in (1,333 m);
- Força Peso do Veículo (m) = 2405 lbf (1091kgf);
- Distância Entre Eixos (W_b) = 102 in (2,5908 m);
- Distância do centro de gravidade do veículo até o eixo dianteiro (b) = 45,9 in (1,16586 m);
- Distância do centro de gravidade do veículo até o eixo traseiro (c) = 56,1 in (1,42494 m);
- Máximo Coeficiente de Fricção das rodas com o asfalto (μ_{peak}) = 1;

Essas propriedades serão implementadas nas rotinas para as simulações do Teste de Aceleração e o Teste de Economia de Combustível.

2.3 SISTEMA DE TRASMISSÃO

A potência de saída de um motor não pode ser diretamente aplicada às rodas. Tipicamente, o Torque de saída é muito baixo e a rotação de saída é muito alta. Esses parâmetros são condicionados por uma caixa de transmissão e por engrenagens finais. A inercia rotacional e as perdas por atrito desses componentes reduzem a Potência que pode ser transmitida para as rodas. Uma vez transmitida, as rodas devem gerar forças de tração para empurrar o veículo. As características operacionais da transmissão serão discutidas a seguir.

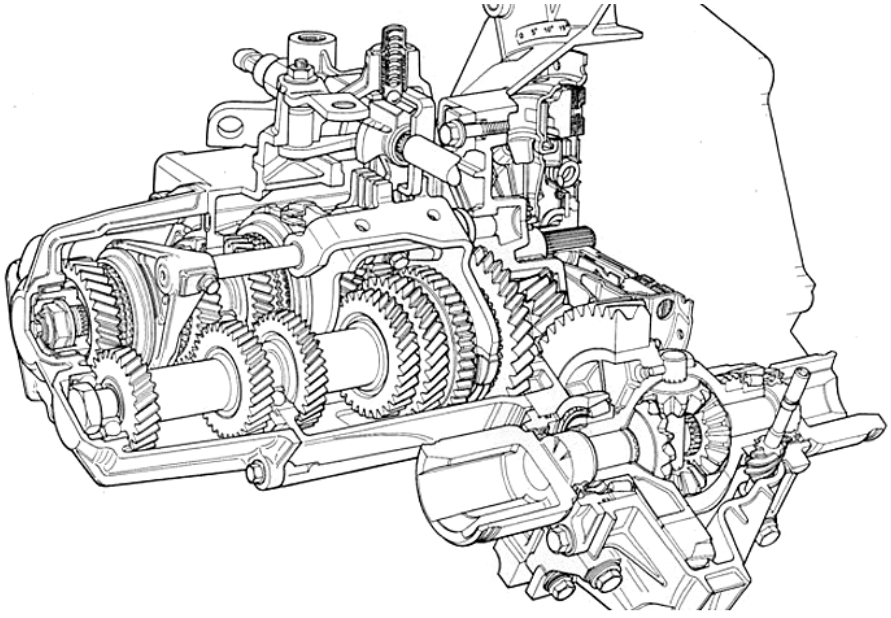


Figura 2.14 Caixa de Redução do sistema de transmissão manual (Gillespie 1992)

Torque e Potência de um motor de combustão à gasolina, com o acelerador completamente atuado, *versus* a rotação do motor é plotado na Figura 2.15. A desvantagem inerente deste tipo de motor é o Torque e Potência muito baixos quando o motor está em baixa rotação. Como a demanda de Potência é relativamente alta para retirar o veículo do estado estacionário, precisa-se de um mecanismo de redução de velocidade para atingi-la. Este mecanismo consiste em uma transmissão por engrenagem com 3, 4, 5, 6 ou mais razões de velocidade.

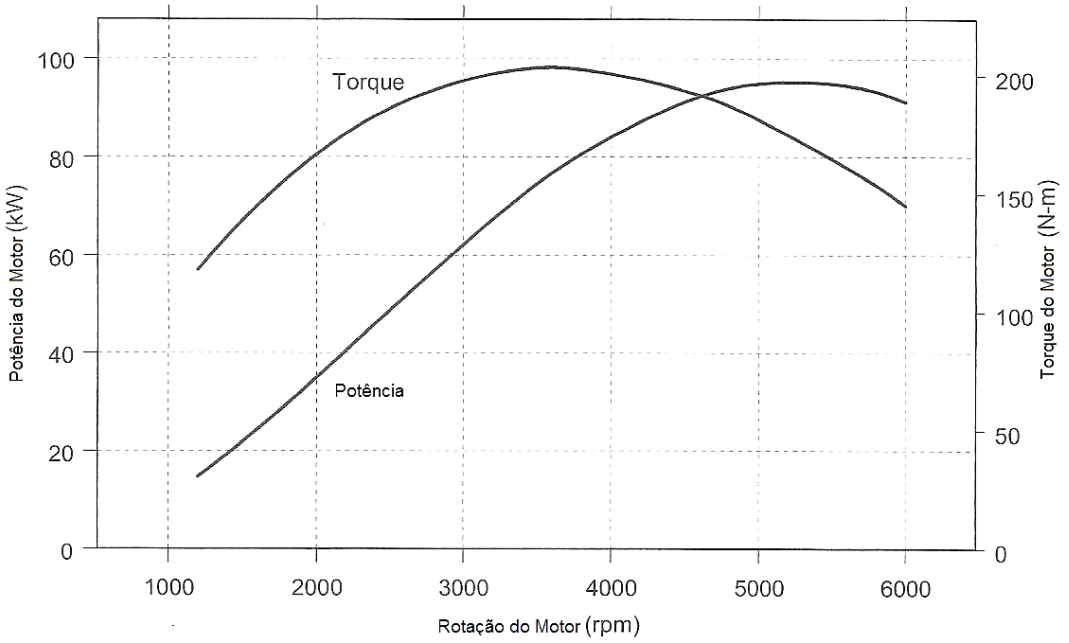


Figura 2.15 Curvas características de Torque e Potência para um Motor a gasolina (Hoff e Gregory 2003) - modificado

O sistema propulsor ideal deveria ter grande oferta de Torque à baixa rotação para oferecer alta tração quando o veículo fosse sair do estado estacionário. Deve ter também Potência constante pelo espectro de velocidades operacionais, pois assim ele iria providenciar máxima aceleração por qualquer estado do movimento. As curvas de Torque e Potência para esse motor estão na Figura 2.16.

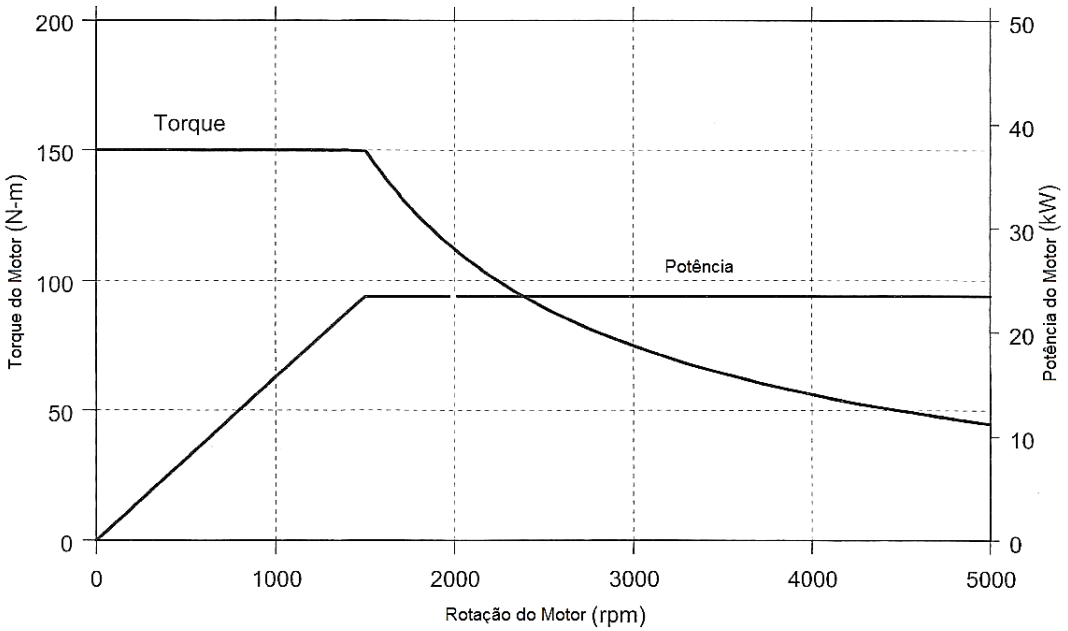


Figura 2.16 Curvas características de Torque e Potência para um Motor ideal (Hoff e Gregory 2003) - modificado

As vantagens do sistema ideal podem ser vistas quando comparado ao sistema não-ideal, na Figura 2.17. Esse sistema está representado sem perdas mecânicas.

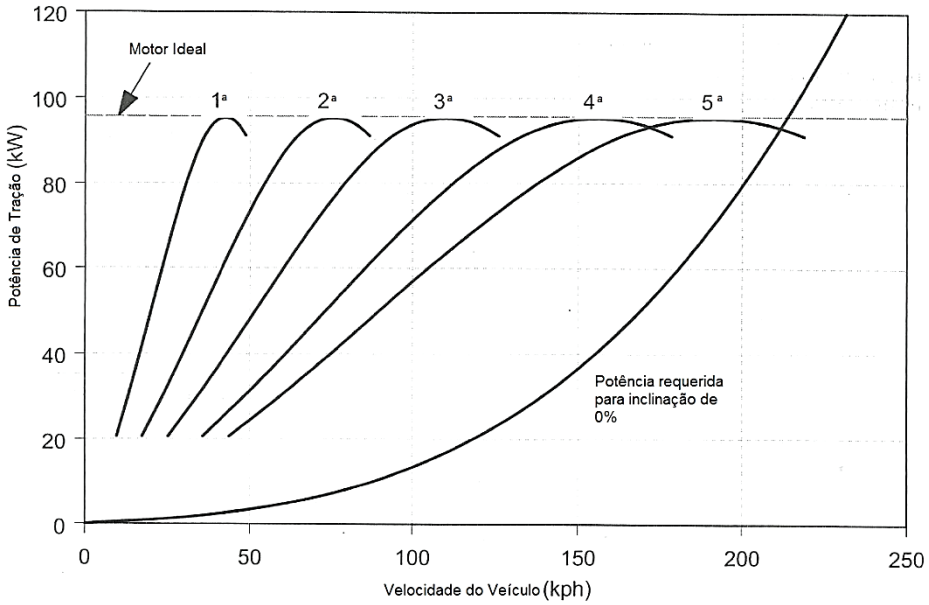


Figura 2.17 Potência de Tração disponível de um Motor ideal comparado com um Motor típico com sistema de transmissão (Hoff e Gregory 2003) - modificado

A diferença vertical entre a Potência disponível e a Potência necessária para superar as forças de resistência para o veículo representam a Potência para aceleração. Pode-se perceber que o sistema ideal poderia prover aceleração máxima em qualquer velocidade. O sistema não ideal tenta simular o sistema ideal, operando sempre o mais próximo possível do pico da marcha, por exemplo, para o veículo

mostrado, em uma velocidade de 100 km/h, o motorista deve operar em 3ª marcha. Repare que essa simulação fica melhor quando é aumentado o número de marchas, porém esse aumento implica em maior custo de fabricação.

O Sistema de transmissão contém: uma embreagem, caixa de transmissão, eixo cardã, diferencial, eixo traseiro e roda. A função do sistema de transmissão é transmitir a Potência de saída do motor para os pneus. As possíveis configurações reduzem a rotação e aumentam o Torque. Esta seção descreve a operação deste componente.

O Sistema de Transmissão ideal não possui perdas por atrito nem por inércia rotacional. Para determinar a tração disponível, temos que relacionar a rotação do motor com a velocidade linear do veículo. Isso pode ser feito pelo balanço de Potência pela Cadeia Cinemática. Primeiramente iremos considerar a caixa de transmissão:

Para um sistema ideal a Potência perdida é nula e a Potência de Saída (out) é igual a Potência de entrada (in):

$$P_{out} = P_{in} \tag{2.15}$$

Substituindo pela definição de Potência em um eixo rotativo de (Budynas e Nisbett 2010):

$$T_{out} \cdot \omega_{out} = T_{in} \cdot \omega_{in} \tag{2.16}$$

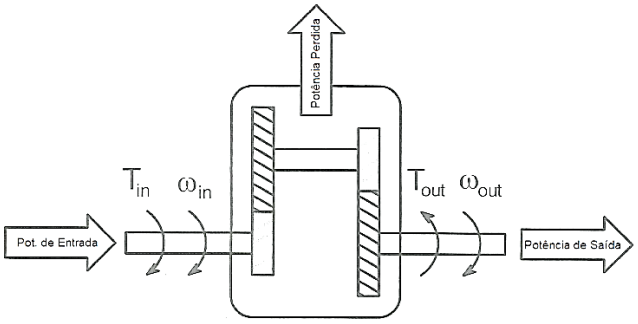


Figura 2.18 Modelo de Caixa de Transmissão (Gillespie 1992)- modificado

Sendo:

T_{out}, o Torque de saída;

T_{in}, o Torque de entrada;

ω_{out}, a velocidade angular de saída;

ω_{in}, a velocidade angular de entrada.

Explicitando-se para o Torque de saída, tem-se:

$$T_{out} = T_{in} \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \tag{2.17}$$

A razão de transmissão da caixa de transmissão (R_t) pode ser definida em termos das velocidades angulares:

$$R_t = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \tag{2.18}$$

Quando R_t é maior do que 1, temos que o eixo de saída está rodando mais devagar do que o eixo de entrada e o Torque de saída pode ser calculado por:

$$T_{out} = T_{in} \cdot R_t \tag{2.19}$$

Agora considerando todo o Sistema de Transmissão como na Figura 2.19 pode-se demonstrar as outras relações:

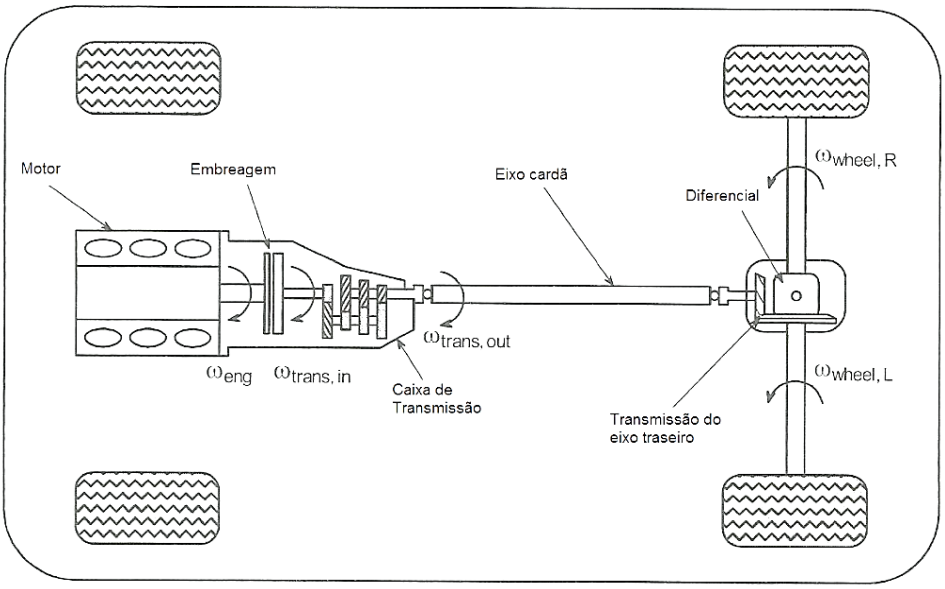


Figura 2.19 Esquema de veículo com tração traseira e transmissão manual (Hoff e Gregory 2003) - modificado

Para a caixa de transmissão:

$$R_t = \frac{\omega_{eng}}{\omega_{trans}} \tag{2.20}$$

Então:

$$\omega_{trans} = \frac{\omega_{eng}}{R_t} \tag{2.21}$$

$$T_{trans} = R_t \cdot T_{eng} \tag{2.22}$$

Para o eixo traseiro:

$$R_a = \frac{\omega_{trans}}{\omega_{wheel}} \tag{2.23}$$

Então:

$$\omega_{wheel} = \frac{\omega_{trans}}{R_a} \tag{2.24}$$

$$T_{wheel} = R_a \cdot T_{trans} \tag{2.25}$$

Os índices *eng* se referem ao motor, *trans* á caixa de transmissão e *wheel* ao pneu. Ra é a razão de transmissão de eixo traseiro.

$$\omega_{wheel} = \frac{\omega_{eng}}{R_a \cdot R_t} \tag{2.26}$$

Finalmente:

$$T_{wheel} = R_t \cdot R_a \cdot T_{eng} \tag{2.27}$$

Em um sistema não ideal, uma parte da Potência do Motor é perdida devido a vários fatores: engrenamento, rolamentos, vedamento, viscosidade do meio de rotação e outros. Para contabilizar esse efeito, é utilizado uma eficiência do sistema de transmissão (n_{ov}). Segundo (Gillespie 1992), ela pode ser calculada por:

$$n_{ov} = 1 - \left(0,06 + \frac{R_t^{1,5}}{100} \right) \tag{2.28}$$

E temos que:

$$T_{wheel} = n_{ov} \cdot R_t \cdot R_a \cdot T_{eng} \tag{2.29}$$

A Figura 2.20 mostra uma comparação genérica entre 1ª marcha (alto R_t) e a 5ª marcha (baixo R_t). Claramente as perdas na primeira marcha são maiores:

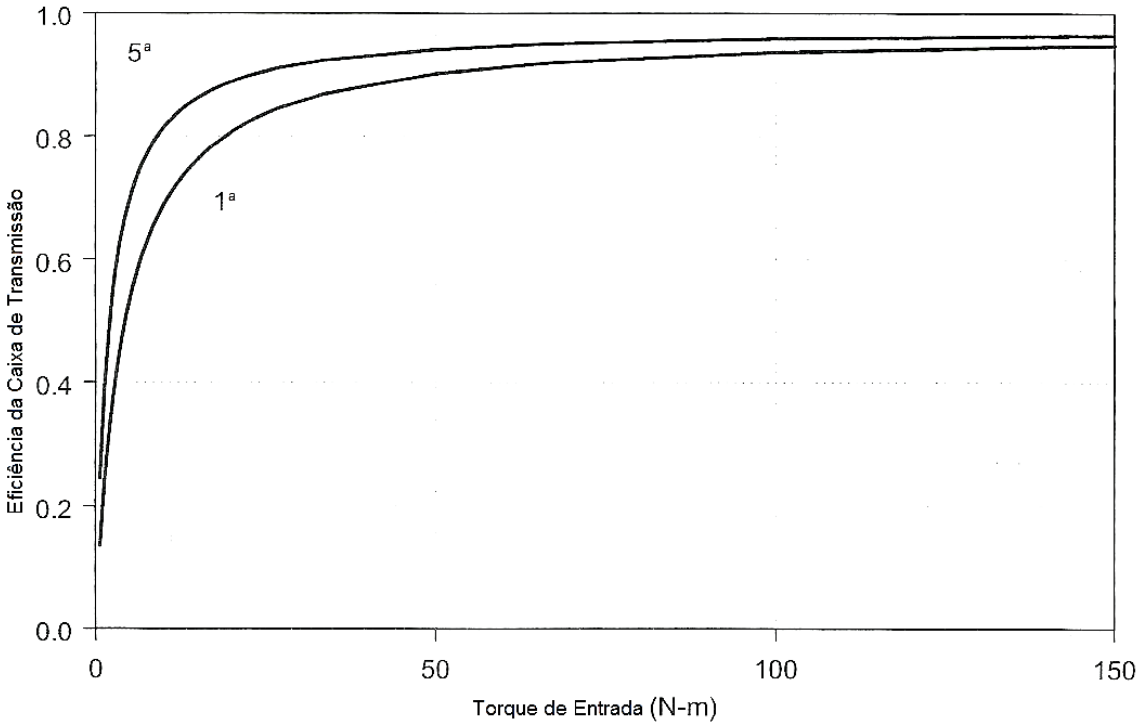


Figura 2.20 Variação da eficiência do sistema de transmissão com Torque de 5ª e 1ª marchas a 2500 rpm (Hoff e Gregory 2003) - modificado

A velocidade do veículo e a velocidade de rotação do motor são relacionadas pelas equações do sistema de transmissão e pelas equações da cinemática

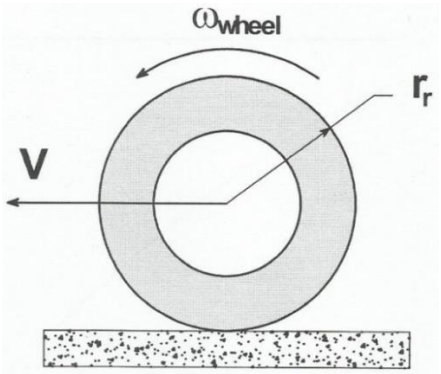


Figura 2.21 Cinemática de uma roda ideal (Gillespie 1992)

Para uma roda ideal, a velocidade linear do veículo (v) será o produto da velocidade angular da roda ω_{wheel} e o Raio da Roda (r_r):

$$v = \omega_{wheel} \cdot r_r \tag{2.30}$$

A Tabela 2.6 especifica valores típicos de rodas para carros de passeio, onde utilizaremos os valores para raio de roda da última coluna.

Tabela 2.6 Especificações de raio de roda típicos para carros de passeio (Yokohoma 2008)

Tire Size	Overall Tire Dia. (Inch)	Static Radius (Inch)	Revs. Per Mile	Dist. per rev. (ft)	Rolling Radius (in)	Dist. per rev. (m)	Rolling Radius (mm)
P175/70R13	22.7	10.3	916	5.76	11.0	1.09	280
P185/70R13	23.2	10.5	894	5.91	11.3	1.12	287
P175/65R14	23.0	10.4	904	5.84	11.2	1.11	283
P175/70R14	23.7	10.6	878	6.01	11.5	1.14	292
P185/60R14	22.7	10.2	916	5.76	11.0	1.09	280
P185/65R14	23.5	10.5	885	5.97	11.4	1.13	289
P185/70R14	24.3	11.0	856	6.17	11.8	1.17	299
P195/60R14	23.1	10.5	897	5.89	11.2	1.11	286
P195/65R14	24.0	10.7	866	6.10	11.6	1.15	296
P195/70R14	24.8	11.2	836	6.32	12.1	1.20	306
P205/70R14	25.4	11.4	819	6.45	12.3	1.22	313
P215/60R14	24.2	10.9	860	6.14	11.7	1.16	298
P185/65R15	24.5	11.0	849	6.22	11.9	1.18	302
P195/50R15	22.7	10.3	914	5.78	11.0	1.09	280
P195/55R15	23.4	10.7	887	5.95	11.4	1.13	289
P195/60R15	24.2	10.8	860	6.14	11.7	1.16	298
P195/65R15	25.0	11.1	831	6.35	12.1	1.20	308
P205/50R15	23.1	10.5	897	5.89	11.2	1.11	286
P205/60R15	24.7	11.1	840	6.29	12.0	1.19	305
P205/65R15	25.4	11.2	818	6.45	12.3	1.22	313
P205/70R15	26.3	11.7	790	6.68	12.8	1.27	324
P215/60R15	25.2	11.3	824	6.41	12.2	1.21	311
P215/65R15	26.0	12.0	799	6.61	12.6	1.25	321
P215/70R15	26.9	12.0	773	6.83	13.0	1.29	331
P225/50R15	23.9	10.7	869	6.08	11.6	1.15	295
P225/60R15	25.6	12.0	811	6.51	12.4	1.23	316
P205/55R16	24.8	12.0	836	6.32	12.1	1.20	306
P205/60R16	25.7	11.7	809	6.53	12.5	1.24	317
P215/55R16	25.3	11.4	822	6.42	12.3	1.22	312
P215/60R16	26.1	11.7	795	6.64	12.7	1.26	322
P225/60R16	26.7	12.2	778	6.79	13.0	1.29	329
P235/55R16	26.2	12.0	793	6.66	12.7	1.26	323
P245/50R16	25.7	11.8	807	6.54	12.5	1.24	317
P215/50R17	25.5	11.7	814	6.49	12.4	1.23	315
P225/55R17	26.7	12.0	777	6.80	13.0	1.29	330

Tire Size	Overall Tire Dia. (Inch)	Static Radius (Inch)	Revs. Per Mile	Dist. per rev. (ft)	Rolling Radius (in)	Dist. per rev. (m)	Rolling Radius (mm)
P235/75R15	28.9	12.9	719	7.34	14.0	1.39	356
P265/70R15	29.7	13.2	700	7.54	14.4	1.43	366
P265/75R15	30.7	13.6	676	7.81	14.9	1.48	379
P215/70R16	28.0	12.7	742	7.12	13.6	1.35	345
P225/70R16	28.5	12.9	730	7.23	13.8	1.37	351
P225/75R16	29.3	13.2	710	7.44	14.2	1.41	361
P235/70R16	29.1	13.1	713	7.41	14.1	1.40	359
P235/75R16	29.9	13.4	694	7.61	14.5	1.44	369
P245/70R16	29.6	13.3	702	7.52	14.4	1.42	365
P245/75R16	30.5	13.6	682	7.74	14.8	1.47	376
P255/65R16	29.0	13.1	716	7.37	14.1	1.40	358
P255/70R16	30.3	13.6	686	7.70	14.7	1.46	373
P265/70R16	30.7	13.7	677	7.80	14.9	1.48	378
P275/70R16	31.3	13.9	664	7.95	15.2	1.51	386
P265/70R17	31.8	14.3	653	8.09	15.4	1.53	392
P275/60R17	29.9	13.5	694	7.61	14.5	1.44	369

A relação entre a velocidade de rotação do motor (N) e a velocidade do veículo (v), denominada Razão de Velocidades (R_v), é dada por:

$$R_v = \frac{N}{v} = \frac{R_a \cdot R_t}{rr} \tag{2.31}$$

Sendo:

R_a, a razão de eixo traseiro;

R_t, a razão de transmissão;

rr, o raio da roda.

Sabendo a Razão de Velocidades (R_v), a Potência fornecida pelo sistema aos pneus pode ser calculada. Para um sistema ideal com transmissão manual, o gráfico é dado conforme a Figura 2.212. Para gerar esse gráfico foi usado um sistema com as seguintes configurações:

Tabela 2.7 Dados de transmissão de veículo médio (Hoff e Gregory 2003) - modificado

Variável	Símbolo	Valor
Razão de Transmissão	Rt	3,78 2,12 1,46 1,03 0,84
Razão de Eixo	Ra	3,68
Eficiência para cada Marcha	ηt	$0{,}94 - (Rt^{1,5}/100)$

Os principais valores desse Sistema de Transmissão estão listados a seguir:

Tabela 2.8 Valores da Caixa de Transmissão (Hoff e Gregory 2003) - modificado

Variável/Marcha	1	2	3	4	5
Razão Total	13,91	7,80	5,37	3,79	3,09
Razão de Velocidade (rpm/mph)	123,34	69,17	47,64	33,61	27,41
Eficiência	0,87	0,91	0,92	0,93	0,93

Nota-se que a potência máxima ideal de saída do motor, excluindo-se perdas, não se altera com a razão de transmissão. Essa razão simplesmente determina a velocidade do veículo para um determinado valor de rotação do motor. O efeito das perdas é maior nas primeiras marchas, em que os valores de R_t são maiores. Caso não houvesse perdas, a Potência máxima seria de 95 kW.

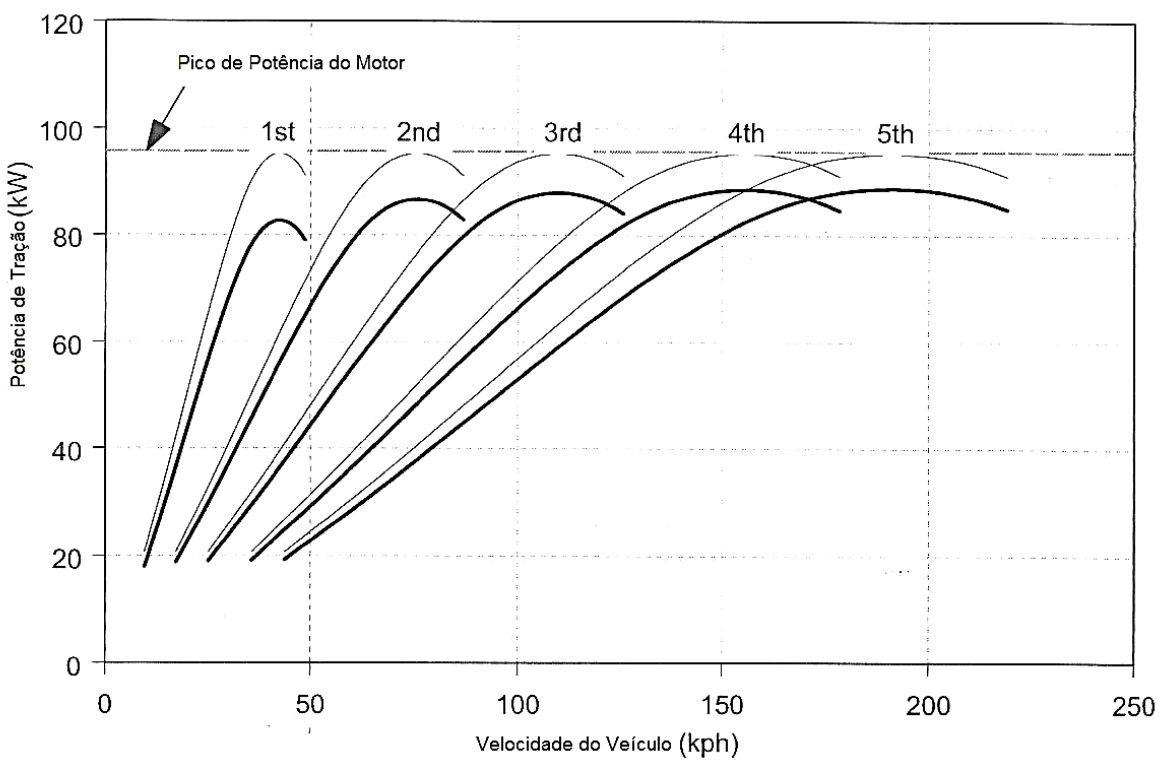


Figura 2.22 Efeito das perdas por fricção na Potência disponível para transmissão manual (Hoff e Gregory 2003) - modificado

2.4 SELEÇÃO DA CADEIA CINEMÁTICA

Este Projeto de Graduação possui como objetivo a otimização da Cadeia Cinemática. O meio pelo qual será feita essa seleção é inovador.

Usualmente, a seleção das razões de transmissão, da razão de eixo traseiro e da geometria das rodas é feita com base em vários argumentos (Hoff e Gregory 2003):

1. Propósito do veículo. O veículo pode ser projetado para ser um modelo de passeio, um modelo econômico ou até mesmo um modelo de corrida. Dependendo do propósito, as razões de

transmissão podem ser escolhidas para maximizar aceleração, economia de combustível, dirigibilidade ou outros parâmetros.

2. Potência, Torque do motor assim como as curvas de consumo de combustível. Isso vai determinar as razões de transmissão para que o motor opere nas condições mais favoráveis.
3. Forças Resistivas atuantes no veículo. Essas são as forças que o motor/transmissão devem superar.
4. Tipo de transmissão (manual, automática, CVT). Isso vai determinar o número de marchas. Tipicamente, os veículos utilizam 5 marchas para transmissão manual e 4 marchas para transmissão automática. Em cada caso, a maior marcha é usada para diminuir o consumo de combustível.
5. A localização da tração (FWD, RWD, AWD, 4WD). Isso esta relacionado com a proposta do veículo.
6. O tamanho da roda. Isso influencia diretamente a razão de velocidades, fator de grande influência na aceleração e no consumo de combustível do veículo.

A Tabela 2.9 mostra diferentes configurações de veículos e a Tabela 2.10 mostra as respectivas configurações de Sistemas de Transmissão.

Tabela 2.9 Chassis e Motores selecionados para veículos nos EUA (Hoff e Gregory 2003)

			Mass		Peak Power		Peak Torque	
Vehicle	Drive	Type	kg	Engine	kW	rpm	N-m	rpm
Saturn SL1	FWD	Compact	1060	L4 SOHC	74.5	5000	155	2400
Saturn SL1	FWD	Compact	1073	L4 SOHC	74.5	5000	155	2400
Saturn SL2	FWD	Compact	1090	L4 DOHC	92.4	5600	165	4800
Saturn SL2	FWD	Compact	1103	L4 DDOHC	92.4	5600	165	4800
VW Beetle	FWD	Compact	1318	L4-SI	85.7	5200	165	2600
VW Beetle	FWD	Compact	1318	L4-SI	85.7	5200	165	2600
VW Beetle	FWD	Compact	1280	L4-TDI	67.1	3750	210	1900
VW Beetle	FWD	Compact	1300	L4-TDI	67.1	3750	210	1900
BMW 3 Series	RWD	Mid Size	1453	V6	137.1	6000	237	3500
Cadillac Catera	RWD	Mid Size	1734	V6	149.0	600	260	3400
Chevy Impala - LS	FWD	Mid Size	1568	V6	149.0	5200	305	4000
Chevy Impala - Sedan	FWD	Mid Size	1504	V6	134.1	5200	278	4000
Chevy Malibu	FWD	Mid Size	1412	V6	126.7	5200	258	4000
Honda Accord	FWD	Mid Size	1359	L4	119.2	5500	218	4500
Honda Accord	FWD	Mid Size	1386	L4	119.2	5500	218	4500
Olds Intrigue	FWD	Mid Size	1561	V6	160.2	5600	312	4400
Saturn L200	FWD	Mid Size	1359	L4	100.6	5200	193	4400
Saturn L200	FWD	Mid Size	1379	L4	100.6	5200	193	4400
Saturn L300	FWD	Mid Size	1487	V6	135.6	5600	258	3600
Dodge Voyager	FWD	Minivan	1759	L4	111.8	5000	226	4000
Olds Silhouette	FWD	Minivan	1795	V6	137.8	5200	285	4000
Ford F150	RWD	Pickup	1833	V6	150.5	4800	342	3400
Ford F150	4WD	Pickup	1833	V6	150.5	4800	342	3400
BMW Z8	RWD	Sport	1636	V8	293.5	6600	499	3800
Corvette - Coupe	RWD	Sport	1475	V8	260.8	5600	509	4400
Corvette - Coupe	RWD	Sport	1475	V8	260.8	5600	488	4400
Corvette - Z06	RWD	Sport	1475	V8	286.8	6000	522	4800
Ford Expedition	RWD	SUV-Large	2430	V8	172.8	4750	395	3450
Ford Expedition	RWD	SUV-Large	2430	V8	193.7	4500	475	2500
Ford Expedition	4WD	SUV-Large	2430	V8	193.7	4500	475	2500
Hummer - H2	4WD	SUV-Large	2909	V8	235.4	5200	488	4000
Acura MDX	4WD	SUV-Mid	2009	V6	193.7	5750	339	3.5k-5k
Jeep Liberty	RWD	SUV-Small	1753	V6	156.5	5200	319	4000
Jeep Liberty	4WD	SUV-Small	1753	V6	156.5	5200	319	4000
Nissan Murano	AWD	SUV-Small	1798	V6	182.5	5800	334	4400
Saturn Vue	FWD	SUV-Small	1445	L4	106.5	5400	206	4000
Saturn Vue - AWD	AWD	SUV-Small	1587	V6	134.8	6000	264	4000
Saturn Vue - VTI	FWD	SUV-Small	1471	L4	106.5	5400	206	4000

Tabela 2.10 Valores correspondentes das Transmissões (Hoff e Gregory 2003)

			Transmission Ratios							4WD	
Vehicle	Type	Final	1st	2nd	3rd	4rth	5th	6th	Rev	Low	Std Tire
Saturn SL1	Man	4.06	3.25	1.95	1.17	0.81	0.61	----	2.92	----	P185/65SR14
Saturn SL1	Auto	4.06	2.53	1.27	0.81	0.60	----	----	1.91	----	P185/65SR14
Saturn SL2	Man	4.06	3.25	1.95	1.42	1.03	0.73	----	2.92	----	P185/65SR14
Saturn SL2	Auto	4.06	2.53	1.56	1.03	0.70	----	----	1.91	----	P185/65SR14
VW Beetle	Man	4.24	3.78	2.12	1.36	1.03	0.84	----	3.60	----	P205/55HR16
VW Beetle	Auto	5.04	2.71	1.55	1.00	0.68	----	----	2.11	----	P205/55HR16
VW Beetle	Man	3.89	3.78	2.12	1.36	0.97	0.76	----	3.60	----	P205/55HR16
VW Beetle	Auto	3.62	2.71	1.44	1.00	0.74	----	----	2.88	----	P205/55HR16
BMW 3 Series	Man	3.15	4.23	2.52	1.66	1.22	1.00	----	4.04	----	P205/55R16
Cadillac Catera	Auto	3.90	2.86	1.62	1.00	0.72	----	----	2	----	P235/45HR17
Impala - LS	Auto	3.05	2.92	1.57	1.00	0.71	----	----	2.39	----	P255/60R16
Impala - Sedan	Auto	2.86	2.92	1.57	1.00	0.71	----	----	2.39	----	P255/60R16
Chevy Malibu	Auto	3.05	2.96	1.62	1.00	0.68	----	----	2.14	----	P215/60R-15
Honda Accord	Man	4.39	3.27	1.77	1.15	0.87	0.58	----		----	P195/65R15
Honda Accord	Auto	4.44	2.65	1.52	1.04	0.74	0.57	----	2.00	----	P195/65R15
Olds Intrigue	Auto	3.05	2.92	1.57	1.00	0.70	----	----	2.39	----	P225/60HR16
Saturn L200	Man	4.50	3.38	1.76	1.18	0.89	0.70	----	----	----	P195/65R15
Saturn L200	Auto	3.91	2.96	1.62	1.00	0.69	----	----	----	----	P195/65R15
Saturn L300	Auto	3.68	2.96	1.62	1.00	0.69	----	----	----	----	P215/55R16
Dodge Voyager	Auto	3.62	2.84	1.57	1.00	0.69	----	----	2.21	----	P215/70R15
Olds Silhouette	Auto	3.29	2.96	1.57	1.00	0.71	----	----	2.39	----	P225/60R16
Ford F150	Man	3.08	3.90	2.25	1.49	1.00	0.80	----	3.41	----	P235/70R16SL
Ford F150	Man	3.31	3.90	2.25	1.49	1.00	0.80	----	3.41	2.64	P235/70R16SL
BMW Z8	Man	3.15	4.23	2.53	1.67	1.23	1.00	0.83	----	----	P275/40WR18
Corvette - Coupe	Man	1.71	2.66	1.78	1.30	1.00	0.74	0.5	2.9	----	P275/40ZR18
Corvette - Coupe	Auto	2.73	3.06	1.62	1.00	0.70	----	----	1.9	----	P275/40ZR18
Corvette - Z06	Man	1.71	2.97	2.07	1.43	1.00	0.84	0.56	3.28	----	P295/35ZR18
Ford Expedition	Auto	3.73	2.84	1.55	1.00	0.70	----	----	2.32	----	P265/70R17
Ford Expedition	Auto	3.73	2.84	1.55	1.00	0.70	----	----	2.32	----	P265/70R17
Ford Expedition	Auto	3.73	2.84	1.55	1.00	0.70	----	----	2.32	2.64	P265/70R17
Hummer - H2	Auto	4.10	3.06	1.62	1.00	0.69	----	----	2.29	2.64	LT315/70R17
Acura MDX	Auto	4.38	2.69	1.57	1.02	0.73	0.53	----	1.89	----	P235/65R17
Jeep Liberty	Auto	3.73	4.02	2.32	1.40	1.00	0.78	----	3.55	----	P235/70R16
Jeep Liberty	Auto	3.73	4.02	2.32	1.40	1.00	0.78	----	3.55	2.72	P235/70R16
Nissan Murano	CVT	5.17	2.37	----	----	----	0.44	----	1.77	----	P235/65R18
Saturn Vue	Man	4.41	3.58	2.02	1.35	0.98	0.81	----	3.31	----	P215/70SR-16
Saturn Vue - AWD	Auto	2.60	4.69	2.94	1.92	1.30	1.00	----	3.18	----	P235/65SR-16
Saturn Vue - VTI	CVT	5.08	2.61	----	----	----	0.44	----	2.15	----	P215/70SR-17

Considerando o caso do *Saturn SL series*, para dois motores diferentes e duas transmissões diferentes, as razões de eixo traseiro são iguais, provavelmente para reduzir o custo de produção, mas as razões de transmissão para cada caso são diferentes. Nota-se também para o *VW Beatle series* que há novamente dois motores diferentes e dois tipos de transmissão diferentes, porém a razão de eixo traseiro

é menor para a versão equipada com *Turbocharger*. Isso foi feito, pois esses motores operam com rotações menores.

Outras configurações a se notar são as do *Chevy Corvette*, os de tração nas 4 rodas e os veículos com transmissão CVT. O *Corvette* utiliza seis marchas para melhorar a aceleração e o consumo de combustível. A versão com mais Potência é configurada de maneira diferente da versão regular. Para os veículos de tração nas quatro rodas, foram selecionadas transmissões que fornecem torque extra. O *Hummer H2* tem uma razão de 33:1, quando em 1ª marcha, com tração nas quatro rodas. O *Saturn Vue* e o *Nissan Murano* possuem transmissão do tipo CVT. Os valores para 1ª e 5º marcha representam a mínima e a máxima razão de transmissão, respectivamente. Note que estes dois últimos veículos possuem alta razão de transmissão final (maior que 5).

Veículos de tração traseira tipicamente usam transmissão direta ($Rt = 1$) para uma de suas marchas. Isso ocorre porque a construção da transmissão permite um acoplamento direto do eixo de entrada com o eixo de saída. Isso não é possível para veículos de tração dianteira. A Tabela 2.11 mostra uma análise dos principais valores da Tabela 2.9 e da Tabela 2.10.

Tabela 2.11 Tratamento de dados da Tabela 2.9 e Tabela 2.10 (Hoff e Gregory 2003)

Transmission Ratio	Min	Vehicle	Max	Vehicle	Avg
Final	1.71	Corvette - Man	5.17	Nissan Murano - CVT	3.68
1	2.37	Nissan Murano - CVT	4.69	Saturn Vue - AWD	3.11
2	1.27	Saturn SL1 - Auto	2.94	Saturn Vue - AWD	1.80
3	0.81	Saturn SL1 - Auto	1.92	Saturn Vue - AWD	1.17
4	0.60	Saturn SL1 - Auto	1.30	Saturn Vue - AWD	0.92
5	0.44	Nissan Murano - CVT	1.00	BMW 3 Series	0.74
6	0.50	Corvette - Man	0.83	BMW Z8	0.63
Minimum	0.44	Nissan Murano - CVT	1.00	BMW 3 Series	0.74
Rev	1.77	Nissan Murano - CVT	4.04	BMW 3 Series	2.65
4WD Low	2.64	Ford F150 & Expedition	2.72	Jeep Liberty	2.66

A Figura 2.23 mostra os valores médios dos parâmetros para cada tipo de transmissão:

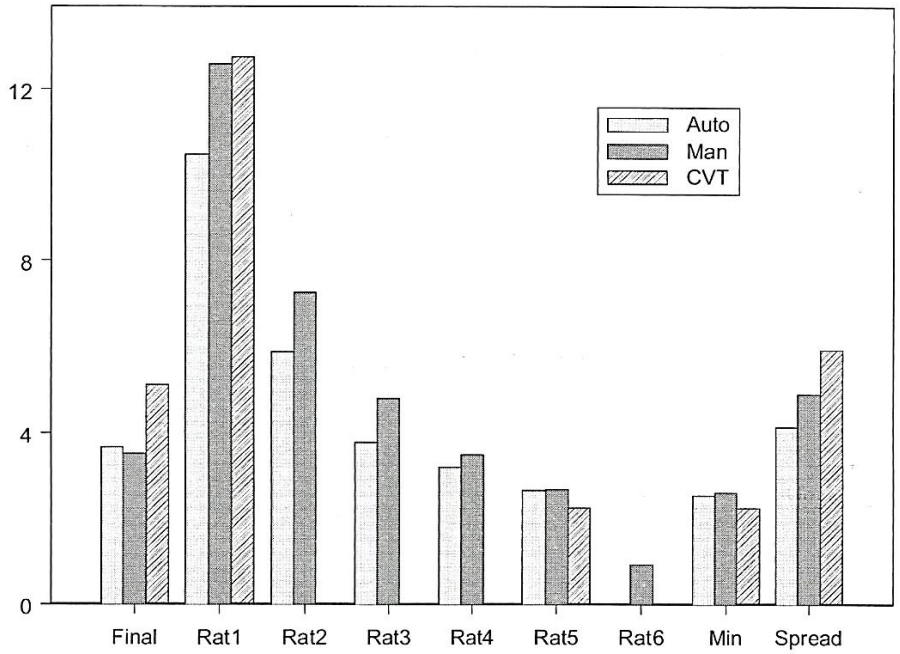


Figura 2.23 Comparação de Razões de Transmissão para sistema manual, automático e CVT (Hoff e Gregory 2003)

Na tentativa de se obter alguma correlação, a Figura 2.24 mostra os gráficos da Razão de Transmissão geral, Potência, Torque e a distribuição das Razões de Transmissão:

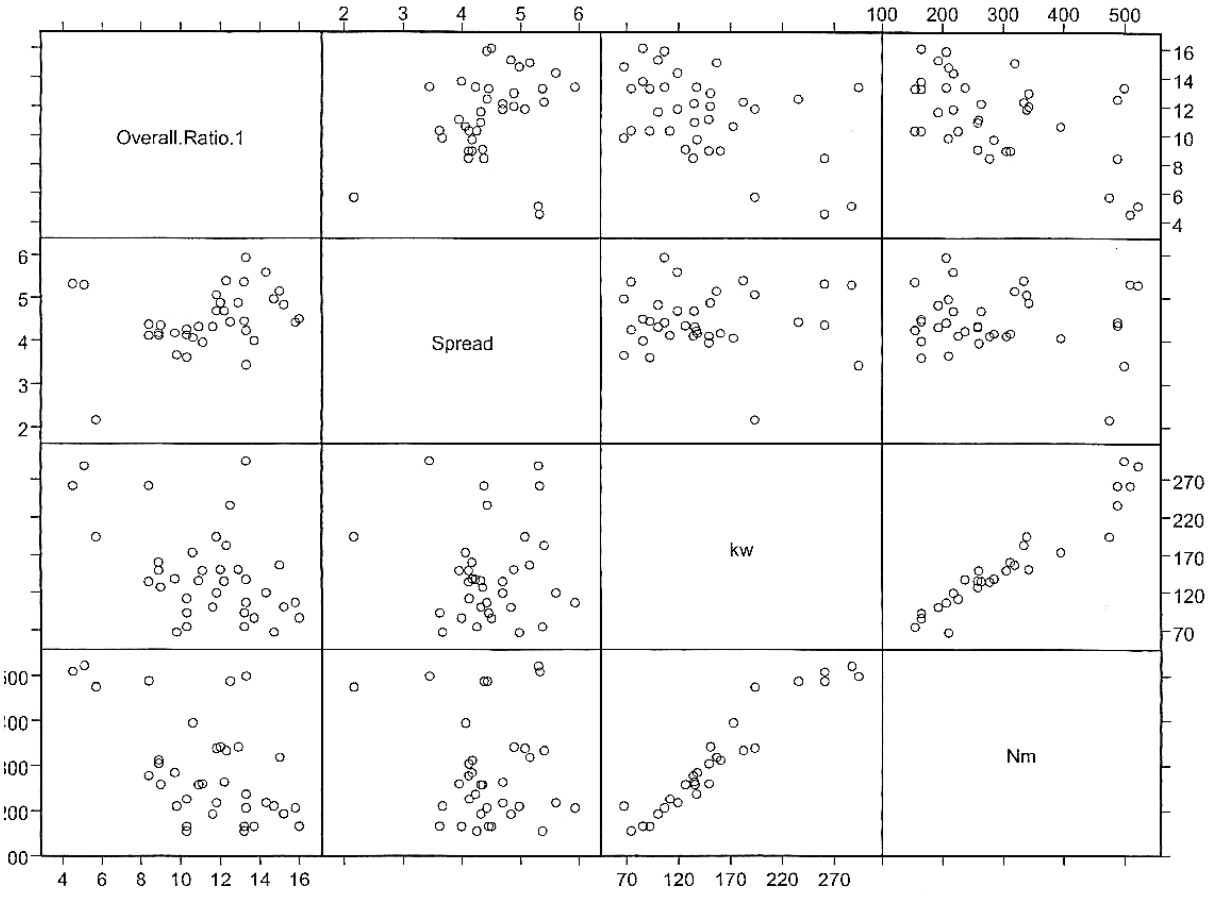


Figura 2.24 Gráfico de correlação entre Razão de Transmissão na primeira marcha, distribuição de Razões de Transmissão, Potência e Torque Máximo do motor (Hoff e Gregory 2003)

Nota-se que, com exceção da Potência x Torque (por definição são correlatos), os dados parecem aleatórios. Esse fato abre margem para utilização de ferramentas estatísticas para seleção de configuração de Cadeia Cinemática, visto que estamos nos deparando com um problema de muitos máximos e mínimos locais.

Usualmente para se selecionar uma configuração de cadeia cinemática, pode-se seguir uma ordem de passos básicos:

1. Selecionar uma última Razão de Velocidades (N/v);
2. Selecionar uma última Razão de Transmissão (R_{t_5}) (caso seja de cinco marchas);
3. Selecionar um Tamanho de Roda (r_r);
4. Selecionar uma Razão de Eixo Traseiro (R_a) (usualmente terá que voltar ao passo 3 para encontrar um tamanho padronizado de eixo);
5. Selecionar primeira razão de velocidades (N/v);
6. Selecionar razões de transmissão intermediárias;
7. Avaliar a performance do veículo.

A ultima razão de velocidades será selecionada pelas especificações de máxima velocidade final, máxima velocidade do motor, uma rotação do motor a uma condição definida na pista ou algum outro compromisso. A Figura 2.25 mostra um exemplo onde a marcha A foi escolhida para uma velocidade máxima de 192 km/h. Nota-se que a marcha B possui velocidade final menor mesmo com a mesma potência de motor:

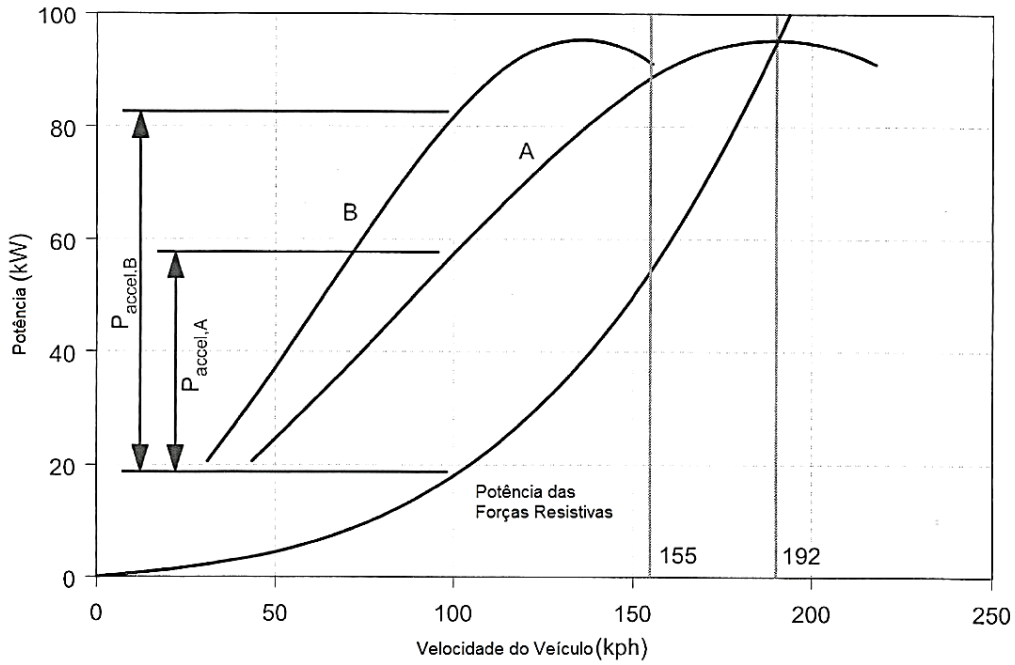


Figura 2.25 Velocidade Máxima Final para as duas diferentes razões N/v (Hoff e Gregory 2003) - modificado

A primeira razão de velocidades é geralmente escolhida em função da máxima inclinação em que este veículo deve conseguir subir. A Figura 2.26 mostra a seleção de uma razão de transmissão para subir uma inclinação de 35 graus:

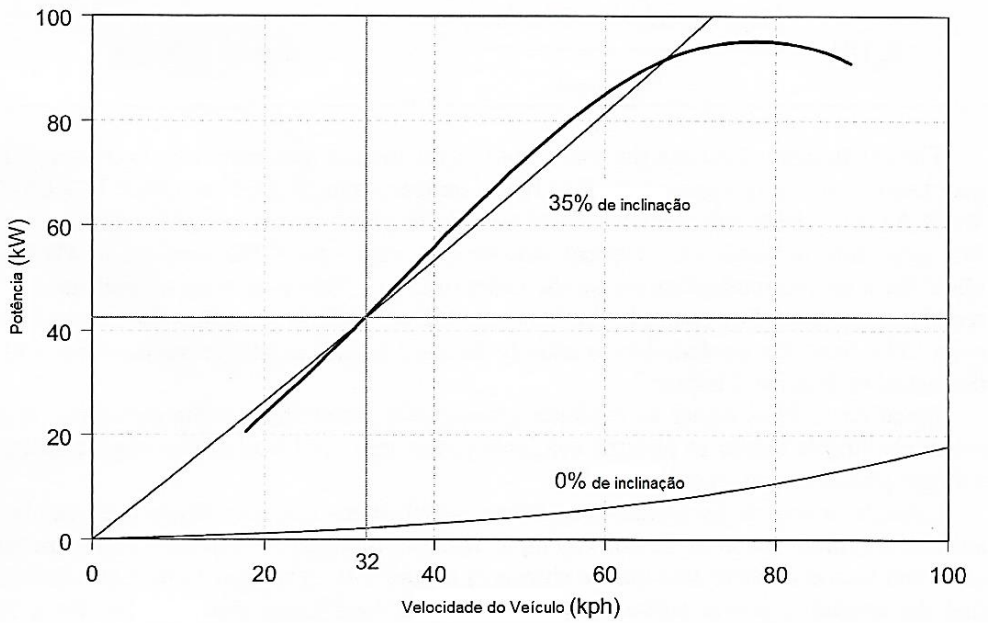


Figura 2.26 Seleção de primeira razão de transmissão para suprir requisito de projeto (Hoff e Gregory 2003) - modificado

As razões de transmissão intermediárias são escolhidas com base em sensações do motorista e para deixar o motor atuando em condições ideais. Uma dessas técnicas é a de espaçamento geométrico, que induz a mudança de marcha à rotação constante do motor:

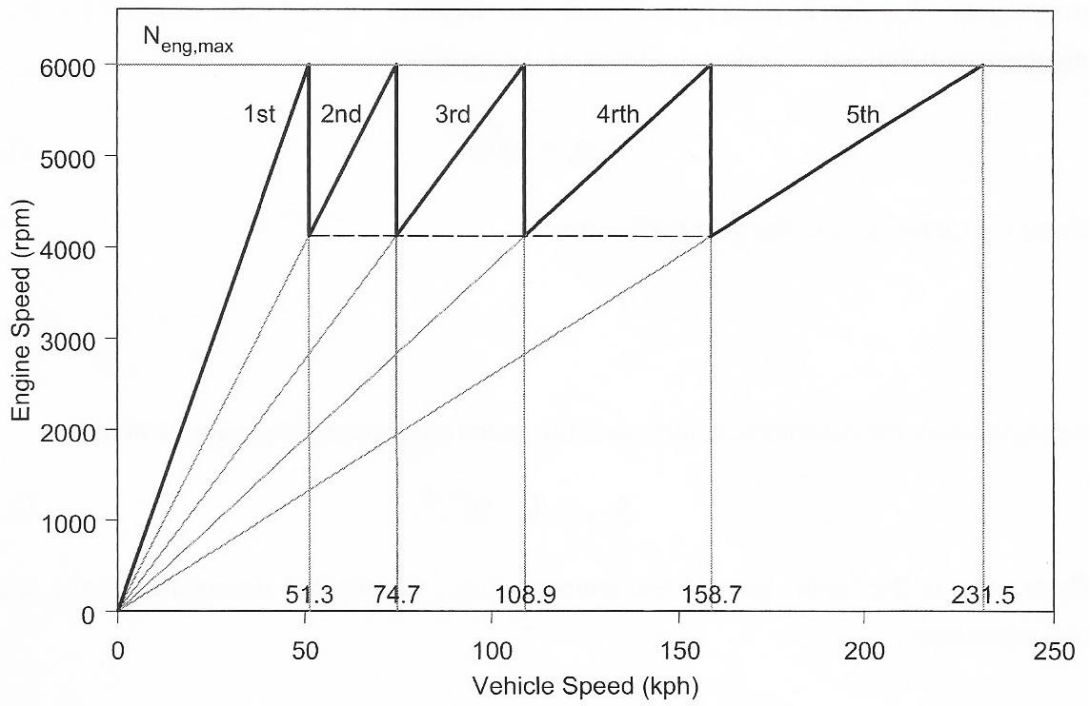


Figura 2.27 Espaçamento Geométrico para transmissão com 5 marchas (Hoff e Gregory 2003) - modificado

O gráfico a seguir mostra um exemplo de seleção dos parâmetros da cadeia cinemática. O carro possui 5 marchas, velocidade máxima de aproximadamente 200 km/h e consegue subir uma inclinação de 35 graus:

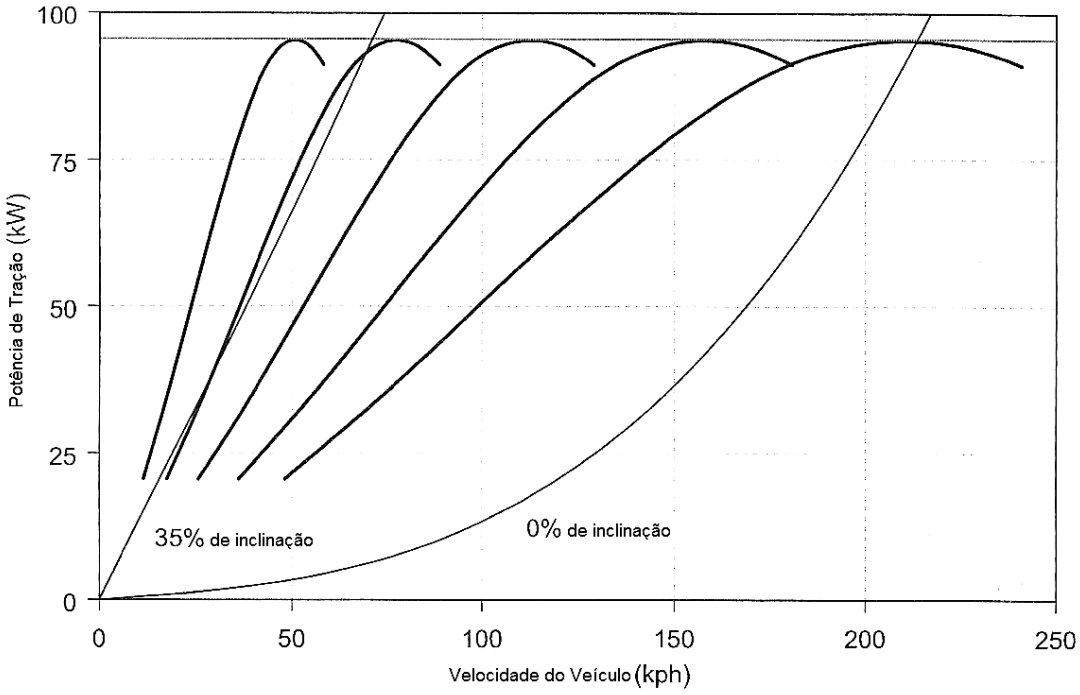


Figura 2.28 Curvas de Potência disponível (Hoff e Gregory 2003) - modificado

Neste Projeto de Graduação, a otimização da Cadeia Cinemática será realizada por meio da investigação dos valores das razões de transmissão $R_{t_1},\ R_{t_2},\ R_{t_3},\ R_{t_4},\ R_{t_5}$, razão de eixo traseiro R_a e do tamanho da roda (r_r). Esses valores serão gerados pelo algoritmo de otimização e vão ser usados como entrada para rotinas que irão avaliar cada configuração por meio dos testes descritos a seguir.

2.5 AVALIAÇÃO DA CADEIA CINEMÁTICA

A avaliação da cadeia cinemática será feita utilizando MATLAB a partir de dois testes. O primeiro é o teste de aceleração regulamentado pela *Society of Automotive Engineers (SAE)* denominado *Vehicle Acceleration Measurement* de código J1491 que determina a máxima aceleração e a velocidade final máxima do veículo. O outro teste é regulamentado pela *United States Environmental Protection Agency* denominado *Federal Urban Dynamometer Driving Schedule* e permite determinar o consumo de combustível do veículo em km/l.

2.5.1 Simulação do Teste de Aceleração

O teste simula um veículo transcorrendo uma pista reta com o pedal de aceleração 100% atuado e a troca de marchas sendo efetuada a condições especificas.

A realização desta simulação possui dois objetivos distintos:

- O primeiro é a determinação do tempo em que a velocidade do veículo varia de $0\ km/h$ à $100\ km/h$. Esse parâmetro será chamado de tempo de aceleração $0-100\ km/h$ ($t_{0-100\ km/h}$) e será numericamente igual ao tempo transcorrido de teste (t_i) em que a velocidade do veículo for de $100\ km/h$. A importância dessa medida é a qualificação da cadeia cinemática, devido à aceleração, pois quanto menor o $t_{0-100\ km/h}$, mais favorável será esse requisito do sistema, fator desejável ao projeto.
- O segundo objetivo é a determinação da velocidade máxima final do veículo, i.e., a velocidade em que o sistema convergirá ao final do teste. Os fatores responsáveis por essa convergência serão explicados à frente, mas o fato é que ela ocorrerá sempre. A esse parâmetro, será dado o símbolo v_{mf} e será a velocidade do veículo em que o tempo transcorrido de $teste$ (t_i) for de $45\ s$. Essa determinação se justifica, obviamente, pela avaliação da cadeia cinemática, devido à velocidade máxima final. O objetivo do projeto é maximizar esse fator.

A simulação será realizada por meio de uma rotina em MATLAB, na qual cada parâmetro do movimento do veículo será atualizado conforme descrito.

O índice "i" será usado para se referir a um determinado parâmetro no i-ésimo incremento temporal e o índice "o" para se referir ao valor inicial do parâmetro. A simulação se resume em calcular todos os valores de interesse para a condição inicial, veículo em condição estacionária (tempo inicial (t_o), posição inicial (S_o) velocidade inicial (v_o), aceleração efetiva inicial (a_{eff_o})), e então recalcular esses valores incrementando o tempo transcorrido de teste, i.e., calcular para cada momento os valores de tempo presente ou tempo transcorrido de teste (t_i), posição presente (S_i), velocidade presente (v_i) e aceleração efetiva presente (a_{eff_i}). A aceleração efetiva depende de fatores que se modificarão com o tempo, logo, esses parâmetros também terão que ser calculados para cada incremento, conforme será descrito nas equações posteriormente. O teste então é finalizado quando $t_i = 45\ s$.

O mais elementar dos parâmetros a ser calculado é o tempo presente (t_i). Ele não depende de nenhum fator exterior, apenas do valor anterior e de um incremento temporal (inc). Definindo t_o, é possível calcular t_i para qualquer valor de i.

$$t_i = t_{i-1} + inc \tag{2.32}$$

Repare que o incremento se mantém constante ao longo da simulação.

Para atingir o objetivo, calcular $t_i = t_i$ ($v_i = 100\ km/h$) e $v_{mf} = v_i$ ($t_i = Y.s$), calculamos as equações do movimento para cada incremento i:

$$v_i = v_{i\text{-}1} + a_{eff\,i\text{-}1}(t_i - t_{i\text{-}1}) \tag{2.33}$$

$$S_i = S_{i-1} + v_{i-1}(t_i - t_{i-1}) + 0,5 \cdot a_{eff\,i-1}(t_i - t_{i-1})^2 \tag{2.34}$$

Assim, definindo valores iniciais de posição (S_o), velocidade (v_o) e aceleração efetiva (a_{eff_o}), podem-se conhecer os valores presente de posição (S_i) e velocidade (v_i). Então os parâmetros que visamos calcular como resultados da simulação serão encontrados.

O calculo da aceleração efetiva depende de vários outros parâmetros que serão discutidos agora.

Aceleração efetiva será o mínimo valor entre a aceleração do sistema na direção do movimento (a_x) e a Máxima Aceleração Possível Limitada pela Fricção (a_{max}):

$$a_{eff\,i} = \min\left(a_x, a_{max}\right) \tag{2.35}$$

Fazendo-se algumas suposições:

O veículo não carregará um Reboque e o ângulo $\theta = 0$. Logo: $HL = 0, Wsen(0) = 0$.

Utilizando a Figura 2.9 (página 8), realiza-se um balanço de forças na direção x e aplica-se a Segunda Lei de Newton. Podemos determinar que a aceleração na direção x (a_x) em um dado momento será razão entre a diferença entre a Força de Tração e a soma das forças resistivas e a massa efetiva (m_{eff}) do veículo neste mesmo momento:

$$a_{x(i)} = \left.\frac{TE-RL}{m_{eff}}\right|_i = \left.\frac{TE\cdot v - RL\cdot v}{m_{eff}\cdot v}\right|_i = \frac{P_{TE}(i)-P_{RL}(i)}{m_{eff}(i)\cdot v_i} \tag{2.36}$$

Sendo:

P_{TE}, Potência da Força de Tração;

P_{RL}, Potência das Forças Resistivas;

P_{WR}, Potência da Força de Arrasto;

P_{rr}, Potência da Força Resistência à Rolagem;

$RL = WR + RR$, Soma das Forças Resistivas;

v_i, a velocidade do veículo no dado momento.

O uso da massa efetiva se deve-se à intenção de englobar a inércia devido aos componentes rotativos do carro (eixos, engrenagens, etc), pois o veículo não é apenas um bloco de massa se deslocando. Segundo Gillespie (1992), podemos calculá-la em função da massa do veículo (m), da razão de eixo traseiro (R_a) e da razão da marcha presente ($R_t(i)$) da seguinte maneira:

$$m_{eff}\left(i\right) = m\cdot\left(1+0,04+0,0025\cdot\left(R_t\left(i\right)\cdot R_a\right)^2\right) \tag{2.37}$$

Nota-se que m_{eff} é sempre maior do que m. Como R_a se mantém sempre constante, o crescimento de m_{eff} está relacionado com R_t. Assim, as primeiras marchas, cuja R_t são mais elevadas, implicam em m_{eff}'s maiores. Esse efeito é nítido para o motorista do veículo.

A Potência das Forças Resistivas (P_{RL}) é calculada, para um dado instante, como a soma das Potências P_{WR} e P_{rr} nesse mesmo instante, pois assume-se que o ângulo de inclinação θ é nulo. Podemos então desenvolver essa equação da seguinte maneira:

$$P_{RL}(i) = P_{WR}(i) + P_{RR}(i) = WR(i) \cdot v_i + RR(i) \cdot v_i \tag{2.38}$$

WR e RR podem ser calculados a cada instante i pelas equações que se seguem (Hoff e Gregory 2003):

$$WR(i) = 0,5 \cdot C_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot v_{ar}(i) \tag{2.39}$$

$$RR(i) = K_o \cdot W \cdot \cos(\theta) = K_o \cdot W \tag{2.40}$$

Sendo:

C_D, o coeficiente de arrasto;

A_f, a área frontal do veículo;

ρ, a densidade do ar;

$v_{ar}(i)$, a velocidade relativa do ar, considerando a inexistência de vento, $v_{ar}(i) = v_i$;

K_o, o coeficiente de resistência à rolagem.

A determinação da Potência de Força de Tração em um dado instante é dada pelo produto entre a Potência do Motor (BP) e a eficiência global da cadeia cinemática (n_{ov}):

$$P_{TE}(i) = BP \cdot n_{ov}\big|_i \tag{2.41}$$

A eficiência global da cadeia Cinemática é dada em função da razão de transmissão da marcha presente ($R_t(i)$) segundo a seguinte equação (Gillespie 1992):

$$n_{ov}(i) = 1 - \left\{ 0,06 + \left(\frac{R_t(i)^{1,5}}{100} \right) \right\} \tag{2.42}$$

Assim como no cálculo da m_{eff}, a eficiência da cadeia cinemática é prejudicada com um alto valor de R_t. Porém, como veremos a seguir, esse valor está relacionado com a transferência de Potência do motor para as rodas.

Como visto na secção de seleção do motor, a Potência do Motor em um dado momento ($BP(i)$) pode ser calculada por meio de um polinômio de ordem 3 da Rotação do Motor (N):

$$BP(i)[W](N[rpm]) = -3.10^{-7} \cdot N^3 + 2,4.10^{-3} \cdot N^2 + 12,461 \cdot N\big|_i \tag{2.43}$$

A Rotação do Motor em um dado momento ($N(i)$), pode ser calculada pelo produto da Razão de Velocidades nesse momento ($R_v(i) = N(i)/v_i$) pela velocidade presente (v_i):

$$N(i) = R_v(i) \cdot v_i \tag{2.44}$$

A razão de velocidades em um instante pode ser determinada pela razão entre o produto da razão de eixo traseiro (R_a) e a razão de transmissão presente ($R_t(i)$) pelo raio da roda (r_r) (Hoff e Gregory 2003):

$$R_v(i)\left[\frac{rpm}{km/h}\right] = 2660 \cdot \frac{R_a \cdot R_t(i)}{r_r\left[mm\right]} \tag{2.45}$$

Nota-se que tanto R_a quanto r_r, obviamente, não se alteram com o tempo. Assim temos que R_v varia constantemente com R_t. Projetistas de Cadeia Cinemática procuram por valores desejados de R_v quando selecionam R_t. A metodologia que esse PG propõe é inovadora exatamente na maneira como iremos fazer essa seleção. Ao invés de escolher os valores de R_t, R_a e r_r "manualmente", desenvolver-se-á uma rotina matemática, através de metodologia estocástica, capaz de efetuar essa escolha.

Como visto anteriormente, os valores de $R_a, r_r, R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4}, R_{t_5}$ são entradas do programa. O índice de R_t representa a marcha atual. Precisa-se definir em que condição a marcha será trocada, alterando-se, pois, o valor de $R_t(i)$. Define-se que a marcha inicial é a R_{t_1} e a condição de troca será realizada quando a rotação do motor (N) for maior ou igual á 6000 rpm:

$$marcha\,atual = \begin{cases} marcha\,atual, & N < 6000\,rpm \\ marcha\,atual + 1, & N \geq 6000\,rpm \end{cases} \tag{2.46}$$

Sendo que a marcha varia de 1 á 5. Sabendo então o valor da marcha, temos o valor correspondente da Razão de Transmissão ($R_t(i)$):

$$R_t(i) = R_t\left[marcha\,atual\right] \tag{2.47}$$

A máxima aceleração que o veículo pode experimentar é determinada em função das propriedades do Chassi e do Máximo Coeficiente de Fricção (μ_{peak}) das rodas com o asfalto (Hoff e Gregory 2003):

$$a_{max} = \frac{\mu_{peak} \cdot g \cdot b}{L - \mu_{peak} \cdot h} \tag{2.48}$$

Resolvendo esse sistema de equações podemos, então, determinar $t_{0-100\,km/h}$ e v_{mf} para avaliar inúmeras configurações de cadeia cinemática.

2.5.2 Simulação do Teste de Economia de Combustível

O teste de economia de combustível consiste na simulação de um veículo trafegando em uma área urbana para rastrear o seu consumo energético. O teste utilizado para essa simulação é normatizado pela *United States Environmental Protection Agency* denominado *Federal Urban Dynamometer Driving Schedule.* Esse teste é utilizado pelas montadoras estadunidenses.

A norma brasileira que se aplica a medição do consumo de combustível de veículos rodoviários automotores leves é a ABNT NBR 7024:2010 confeccionada pelo INMETRO. Porém ela não foi usada, pois as regras possuem um custo monetário significativo. A norma para este teste usado na União Europeia é o ECE-15 Figura 2.29, no Japão é o JC08 Figura 2.30. A norma europeia carece de realismo.

A norma japonesa é bastante similar á norma norte-americana e poderia ser utilizada sem nenhum prejuízo de informação. Assim a norma escolhida foi a norma dos EUA.

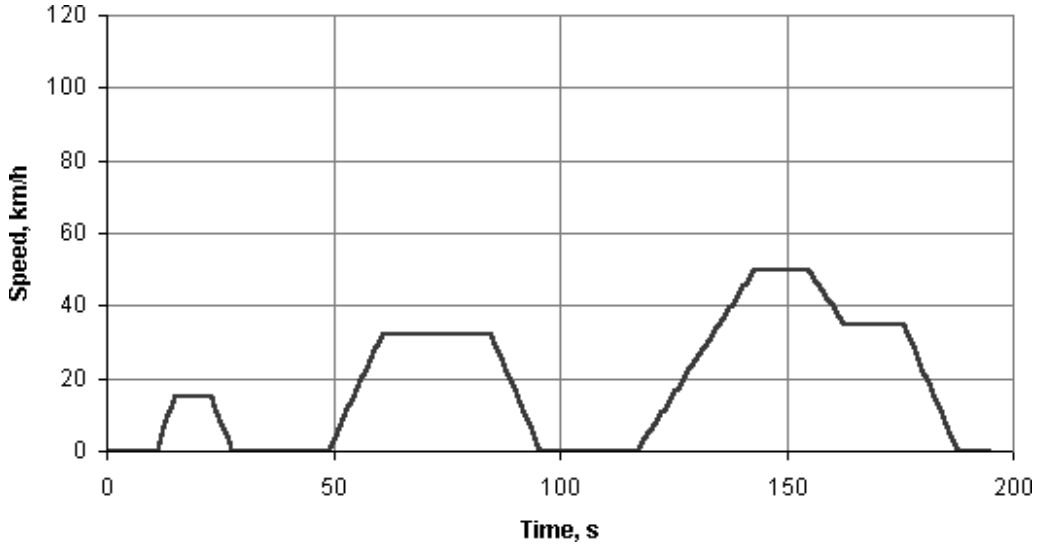


Figura 2.29 Teste de Economia de Combustível da União Européia ECE-15 (DieselNet s.d.)

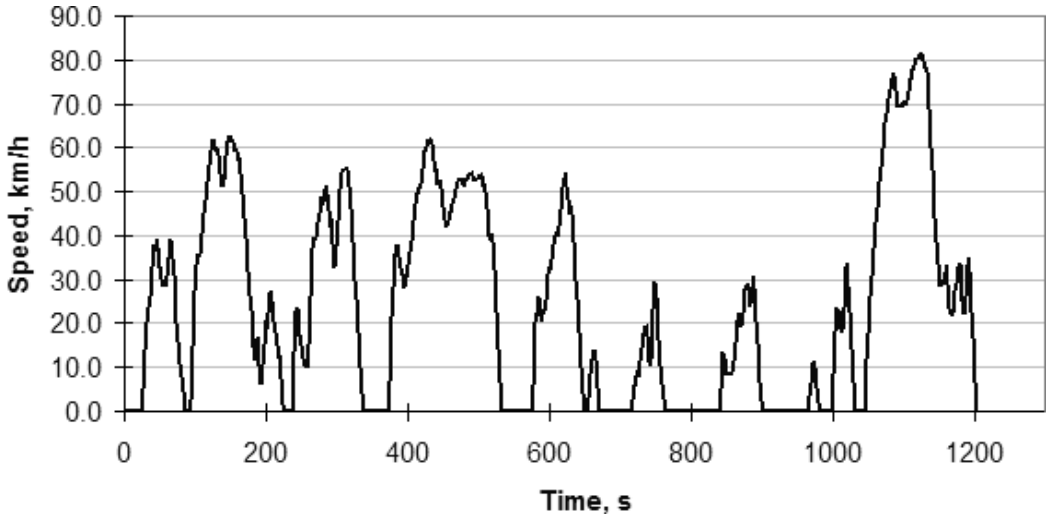


Figura 2.30 Teste de Economia de Combustível do Japão JC08 (DieselNet s.d.)

O objetivo desta simulação é a obtenção da economia de combustível (ec) do veículo em km/l. Esse parâmetro será usado para avaliar a cadeia Cinemática. A otimização visa aumentar ao máximo a ec.

A simulação será feita por meio de uma rotina em MATLAB. Diferentemente do teste de aceleração, o teste de economia de combustível possui em cada incremento temporal "i", uma velocidade requerida (v_{r_i}) associada no qual o veículo deve experimentar. Os cálculos então são efetuados para determinação e atualização de quais valores os parâmetros devem assumir para que o sistema se comporte da maneira requisitada.

A principal informação deste teste é o diagrama de velocidade requerida (v_{r_i}) pelo tempo transcorrido de teste (t_i). Muitos estudos já foram realizados para tentar simular o transito de um veículo

em área urbana. Para essa simulação será adotado o diagrama fornecido pela *United States Environmental Protection Agency* representado na Figura 2.31.

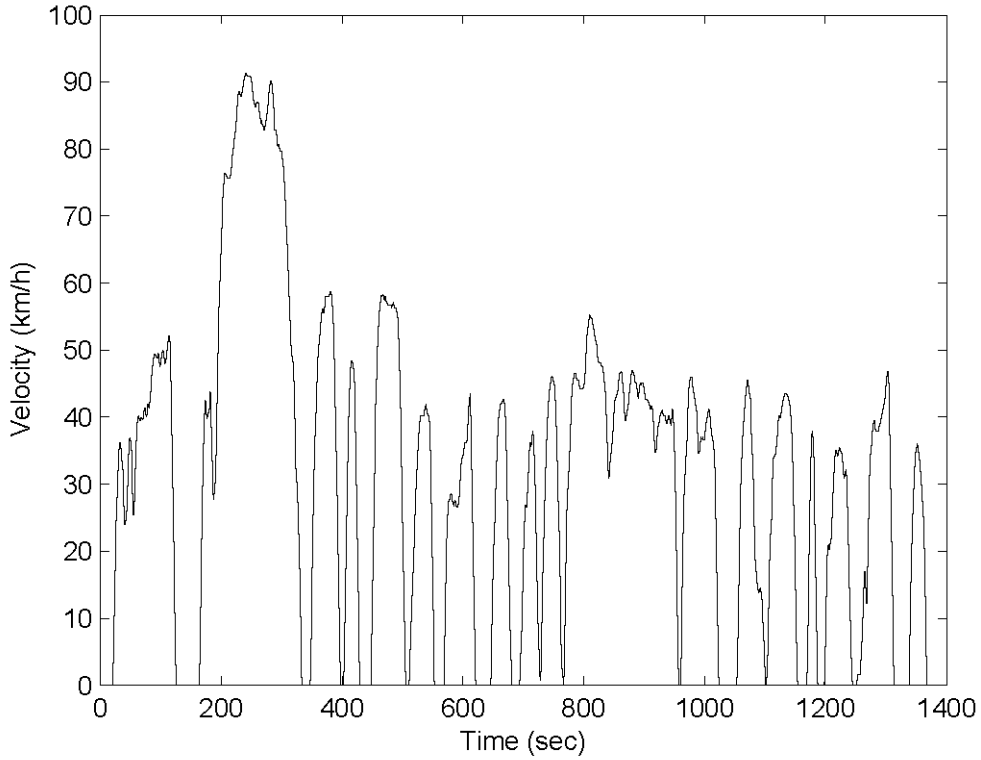


Figura 2.31 Variação da velocidade com o tempo transcorrido de teste para simular o transito de um veículo em área urbana (EPA s.d.)

Para implementação na rotina em MATLAB foi usada uma versão em tabela com o tempo transcorrido de teste na coluna 1 e a velocidade requerida na coluna 2. Essa tabela foi obtida na mesma fonte.

A economia de combustível (ec) pode ser calculada como a razão entre a distância total transcorrida (S_n) e o volume total de combustível utilizado (V_f):

$$ec = \frac{S_n}{V_f} \tag{2.49}$$

A distância total acumulada (S_i) é determinada para cada instante de maneira elementar pela equação do movimento:

$$S_i = S_{i-1} + v_{ri} \cdot (t_i - t_{i-1}) \tag{2.50}$$

A distância transcorrida total (S_n) será então o valor de S_i quando o incremento i for máximo. Para essa simulação este valor é $i = 1369$ (este valor é explicitado na Figura 2.31 como sendo o valor do tempo de teste para o ultimo ponto no gráfico). Note que S_n não depende da cadeia Cinemática, apenas do diagrama de velocidade requerida *versus* tempo transcorrido de teste. Portanto basta calculá-la uma

só vez e implementá-la como constante na rotina, pois assim será economizado recurso computacional para a otimização. O valor calculado de S_n foi de 11987,68 metros.

O volume total de combustível utilizado (V_f) é determinado pela razão entre a massa total de combustível (m_{f_t}) e a densidade de combustível (ρ_f):

$$V_f = \frac{m_{ft}}{\rho_f} \tag{2.51}$$

Segundo McCartney (1997), não existe uma molécula específica de gasolina. Ela é uma mistura complexa de várias outras moléculas. C_8H_{17} é usada para representar a molécula de gasolina média. O combustível usado será a gasolina comum (C_8H_{17}), cuja densidade (ρ_f) é aproximadamente 760 kg/m³.

A massa total de combustível é calculada pela soma das massas usadas em cada incremento:

$$m_{ft} = \sum_{i=0}^{1369} m_{f(i)} \tag{2.52}$$

Para cada instante, a massa de combustível pode ser determinada pelo produto do fluxo mássico de combustível (d_{m_f}) pelo incremento temporal:

$$m_{f(i)} = d_{mf}(i) \cdot (t_i - t_{i-1}) \tag{2.53}$$

O fluxo mássico de combustível, em um determinado instante, é, por sua vez, calculado pelo produto da Potência do Motor ($BP(i)$) e do Consumo Específico de Combustível ($BSFC(i)$) nesse mesmo instante:

$$d_{mf}(i) = BP(i) \cdot BSFC(i) \tag{2.54}$$

No item 2.1.1 “Seleção do Motor” é visto que a Potência do Motor (BP) pode ser calculada por um polinômio de 3º grau em função da Rotação do Motor (N). Nessa simulação, BP assumiria valores negativos quando o carro sofre desaceleração, porém a rotina interpretaria erroneamente esses valores como que se o volume de gasolina estivesse sendo reposto no tanque. Assim, sem prejuízos significativos, é assumido que valor mínimo para BP seja igual a 1 W.

$$BP_i[W]\big(N(i)[rpm]\big) = \begin{cases} 1, \ BP(N) < 1 \\ -3\times10^{-7} \cdot N^3 + 2.4\times10^{-3} \cdot N^2 + 12,461 \cdot N\Big|_i, \ BP(N) \geq 1 \end{cases} \tag{2.55}$$

Como visto na mesma subseção, o Consumo Específico de Combustível para um dado instante pode ser calculada em função da Rotação do Motor (N) e da Pressão Média Específica ($BMEP$) nesse mesmo instante:

$$BSFC(i)\left[\frac{g}{kWhr}\right]\big(N(i)[rpm], BMEP(kPa)\big) = \tag{2.56}$$

$$= \begin{cases} a \cdot BMEP + b \cdot BMEP^2 + c \cdot N + d \cdot BMEP \cdot N + e \cdot BMEP^2 \cdot N \\ \quad + f \cdot N^2 + g \cdot BMEP \cdot N^2 + h \cdot (BMEP \cdot N)^2 \Big|_i, \ BSFC(i) < 600 \\ 600, \ BSFC(i) \geq 600 \end{cases}$$

Os valores a, b, c, d, e, f, g, h são explicitados na Tabela 2.3.

Prosseguindo, a Pressão Média Específica é dada pela razão entre os produtos da Potência do Motor pelo Número de Voltas por Ciclo (z) e da Rotação do Motor pelo Volume Deslocado no motor (V_d). Será assumido o valor 0 quando N for nulo:

$$BMEP(i) = \begin{cases} 0, N \leq 0 \\ \dfrac{BP(i) \cdot z}{V_d \cdot N(i)}, \ N > 0 \end{cases} \tag{2.57}$$

Analogamente ao Teste de Aceleração, a Rotação do Motor (N) para um dado momento pode ser calculada pelo produto da Razão de Velocidades (Rv) neste momento e da Velocidade Requerida (vri):

$$N(i) = R_v(i) \cdot v_{ri} \tag{2.58}$$

A Razão de Velocidade em um instante por sua vez é definida como a razão entre o produto da Razão do Eixo Traseiro (R_a) e a Razão de Transmissão da Marcha nesse instante ($R_t(i)$) pelo Raio da Roda (r_r):

$$R_v(i)\left[\frac{rpm}{km/h}\right] = 2660 \cdot \frac{R_a \cdot R_t(i)}{r_r\left[mm\right]} \tag{2.59}$$

Assim como no Teste de Aceleração, os valores de $R_a, r_r, R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4}, R_{t_5}$ são entradas do programa. Seguindo o mesmo raciocínio do teste anterior, a única diferença é que a troca de marcha se dará a 3000 rpm:

$$marcha\,atual = \begin{cases} marcha\,atual, & N < 3000\,rpm \\ marcha\,atual + 1, & N \geq 3000\,rpm \end{cases} \tag{2.60}$$

Sendo que a marcha varia entre de 1 á 5 e conhecendo o valor atual da marcha, temos o valor correspondente da Razão de Transmissão ($R_t(i)$).

$$R_t(i) = R_t\left[marcha\,atual\right] \tag{2.61}$$

O sistema está então fechado para a solução de ec para cada indivíduo. Esse valor será uma das entradas da função objetivo da otimização. O objetivo do projeto é maximizar este parâmetro em harmonia com a aceleração e a velocidade máxima final.

* * *

Muitos são os motivos que determinam a seleção de uma determinada configuração de cadeia cinemática. Essa escolha é altamente não trivial, pois os objetivos são conflitantes. Ao tentar melhorar um parâmetro, automaticamente se piora outro. O maior exemplo disso é a maximização da aceleração que possui como "efeito colateral" o aumento do consumo de combustível.

A busca por métodos estocásticos eficientes para a resolução destes conflitos motiva o enfoque deste projeto. O uso de técnicas de otimizações mostram-se bastante adequados e será por meio dos Algoritmos Genéticos que se buscará a solução para este desafio.

3 OTIMIZAÇÃO POR ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Quando nos deparamos com problemas que não possuem metodologias de resolução bem definidas, ou que possuem sistemas complexos como, por exemplo, na robótica, os problemas de otimização com múltiplos objetivos, sistemas de visão computacional, projeto e sintonia de controladores, ciências biológicas, entre outros, algoritmos baseados em **Inteligência Artificial** são utilizados em busca de soluções. Tais algoritmos são capazes de definir respostas através de métodos determinísticos ou probabilísticos dentro da área da Otimização, sendo capazes de achar o valor máximo ou mínimo de uma função objetivo sujeito a um conjunto de restrições.

Os **métodos determinísticos** englobam a maioria dos métodos clássicos de otimização dos quais a partir de teoremas é possível garantir a convergência para uma solução ótima, que não seja necessariamente a global. Para estes métodos clássicos de programação ocorre uma forte dependência do ponto de partida das variáveis, o que em problemas de funções com vários objetivos não garante um bom desempenho na otimização.

Já para os **métodos probabilísticos** avalia-se exclusivamente a função objetivo, introduzindo padrões estocásticos, ou seja, parâmetros gerados por eventos aleatórios, não necessitando ter uma representação matemática para alcançar a solução. Com este método é possível tratar de funções com um grande número de variáveis. Em contrapartida o custo computacional é bastante elevado em relação aos métodos determinísticos.

A Meta-heurística é uma denominação destes métodos capazes de descrever modelos que associam conhecimentos não verificáveis matematicamente, explorando um espaço de soluções viáveis para o projeto. Ela subdivide a Inteligência Artificial em ramos, entre eles: Redes Neurais, Sistemas de Lógica Nebulosa e Computação Evolucionária.

Nas abordagens mais comuns dos algoritmos evolucionários a população é iniciada de forma aleatória, com distribuição uniforme, e os indivíduos submetem-se a uma análise qualitativa (função objetivo) que realimentará o sistema a partir de estratégias de convergência.

Como classe dos métodos probabilísticos, a **Computação Evolucionária** utiliza-se de métodos bio-inspirados que, através de algoritmos baseados em mecanismos evolutivos encontrados na natureza, são capazes de solucionar problemas com alto grau de aproximações, incertezas e imprecisões. Pode ser subdivida ainda em ramos (Michalewicz e Schoenauer 1996), tais como:

- Programação Genética;
- Programação Evolutiva;
- Estratégia Evolutiva

- Algoritmos Genéticos

Com o objetivo de buscar a configuração da cadeia cinemática que consiga conciliar maior aceleração e velocidade final, com menor consumo de combustível, os **Algoritmos Genéticos** serão utilizados neste projeto como ferramentas que analisarão os dados gerados pela avaliação automotiva, através do tratamento de uma ampla quantidade de entradas possíveis. A seguir é possível definir os algoritmos genéticos assim como seus operadores.

3.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AG) são mecanismos de busca que se baseiam nos processos de seleção natural para a sobrevivência, através da genética de populações. Os mecanismos que regem a evolução são: a reprodução, o cruzamento e mutação, onde, pelo princípio de Darwin, *"os mais aptos sobrevivem"*.

De maneira a correlacionar este conceito para a computação evolucionária, se seguirá o mesmo principio da natureza, no qual a evolução melhora o indivíduo com o passar das gerações.

Gerada de maneira aleatória, a população se inicia com uma distribuição uniforme e seus indivíduos (soluções) submetem-se a uma análise de qualidade através de uma **função objetivo**. Essa função realimenta o sistema, avaliando o resultado de cada indivíduo na população, na qual os indivíduos mais aptos terão maior capacidade de transferir suas características para as próximas gerações através da **reprodução-seleção**, **cruzamento** e **mutação**. Um determinado comportamento gerado por uma tendência de cada nova descoberta é armazenado a cada interação, semelhante ao que ocorre na natureza.

A Figura 3.1 esquematiza o funcionamento de um algoritmo genético.

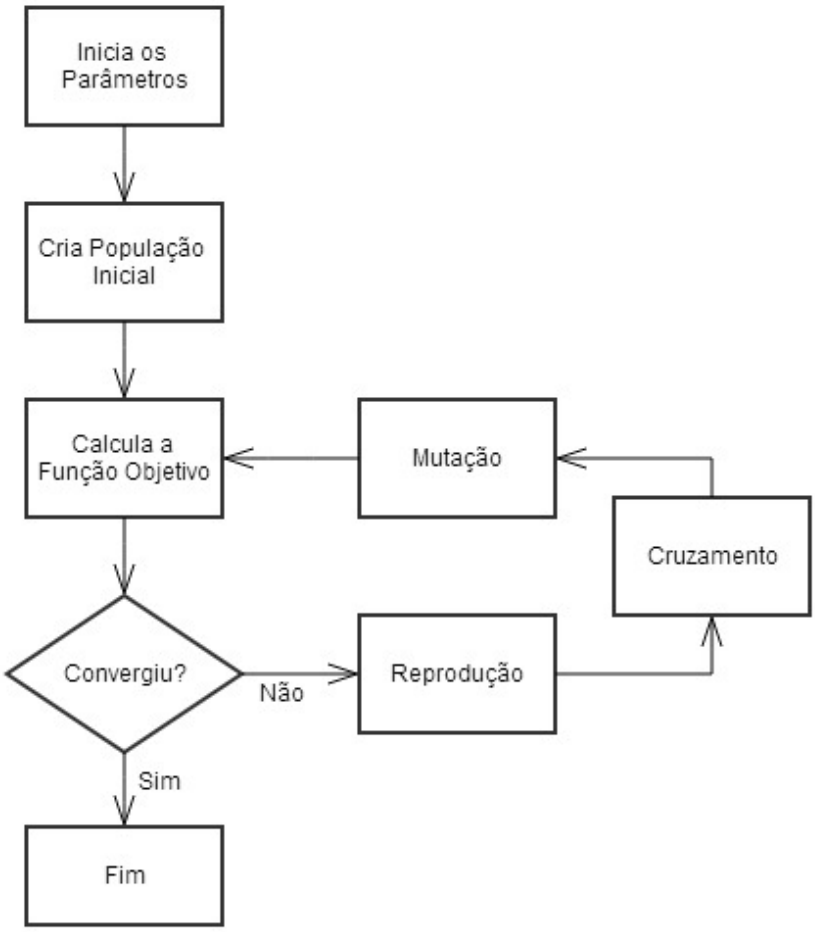


Figura 3.1 Fluxograma de um algoritmo genético

Os termos desta seção serão extraídos da genética moderna de maneira a adequar-se ao seu significado biológico. Os **cromossomos**, ou genótipos, representam os indivíduos no espaço do algoritmo evolutivo, possuindo como características as entradas do problema, as quais serão avaliados pela função objetivo com as subsequentes operações de reprodução (ou seleção), cruzamento (ou *crossover)* e mutação.

3.2 CODIFICAÇÃO

Inicialmente é necessário definir como será a representação do cromossomo, sendo que, dependendo de sua representação, haverá variâncias nos operadores genéticos correspondentes.

Os cromossomos podem possuir representação binária, onde cada variável de entrada será constituída por uma quantidade de *bits*, ou real, ou em uma combinação de ambas. Os cromossomos são a combinação linear dos elementos de entrada, definidos como **genes**, que são compostos pelo número de pontos para cada intervalo (ou restrição) das entradas. Os genes contém as características dos cromossomos.

Em representação binária, cada *bit* pode ser definido como um **nucleotídeo**. Portanto o conjunto de nucleotídeos definem um gene, e o conjunto de genes definem o cromossomo, conforme ilustra a Figura 3.2.

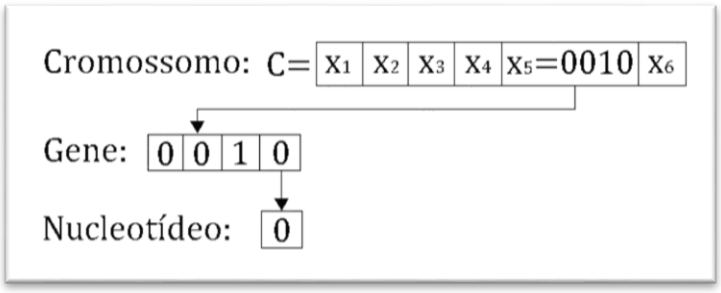


Figura 3.2 Definição dos componentes de um cromossomo

A população é composta por uma quantidade N de cromossomos, sendo que um aumento da **população** aumenta o uso de memória computacional.

A cada ciclo de reprodução, cruzamento e mutação uma **geração** é definida e, analisando as gerações, baseia-se o princípio de convergência da solução.

A representação binária é historicamente importante (Goldberg, 1989) e amplamente utilizada por possuir fácil utilização e manipulação, além de ser simples de analisar teoricamente. Entretanto, ao se trabalhar com múltiplas dimensões de variáveis contínuas, quando há uma necessidade de precisão, essa representação pode apresentar certas dificuldades, apresentando necessidade da criação de um grande número de *bits* para atingir a precisão desejada. Isso torna os cromossomos extremamente grandes e de difícil manipulação. Além de existir o efeito *hamming clif*, onde a representação no código binário apresentam valores adjacentes que diferem de mais de um bit, o que dificulda o refinamento do intervalo no espaço de busca (Anna Paula, 2007) (Herrera & Verdegay (1995).

Na codificação real utilizam-se números de ponto flutuante para representar o cromossomo, sendo seu comprimento o mesmo vetor que representa a solução do problema, dessa forma cada gene representa uma variável do problema (Michalewicz, Z. & Schoenauer, M., 1996).

Neste projeto primeiramente será utilizada uma codificação binária, com a finalidade de se elaborar um estudo inicial, e, posteriormente, se aplicará o uso de codificação real, onde será validado o problema, assim como será possível estabelecer critérios de comparação com a representação binária.

3.3 CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL

Para se definir a população inicial são gerados indivíduos aleatoriamente. Em algumas heurísticas, entretanto, podem ser usados indivíduos com maior aptidão, iniciando-se a população com soluções

aproximadas e conhecidas, ou com algum tipo de informação relevante. Essa estratégia pode vir a reduzir o tempo computacional, dependendo do caso.

3.4 FUNÇÃO OBJETIVO

A Função Objetivo (ou de aptidão/ avaliação/ *fitness)* qualifica, através da minimização (ou maximização), o quão bom o indivíduo (resultado) obtido é. Todos os cromossomos passam por esta função e, ao final dela, comparam-se os que possuem melhores resultados entre as gerações, através de uma pontuação. Esta função influencia diretamente na evolução da população, sendo que os indivíduos que possuem piores características genéticas são eliminados.

A estratégia de Elitismo pode ser utilizada para preservar as melhores soluções encontradas na geração atual para as próximas gerações, copiando-as sem nenhuma alteração. Pode ser definida através de um vetor que armazena os melhores indivíduos da população atual, e, a cada vez que aparece um indivíduo melhor com a aplicação de operadores genéticos, os piores indivíduos, avaliados pela função objetivo, são substituído por estes melhores cromossomos à próxima geração.

3.5 SELEÇÃO

A Seleção (ou Reprodução) possui métodos que introduzem, através da função objetivo, uma influência que relaciona as melhores características da população atual. Simulando computacionalmente a seleção natural, os indivíduos que possuem as melhores características genéticas são selecionados, o que não exclui indivíduos com aptidão relativamente baixa, visto que estes também possuem chance de participar do processo de reprodução.

Entre os métodos de seleção, encontram-se a seleção proporcional (roleta), o torneio e a dizimação.

3.5.1 Roleta

Classificada como um método de seleção estocástica, a roleta introduz parâmetros randômicos para a escolha dos melhores indivíduos através da probabilidade de ocorrência da função objetivo. Sendo que para maiores probabilidades de sobrevivência do indivíduo, maiores são as chances de perpetuação de seu material genético.

Para este método é como se as probabilidades de cada cromossomo estivessem dividas em porcentagens em uma roleta que, após ser girada, possui a chance de parada proporcional à área de cada genótipo. A figura a seguir explicita bem este método:

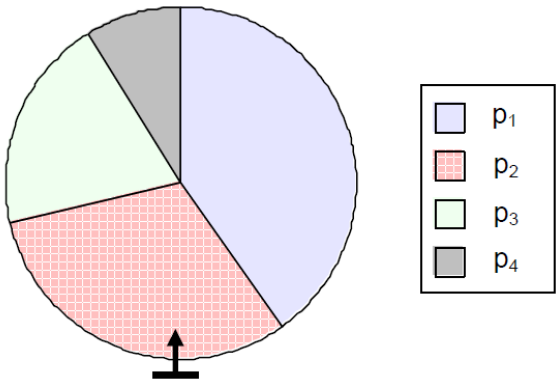


Figura 3.3 Seleção através do método da roleta

A seguinte expressão mensura a probabilidade de ocorrência da função objetivo $f(x)$ sobre cada indivíduo:

$$P_i = \frac{f(x)}{F(x)}. \tag{3.1}$$

Sendo

$$F(x) = \sum f(x). \tag{3.2}$$

As probabilidades acumulativas q para cada cromossomo são dadas por:

$$q_i = \sum_{j=1}^{i} P_j \ . \tag{3.3}$$

A seleção dos cromossomos que contribuirão para a geração seguinte considera a criação de um conjunto randômicos de números r entre 0 e 1, a partir da seguinte análise lógica:

Se $r < q_i$, então seleciona-se o cromossomo C_i;

Se $r > q_i$, passa-se para a probabilidade subsequente e realiza-se a análise novamente;

Os melhores cromossomos, portanto, poderão ser selecionados mais de uma vez enquanto os outros morrerão. Depois de selecionados, os cromossomos dão origem a uma nova população.

3.5.2 Torneio

Também classificado como método estocástico, o torneio seleciona uma quantidade de indivíduos n_k randomicamente dentro da população e estes indivíduos competem entre si, sendo que o indivíduo com maior valor de aptidão sobrevive e o restante não.

A condição necessária é de que $n_k \geq 2$ para que exista competição. Quanto maior o valor de n_k, mais os indivíduos aptos tendem a predominar sendo estes selecionados mais vezes no processo, onde sempre um deles será o vencedor do torneio (Linden 2006). Este processo se repete n vezes, sendo n o

tamanho da população. Por ser um método de simples aplicação, requer baixo custo computacional, o que o torna um método atrativo.

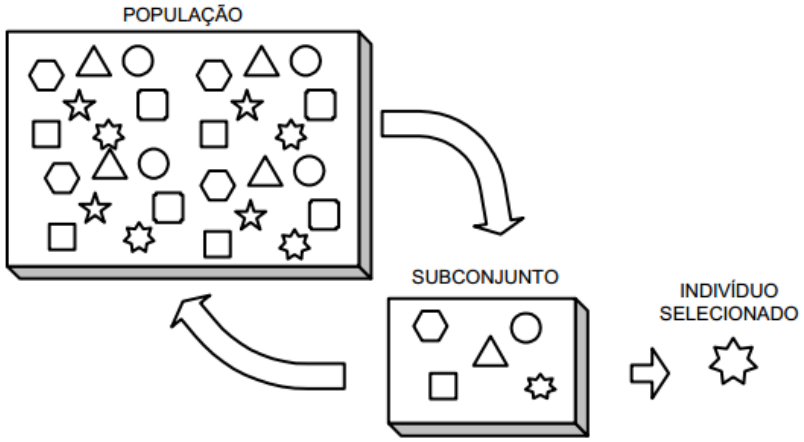


Figura 3.4 Seleção pelo método de torneio (Mognon 2004)

3.5.3 Dizimação

É uma estratégia determinística que consiste em ordenar os indivíduos pelo valor de sua função objetivo e remover um número fixo de indivíduos que apresentam baixa função objetivo. A simplicidade deste método enfrenta a desvantagem de que características genéticas são perdidas pelos indivíduos removidos da população, sendo que algumas dessas características podem ser relevantes apesar do baixo valor de função objetivo, enquanto nos outros métodos de seleção citados os indivíduos ainda possuem a chance de serem selecionados pela função randômica.

3.6 CRUZAMENTO

O cruzamento (ou *crossover*/ recombinação) responsabiliza-se pela troca de uma seção de nucleotídeos de cromossomos diferentes, onde, desta troca, são gerados novos membros da população. A probabilidade de *crossover, Pc*, é igual ou superior à 60% (Goldberg 1989), como o que ocorre na natureza (onde a maioria dos casais possuem filhos). É por essa alta probabilidade de ocorrência que o *crossover* se torna o operador responsável pela criação da maioria dos novos indivíduos.

O cruzamento pode ser realizado de diferentes maneiras. Uma maneira simples é a seleção aleatória de um ponto único do cromossomo onde os pais trocam seus materiais a partir deste ponto, compondo filhos com a combinação dessas partes, conforme é apresentado na Figura 3.5.

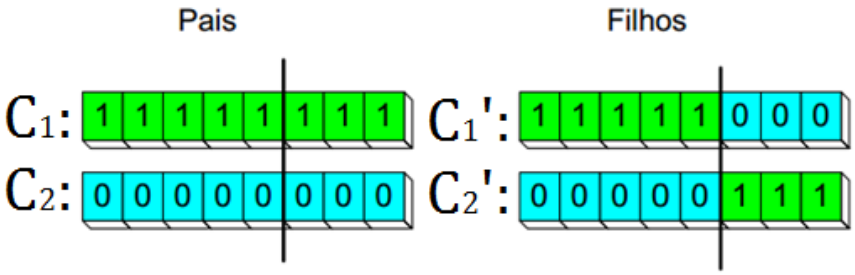


Figura 3.5 Cruzamento de ponto único

Variações deste modelo podem ser encontradas como de ponto duplo, onde ao invés de se selecionar um ponto de cruzamento, são selecionados dois, dividindo o cromossomo em três partes, conforme ilustrado na Figura 3.6.

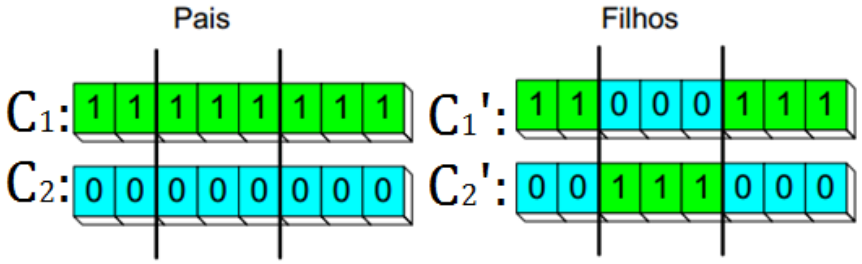


Figura 3.6 Cruzamento de ponto duplo

Outra possibilidade é de que seja realizado cruzamento em pontos aleatórios conforme explicita a Figura 3.7.

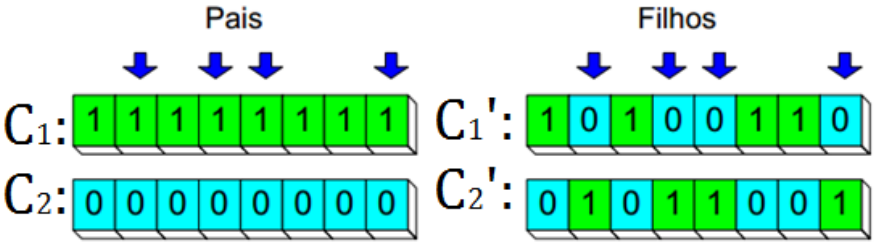


Figura 3.7 Cruzamento de pontos aleatórios

3.7 MUTAÇÃO

A mutação ocorrerá pela troca aleatória de nucleotídeos no cromossomo através de uma probabilidade de mutação *Pm*, sugerida de 5% (Goldberg 1989). Através da mutação podem ser introduzidas informações novas ou que talvez tivessem sido perdidas nas iterações, fugindo de máximos locais e aumentando a probabilidade de se encontrar um máximo global.

A mutação é um operador genético muito simples nos algoritmos binários, onde é necessário que apenas se inverta um valor aleatório no cromossomo, podendo ser realizado em um único nucleotídeo ou em mais de um. A figura Figura 3.8 ilustra a mutação em um único nucleotídeo.

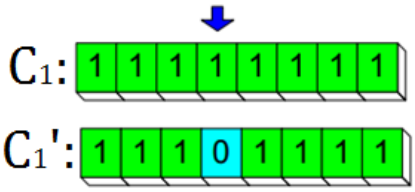


Figura 3.8 Mutação do cromossomo em um único nucleotídeo

3.8 CONVERGÊNCIA

Após a criação da nova geração a partir dos operadores genéticos é necessário estabelecer um critério de parada que seja conveniente com os critérios de convergência do algoritmo. Este critério pode ser estipulado através de um erro máximo estipulado, sendo que quando o valor do erro for menor que o estipulado, encerra-se o processo.

Pode ser determinado também um número de gerações que se deseja alcançar para avaliação do rendimento do algoritmo. Outro método de teste se dá pela diversidade da genética, ou seja, quando os indivíduos se assemelham muito o critério de convergência é atingido pela proximidade dos resultados dos valores objetivos.

É necessário sempre estar atento ao controle dos resultados, pois estes critérios possuem falhas que levam os algoritmos a máximos locais, acarretando em uma convergência prematura. (Mognon 2004). Uma estratégia que pode ser adotada envolve a simulação simultânea em diversos parâmetros onde os melhores indivíduos de diversas simulações são selecionados e recolocados em uma nova simulação para interagirem entre si.

4 OTIMIZAÇÃO DA CADEIA CINEMÁTICA

Conforme foram definidos os parâmetros necessários para a aplicação dos algoritmos genéticos é possível definir o cromossomo, sendo que cada gene corresponderá a uma variável de entrada, explicitamente: a relação de transmissão do eixo traseiro (Ra), o raio de roda (rr) e as cinco razões de transmissão (Rt), uma para cada marcha.

O cromossomo será descrito como a seguinte função:

$$C = \left[x_1(Ra); x_2(rr); x_3(Rt_1); x_4(Rt_2); x_5(Rt_3); x_6(Rt_4); x_7(Rt_5) \right]. \quad (4.1)$$

4.1 DEFININDO OS CROMOSSOMOS

Para se definir a quantidade de bits em cada gene, avaliam-se as restrições de cada entrada, sendo necessária uma análise que priorizará a redução do tempo computacional. Neste item serão definidos os limites de cada gene para a criação dos genótipos.

4.1.1 Razão do eixo traseiro – Ra

Para a razão de eixo traseiro, formulada como $x_1(Ra)$, será utilizado uma margem comercial (Hoff e Gregory 2003) para veículos desta relação sem objetivar muito compromisso aos valores, por não ter sido definido, ainda, parâmetros muito claros para a restrição deste gene. As restrições consideradas servem apenas para uma análise inicial da otimização. Estes valores serão compreendidos entre:

$$2{,}70 \leq x_1(R_a) \leq 4{,}30. \quad (4.2)$$

Para precisão p de 2 casas decimais e amplitude $I = 4{,}30 - 2{,}70 = 1{,}60$, calcula-se a quantidade n de pontos como sendo:

$$n = I * 10^p = 1{,}60 * 10^2 = 160\ pontos. \quad (4.3)$$

Para alocar esta quantidade de pontos no gene, é necessária uma quantidade compatível de bits. Sabendo que 7 bits possui a capacidade de alocar $2^7 = 128$ pontos e que 8 bits aloca $2^8 = 256$ pontos, 160 pontos estão compreendidos entre 7 e 8 bits, sendo necessário um bloco de 8 bits, no mínimo, para compreender este gene.

$x_1(R_a) =$

1	1	0	0	1	0	0	1

Uma representação randômica esquemática é representada, como vemos.

4.1.2 Raio da Roda – rr

A variável $x_2(r_r)$ descrita pelo raio efetivo médio (*Rolling Radius)*, será definida de maneira discreta, visto que há uma gama de raio de rodas limitada de acordo com sua categoria (*Tire Size*) da Tabela 2.6.

A partir de uma amostra de configurações típicas de carros de passeio, limita-se este gene conforme a Tabela 2.6 (página 21), explicitamente:

$$x_2(r_r) = 280\ 283\ 286\ 287\ 289\ 292\ 295\ 296\ 298\ 299\ 302\ 305\ 306\ 308\ 311\ 312\ 313\ 315\ 316\ 317\ 321\ 322\ 323\ 324\ 329\ 330\ 331\ 345\ 351\ 356\ 358\ 359\ 361\ 365\ 366\ 369\ 373\ 376\ 378\ 379\ 386\ 392 \quad (4.4)$$

A quantidade de pontos n para este gene será definida como a sua quantidade de valores, ou seja, $n = 42$ pontos.

Para alocar esta quantidade de pontos é necessário que:

$$5\ bits\ \leq n \leq 6\ bits \quad (4.5)$$

$$32\ pontos = 2^5\ \leq n\ \leq 2^6 = 64\ pontos \quad (4.6)$$

Ou seja, uma quantidade mínima de 6 bits.

Neste caso, após a conversão para a base decimal, tem-se o gene relacionado à variável $x_2(rr)$, onde cada elemento do vetor dos 42 pontos corresponderá a um valor de x_2.

4.1.3 Razões de Trasmissão – Rt

A partir da Tabela 4.1 (Hoff e Gregory 2003), que é uma seleção dos tamanhos das razões de transmissão da Tabela 4.1 elaborou-se um estudo sobre as configurações de razão de transmissão, para diferentes modelos manuais de cinco marchas, com a finalidade de se determinar uma faixa para a busca das variáveis de x_3 a x_7.

Tabela 4.1 Razões de transmissão para diferentes carros (Hoff e Gregory 2003)

			Transmission Ratios							4WD	
Vehicle	**Type**	**Final**	**1st**	**2nd**	**3rd**	**4rth**	**5th**	**6th**	**Re**	**Low**	**Std Tire**
Saturn SL1	Man	4,06	3,25	1,95	1,17	0,81	0,61	-	2,92	-	P185/65SR14
Saturn SL2 *	Man	4,06	3,25	1,95	1,42	1,03	0,73	-	2,92	-	P185/65SR14
VW Beetle	Man	4,24	3,78	2,12	1,36	1,03	0,84	-	3,60	-	P205/55HR16
VW Beetle	Man	3,89	3,78	2,12	1,36	0,97	0,76	-	3,60	-	P205/55HR16
BMW 3 Series	Man	3,15	4,23	2,52	1,66	1,22	1,00	-	4,04	-	P205/55R16
Honda Accord	Man	4,39	3,27	1,77	1,15	0,87	0,58	-		-	P195/65R15
Saturn L200	Man	4,50	3,38	1,76	1,18	0,89	0,70	-	-	-	P195/65R15
Ford F150	Man	3,08	3,90	2,25	1,49	1,00	0,80	-	3,41	-	P235/70R16SL
Ford F150	Man	3,31	3,90	2,25	1,49	1,00	0,80	-	3,41	2,64	P235/70R16SL
Saturn Vue	Man	4,41	3,58	2,02	1,35	0,98	0,81	-	3,31	-	P215/70SR16

	Valores Mínimos
	Valores Máximos

Para estes valores calcularam-se as médias e os desvios padrões para as razões de transmissão da Tabela 4.1.

Tabela 4.2 Médias e desvios padrões para as Rts da Tabela 4.1

	1º	2º	3º	4º	5º
Média	3,63	2,07	1,36	0,98	0,76
Desvio Padrão	0,34	0,23	0,16	0,11	0,12

Através da distribuição normal (Gaussiana), é possível estimar as maiores probabilidades do evento R_t acontecer a partir das médias e desvios padrões calculadas. A função de densidade de probabilidade é calculada como:

$$f(R_t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{(R_t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{4.7}$$

Sendo:

μ – média das razões de transmissão para cada marcha;

σ – desvio padrão;

$f(Rt, \mu, \sigma) = P(Rt)$ – Probabilidade de ocorrer o evento Rt.

É possível plotar a função densidade de probabilidade pelas razões de transmissão, como na Figura 4.1, obtendo polinômios para cada curva, conforme sua regressão polinomial.

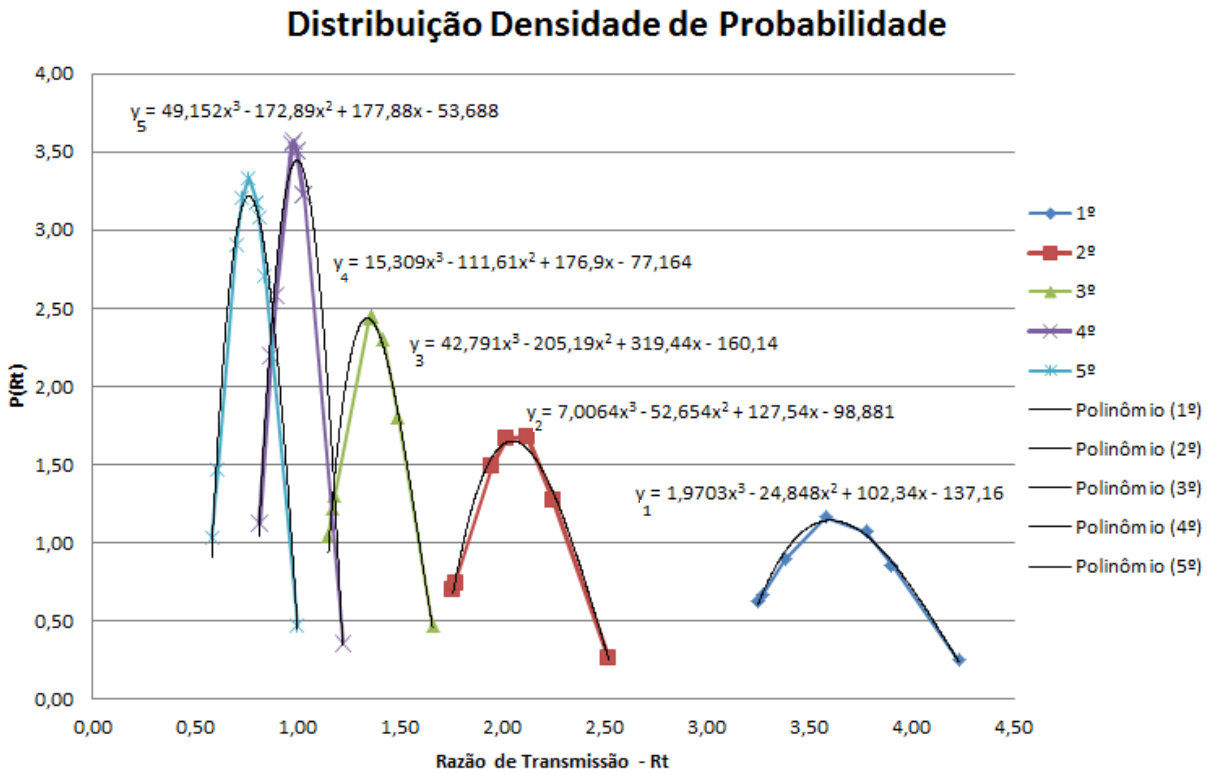


Figura 4.1 Distribuição Densidade de Probabilidade para as diferentes relações de transmissão R_t da Tabela 4.1.

$$
\begin{aligned}
y_1 &= 1{,}9703x^3 - 24{,}848x^2 + 102{,}34x - 137{,}16 \\
y_2 &= 7{,}0064x^3 - 52{,}654x^2 + 127{,}54x - 98{,}881 \\
y_3 &= 42{,}791x^3 - 205{,}19x^2 + 319{,}44x - 160{,}14 \\
y_4 &= 15{,}309x^3 - 111{,}61x^2 + 176{,}9x - 77{,}164 \\
y_5 &= 49{,}152x^3 - 172{,}89x^2 + 177{,}88x - 53{,}688
\end{aligned}
\tag{4.8}
$$

Igualando as equações das curvas que se cruzam e resolvendo os polinômios de terceiro grau resultante é possível determinar as razões de transmissão com maior probabilidade de ocorrência (destacadas em negrito).

$y_1 = y_2$:

$$
\begin{cases}
x_1 = 3{,}352 \\
x_2 = -0{,}771 \\
\boldsymbol{x_3 = 2{,}940}
\end{cases}
\tag{4.9}
$$

$y_2 = y_3$:

$$
\begin{cases}
x_1 = 2{,}081 \\
x_2 = 0{,}485 \\
\boldsymbol{x_3 = 1{,}697}
\end{cases}
\tag{4.10}
$$

$y_3 = y_4$:

$$
\begin{cases}
\boldsymbol{x_1 = 1{,}178} \\
x_2 = 1{,}114 + 1{,}15j \\
x_3 = 1{,}114 - 1{,}15j
\end{cases}
\tag{4.11}
$$

$y_4 = y_5$:

$$
\begin{cases}
x_1 = 1{,}535 \\
x_2 = -0{,}548 \\
\boldsymbol{x_3 = 0{,}824}
\end{cases}
\tag{4.12}
$$

Para as fronteiras, para simplificar, fez-se $y = 0$, obtendo:

$y_1 = 0$:

$$
\begin{cases}
x_1 = 5{,}155 \\
x_2 = 3{,}100 \\
\boldsymbol{x_3 = 4{,}357}
\end{cases}
\tag{4.13}
$$

$y_5 = 0$:

$$
\begin{cases}
x_1 = 1{,}947 \\
x_2 = 1{,}022 \\
\boldsymbol{x_3 = 0{,}549}
\end{cases}
\tag{4.14}
$$

Definem-se as fronteiras, portanto, com precisão de duas casas decimais, como sendo:

$$
\begin{aligned}
2{,}94 &\leq x_3(Rt_1) < 4{,}36 \\
1{,}70 &\leq x_4(Rt_2) < 2{,}94 \\
1{,}18 &\leq x_5(Rt_3) < 1{,}70 \\
0{,}82 &\leq x_6(Rt_4) < 1{,}18 \\
0{,}55 &\leq x_7(Rt_5) \leq 0{,}82
\end{aligned}
\tag{4.15}
$$

Calculando os números de pontos para cada gene, obtém-se:

$$n_3 = I * 10^p = 1{,}42 * 10^2 = 142\ pontos\ \rightarrow 8\ bits$$
$$n_4 = I * 10^p = 1{,}24 * 10^2 = 124\ pontos\ \rightarrow 7\ bits$$

$$n_5 = I * 10^p = 0{,}52 * 10^2 = 52\ pontos\ \rightarrow 6\ bits$$
$$n_6 = I * 10^p = 0{,}36 * 10^2 = 36\ pontos\ \rightarrow 6\ bits$$
$$n_7 = I * 10^p = 0{,}27 * 10^2 = 27\ pontos\ \rightarrow 5\ bits \quad (4.16)$$

4.2 CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL

Após definida a quantidade de bits do algoritmo, realiza-se a partir do *software* MATLAB (R2012b), a criação de cada indivíduo e da população através da função *randi()*, representados por uma matriz C0 de distribuição aleatória uniforme de algarismos 0 e 1, possuindo 48 bits na coluna e nq indivíduos na linha (48 bits x nq). Explicitamente:

```
%% Criação da matriz população inicial

bit = [8; 6; 8; 7; 6; 6; 5];
totalbits = bit(1)+bit(2)+bit(3)+bit(4)+bit(5)+bit(6)+bit(7);

C0 = randi([0 1], nq, totalbits);
```

Após a criação da população inicial C0 é necessário converter os genes para a base decimal, utilizando-se da função *bin2dec()* (a função *num2str()* é utilizada também para converter cada elemento da matriz em *string*, a fim de avaliá-lo na função *bin2dec()*), como a seguir:

```
% Convertendo para a base decimal

for j = 2:7
    Cd0(1,1) = bin2dec(num2str(C0(i,1:sum(bit(1:1)))));
    Cd0(j,1) = bin2dec(num2str(C0(i,(sum(bit(1:j-
1))+1):sum(bit(1:j)))));
end
```

4.3 DELIMITAÇÃO DO GENE NA REGIÃO VIÁVEL

Obtendo-se os valores decimais é necessário criar os valores reais dentro da região viável antes de avaliá-los pela função objetivo. Cada gene passará pela seguinte equação para possuir valor real dentro da região delimitada:

$$X_i = x_i * \left(\frac{b_i - a_i}{2^m - 1}\right) \quad (4.17)$$

Sendo:

X_i, o gene definido pela região viável;

x_i, o gene na base decimal gerado aleatoriamente;

b_i e ai, os limites superiores e inferiores de cada gene;

m, a quantidade de bits para cada gene.

```
% Valores Reais dentro da região viável

for k = [1 3 4 5 6 7]
    X(i,k) = x(k,1)+(Cd0(k)*(x(k,2)-x(k,1)))/((2^bit(k)));
    X(i,2) = x2(int8(x(1,2)+(Cd0(2)*(x(2,2)-
x(1,2)))/((2^bit(2)))));
end
```

Os limitantes foram divididos em x e x2, sendo que x2 faz uma busca dentro de um espaço inteiro que representa o raio de roda (rr) com valores entre 1 e 42, que chamam a função com os verdadeiros valores de rr. Para isto foi utilizada a função *int8()* para se fazer a leitura no espaço de inteiros de 8 bits.

4.4 FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO

Através de uma nota será avaliada a aptidão dos cromossomos (minimizar o consumo de combustível e maximizar a velocidade final e aceleração). E será através do teste de aceleração e do teste de economia que se encontrará argumentos para esta função de aptidão.

Para a função objetivo foram criadas duas funções no *software* MATLAB (R2012b), uma para o teste de economia de combustível (arquivo "economiadecombustivel.m") e outra para o teste de aceleração e avaliação ("aceleracao.m"). A entrada dos dados é efetuada a partir da função "aceleracao.m" que calcula a velocidade máxima e calcula o tempo de 0 a 100 km/h. A função aceleração chama a função "economiadecombustivel.m", gerando uma pontuação para os três parâmetros objetivados.

A equação usada para o cálculo da função objetivo é a razão do produto da economia de combustível pela velocidade final sobre o tempo de 0 a 100 km/h:

$$f = \frac{ec.v_{m_f}}{t_{0-100\ km/h}} \tag{4.18}$$

Sendo v_{m_f} e $t_{0-100\ km/h}$ calculados no teste de aceleração e ec calculado no teste de economia de combustível.

Na função "economiadecombustível.m" (Anexo 8.2) chama-se a tabela "targetspeed.mat" que contém os valores de velocidade em função do tempo do teste de economia de combustível, extraídos da Figura 2.31.

A função que avaliará as restrições das variáveis de entrada é definida no MATLAB como:

```
% Função de Avaliação para a população inicial gerada
f(i,1) = aceleracao(X(i,1),X(i,2),X(i,3),X(i,4),X(i,5),X(i,6),X(i,7));
```

Sendo o vetor X representativo dos valores reais dentro da região viável.

Definida a função objetivo, pode-se ponderar os parâmetros ec, v_{m_f} e $t_{0-100\,km/h}$ para priorizar a aceleração, ou a economia de combustível. Para tal feito, foram adicionados termos exponenciais constantes na função objetivos capazes de atribuir valor no tempo de zero a cem e na economia de combustível, conforme a Equação 4.19. Deste modo os resultados finais esperados são otimizados de acordo com a maneira que se preferir.

$$f = \frac{ec^{P_{econ}}.v_{m_f}}{\left(t_{0-100\,km/h}\right)^{P_{esp}}} \tag{4.19}$$

Sendo P_{econ} e P_{esp} os termos constantes referentes aos pesos das ponderações para priorização de veículos econômicos (de passeio) e esportivos, respectivamente.

4.5 OPERADORES GENÉTICOS

Após definida a função de avaliação foi criado um arquivo "AG.m" (Anexo 8.3) que chama a função "economiadecombustivel.m" e "aceleracao.m", utilizando os operadores genéticos baseados na teoria explicada seção anterior.

4.5.1 Reprodução

Selecionou-se o método da roleta neste ponto, o qual foi programado da seguinte maneira na codificação binária:

```
% Probabilidades de acontecer Cf
ProbCf = f0/sum(f0);

% Probabilidades acumulativas
for i=1:nq
q(i,1) = sum(ProbCf(1:i));
end

% Vetor Randômico com valores entre 0 e 1
randRep=rand(nq,1);

% Seleção dos Cromossomos e Criação da nova população
for i=1:nq
    for j=1:nq
        if q(j)>=randRep(i)
            CRep(i,:)=C0(j,:);
            break
        end
    end
end
```

A população resultante nesta etapa é definida como CRep.

4.5.2 Cruzamento

Para o cruzamento localizou-se um ponto aleatório entre dois pais, substituindo, a partir desse ponto, o restante de seu material genético, definindo a população CCruz.

A posição de substituição é determinada pela seguinte fórmula (Saramago 2003)

$$k = 1 + rand[(m-1) - 1] \tag{4.20}$$

Ao submeter cada cromossomo a uma probabilidade randômica, os pais com probabilidades menores que a probabilidade de cruzamento sugerida serão selecionados de dois a dois para trocarem seus materiais genéticos em uma posição k.

Para a representação binária, seu código pode ser descrito como:

```
nCruz = 1;
while mod(nCruz,2) ~= 0
    nCruz = 0;
    randCruz = rand(nq,1); % Gera Números Randômicos para o cruzamento
    for i = 1:nq
        if randCruz(i,1) <= Pc
            posCruz(nCruz+1,1) = i;
            nCruz=1+nCruz;
        end
    end
    if nCruz == 0 % Condição para voltar ao while
        nCruz = 1;
    end
end

% Posição de Cruzamento
k = round(1+rand*((m-1)-1));

% Cruzamento
for i = 1:nCruz
    Scr(i,:) = CRep(posCruz(i),:);
end
for i = 1:2:nCruz
    ScFr(i,:) = [Scr(i,1:k) Scr(i+1,k+1:m)];
    ScFr(i+1,:) = [Scr(i+1,1:k) Scr(i,k+1:m)];
end
for i = 1:nq
    CCruz(i,:) = CRep(i,:);
end
for i = 1:nCruz
    CCruz(posCruz(i),:) = ScFr(i,:);
end
```

4.5.3 Mutação

Para a mutação basta que haja a inversão do valor de um nucleotídeo aleatório da cadeia.

A probabilidade de mutação é aplicada a cada elemento randômico gerado para cada cromossomo, e os nucleotídeos selecionados são armazenados para depois terem seus valores invertidos. Este método é explicitado conforme o código realizado a seguir, sendo E a matriz randômica que tem dimensão da população ($m\ x\ n_q$).

Para a representação binária, seu código pode ser descrito como:

```
randMut=rand(E,1);

nMut=0;
for i = 1:E
    if randMut(i,1) <= Pm
        posMut(nMut+1,1) = i;
        nMut=nMut+1;
    end
end

CMut = CCruz;

j=1;
for i = 1:E
    if j <= nMut
        if i == posMut(j)
            for k = 1:m:(m*nq+1)
                if posMut(j) >= k && posMut(j) < k+1
                    posCMut=1;
                    if CMut(posCMut,1) == 0
                        CMut(posCMut,1) = 1;
                    else
                        CMut(posCMut,1) = 0;
                    end
                end
            end
            j = j+1;
        end
    else
        break
    end
end
```

Ao final é gerada a população CMut que será avaliada pela função de aptidão. Realimentando o ciclo.

4.6 ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL

Para a simulação de uma única geração com 100 indivíduos, conforme as funções em “AG.m” (Anexo 8.3) e utilizando a ferramenta auxiliar de compilação do MATLAB 2012b que calcula o gasto computacional, obteve-se os valores da Figura 4.2.

Profile Summary

Generated 13-Nov-2013 17:00:40 using cpu time.

Function Name	Calls	**Total Time**	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
AG	1	47.419 s	0.580 s	
aceleracao	400	43.056 s	10.892 s	
economiadecombustivel	400	32.164 s	32.164 s	
num2str	4800	1.966 s	0.590 s	
bin2dec	4800	1.817 s	1.223 s	
int2str	4800	1.376 s	1.376 s	
repmat	4800	0.496 s	0.496 s	
iscellstr	4800	0.098 s	0.098 s	

Figura 4.2 Tempo computacional gasto para a primeira simulação – MATLAB 2012b

A Figura 4.2 mostra um péssimo desempenho computacional, sendo necessários 47 segundos para que todo o processamento seja feito para uma única geração.

A primeira estratégia, então, foi definir cada operador genético como função, gerando os arquivos “roleta.m”, “cruzamento.m”, “mutação.m”.

Subsequente a este passo criou-se um arquivo “geracao.m” que contém os limites das variáveis de entradas e os operadores genéticos.

A partir daí foi possível definir a tabela “targetspeed.mat” dentro desta função geração, sendo que ela será lida uma única vez ao invés de 400 vezes, encaminhando seus valores dentro dos operadores genéticos, que por sua vez enviam os valores para a função aceleração e após isso à função de economia de combustível.

Esta definição das funções para cada operador genético ainda permite que a função aceleração seja chamada 200 vezes para cada população ao invés de 400, o que reduz drasticamente o custo computacional.

Para todas as funções descritas houve o cuidado de se pré-alocar a memória definindo as variáveis e evitando ao máximo a criação de ciclos, definindo o algoritmo nos moldes clássicos de programação para uma implementação futura em linguagem C.

Existem bibliotecas de Algoritmos Genéticos disponibilizadas na bibliografia e na internet, que possuem uma grande extensão de documentos e arquivos em linguagem C++ com diversos operadores e classes, como é o caso do GALib disponibilizado pelo MIT (MIT 1999), o que motiva a aplicação desses recursos em etapas futuras de otimização.

Os resultados das estratégias aplicadas para o algoritmo resultam na economia de tempo descrita pela Figura 4.3. Nota-se pela figura a drástica redução computacional de aproximados 47 segundos para aproximadamente 4,56 segundos.

Profile Summary

Generated 14-Nov-2013 09:14:31 using cpu time.

Function Name	Calls	**Total Time**	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
geracao	1	4.562 s	0.182 s	
aceleracao	200	2.545 s	0.733 s	
criapopulacaoinicial	1	2.268 s	0.112 s	
economiadecombustivel	200	1.812 s	1.812 s	
num2str	2400	0.836 s	0.224 s	
bin2dec	2400	0.820 s	0.561 s	
int2str	2400	0.612 s	0.612 s	
repmat	2400	0.228 s	0.228 s	
mutacao	1	0.050 s	0.050 s	
iscellstr	2400	0.031 s	0.031 s	
cruzamento	1	0.009 s	0.009 s	
roleta	1	0.008 s	0.008 s	

Figura 4.3 Tempo computacional gasto utilizando estratégias de programação – MATLAB 2012b

4.6.1 Pontos Flutuantes (Implementação de uma codificação Real)

Com a finalidade de se buscar uma otimização do algoritmo criado, foi implementado a representação por valor, onde aplica-se a codificação real no lugar da codificação binária. A motivação inicial dessa implementação se deu ao fato de buscar uma convergência mais exata. Como é mencionado na Seção 3.2 (Página 43), quando há uma necessidade de precisão, a representação por codificação binária pode apresentar certas dificuldades, apresentando necessidade da criação de um grande número de *bits* para atingir a precisão desejada. Isso pode utilizar muito processamento computacional. Neste caso, como há um grande número de variáveis a serem otimizadas, o custo computacional é muito alto, o que torna essa implementação pertinente.

5 RESULTADOS

Apresentam-se aqui os resultados obtidos utilizando-se a metodologia proposta na otimização de um automóvel médio de passeio com transmissão manual, assim como ponderações voltada para carros esportivos e econômicos. Para se avaliar a qualidade dos resultados, estes foram comparados aos de um veículo comercial, o SL2 da Saturn (uma divisão da GM americana). Foram usados como parâmetros fixos de entrada na otimização o mesmo motor e chassi do Saturn SL2, contudo os parâmetros a serem otimizados (raio da roda, eixo e relações de transmissão) foram inicializados aleatoriamente.

Os resultados serão apresentados em duas simulações distintas: A primeira utilizando-se da codificação binária como representação do algoritmo, e a segunda com a codificação por valor em base real, onde nesta existirão ponderações para veículos esportivos e econômicos.

5.1 RESULTADOS UTILIZANDO CODIFICAÇÃO BINÁRIA

Priorizando inicialmente a fácil implementação da codificação binária na otimização, utilizou-se esta codificação para se buscar a convergência da função objetivo, conforme o cromossomo foi definido nos capítulos anteriores.

Os parâmetros a serem otimizados (raio da roda, eixo e relações de transmissão) foram inicializados aleatoriamente formando populações de 200 indivíduos a cada geração. Cada indivíduo da geração foi avaliado com base em uma função objetivo que considera os dois testes apresentados na seção 2. Foram considerados os operadores genéticos padrões: Mutação, com probabilidade de 3%, Cruzamento, com probabilidade de 65%, e Elitismo, onde a cada 10 gerações, os 5 melhores indivíduos dessas gerações substituem os 5 piores da última geração testada.

A convergência é mostrada em um gráfico com 400 gerações na Figura 5.1, onde os melhores indivíduos de cada geração são indicados em verde e a média de cada geração em amarelo. Mostra-se também o resultado da função objetivo calculada usando os valores reais do Saturn SL2, para os parâmetros otimizados.

É possível observar a estabilização e flutuação dos valores da média a partir de 150 gerações, o que pode representar o máximo local.

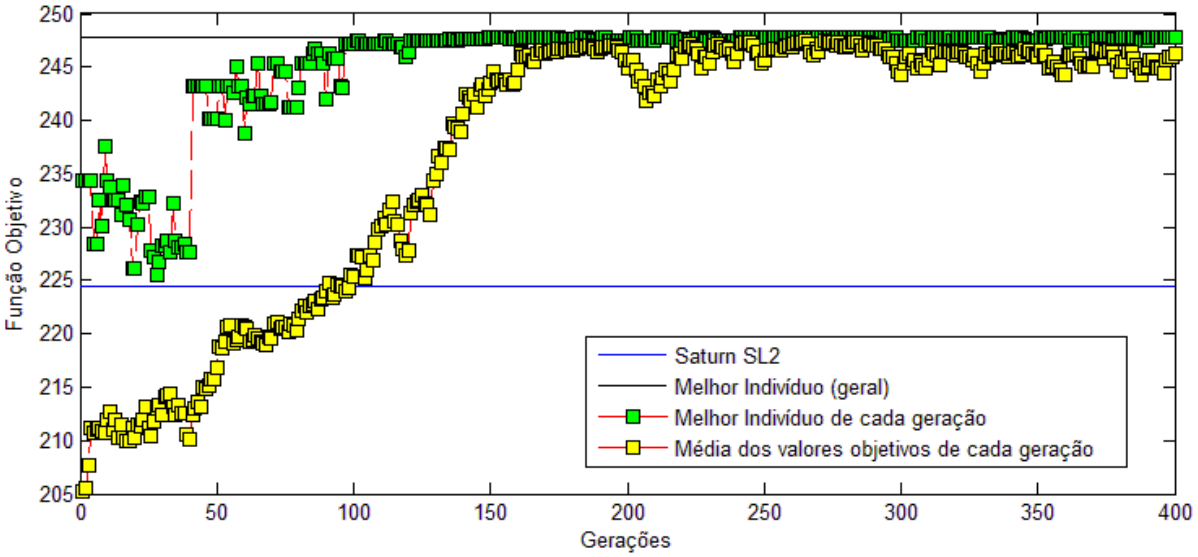


Figura 5.1 Resultado da otimização aplicando a metodologia proposta comparando com o Saturn SL2

Para o melhor indivíduo gerado, os valores de entrada obtidos foram: razão de eixo traseiro $R_a = 4{,}1875$, o raio da roda $r_r = 289\ mm$ e $R_{t_1} = 3{,}7942$, $R_{t_2} = 2{,}3103$, $R_{t_3} = 1{,}4156$, $R_{t_4} = 0{,}8538$ e $R_{t_5} = 0{,}8031$, para as razões de transmissão. Obtendo-se, portanto, pela função objetivo, um valor $fitness = 247{,}7479$, que representa a combinação do consumo de combustível $e_c = 11{,}2488\ km/litro$, do tempo $t_{0-100} = 9{,}1\ s$ e da velocidade máxima alcançada $v_{máx} = 200{,}4216\ km/h$. Para o modelo Saturn SL2 a função objetivo possui um valor $fitness = 224{,}3798$, correspondendo a um consumo de combustível $e_c = 11{,}6528\ km/litro$, a um tempo $t_{0\ a\ 100km/h} = 10{,}1\ segundos$ e a uma velocidade máxima alcançada $v_{máx} = 194{,}4802\ km/h$. (Colherinhas et all, 2014)

A Figura 5.2 mostra as tendências desses parâmetros em função das gerações, comparadas com os valores do Saturn SL2, indicados pela linha contínua.

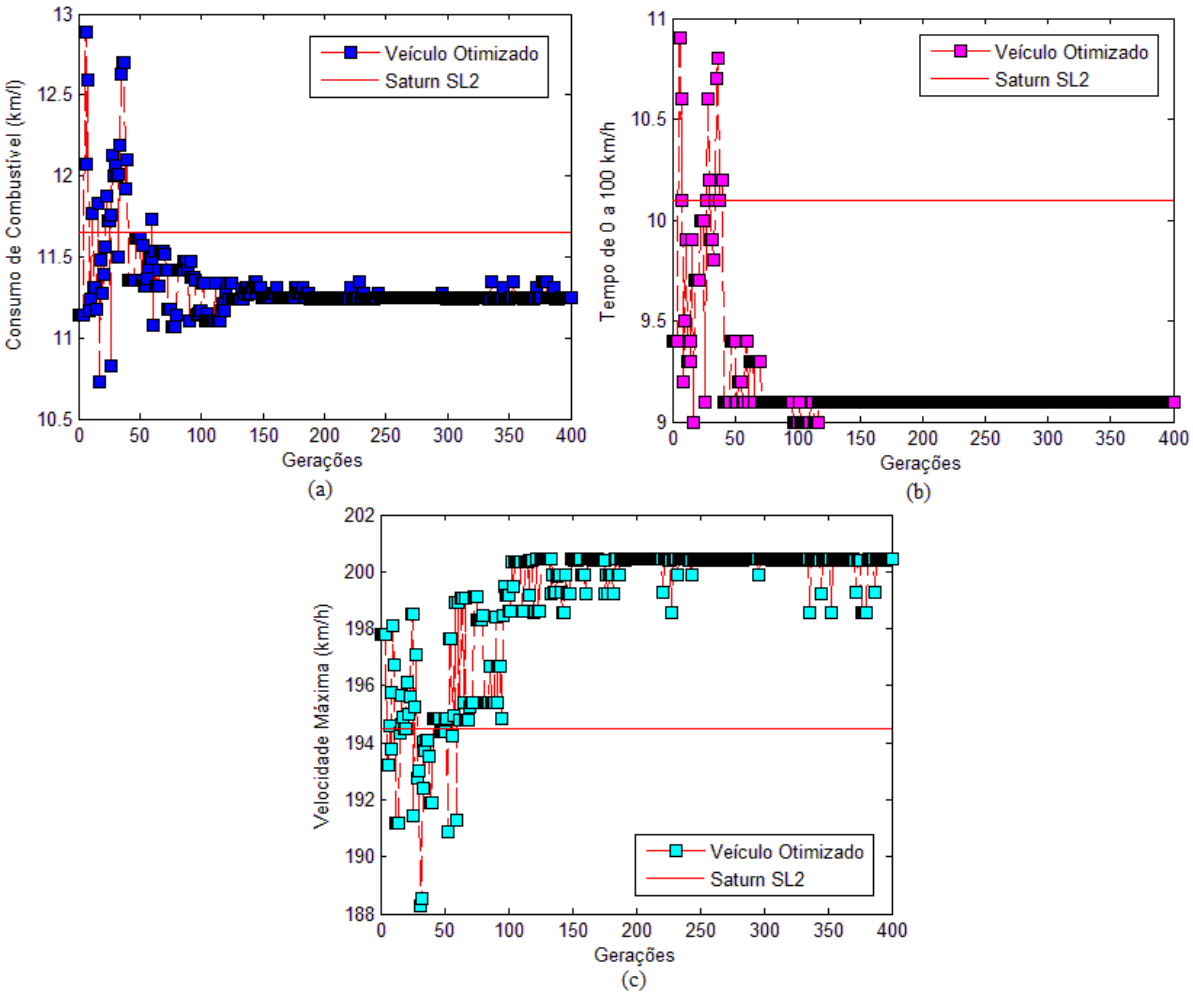
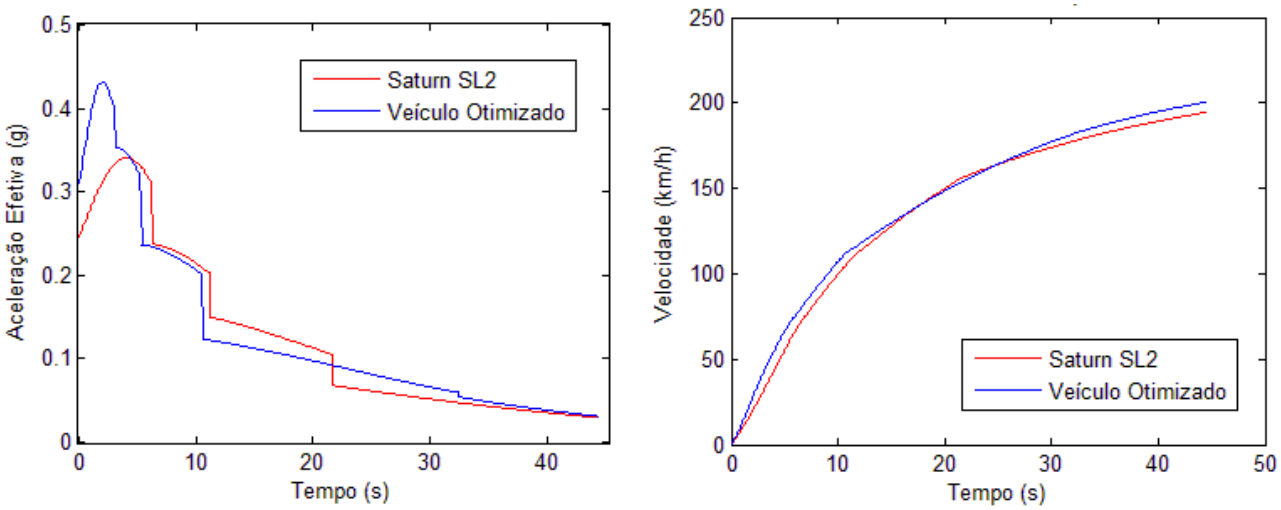


Figura 5.2 Evolução das Curvas de (a) Consumo de Combustível, (b) Tempo de 0 a 100 km/h, (c) Velocidade Máxima no processo de otimização realizado

A análise desses valores mostra que o modelo Saturn SL2 economiza em torno de 0,5 $km/litro$ em relação ao veículo otimizado, entretanto para alcançar uma velocidade de 0 a 100 km/h demora um segundo a mais e é penalizado em 6 km/h na sua velocidade máxima, isso sugere que no veículo otimizado priorizou-se a sua aceleração, sendo que o valor máximo da função objetivo se baseia na combinação destes três parâmetros. Num aperfeiçoamento da metodologia de otimização proposta será possível priorizar alguns destes três parâmetros, beneficiando, por exemplo, carros que possuem a intenção de economizar mais combustível ou diminuindo o tempo de 0 a 100 km/h e a aumentando a velocidade máxima para beneficiar carros de modelo esportivo.

Na Figura 5.3 (a) é observada a aceleração em g's (gravidade), em função do tempo, do veículo otimizado e do Saturn SL2, notando-se claramente a maior aceleração do veículo otimizado, assim como a maior velocidade em menor tempo deste veículo na Figura 5.3 (b).



(a) (b)

Figura 5.3 Curvas de (a) Aceleração (g); (b) Velocidade (km/h) em função do tempo (s)

A Figura 6 explicita as Potências de Tração disponíveis em cada marcha no teste de aceleração para os dois veículos. Pode-se observar que o veículo otimizado utiliza razões de velocidade menores para a mesma marcha que o Saturn SL2. Isso possibilita maiores valores de Potência disponível para acelerar o veículo levando a uma maior velocidade final (82,47 W para o veículo otimizado e 73,82 W para o Saturn SL2). A curva de Potência de Resistência é igual, pois os casos são analisados utilizando o mesmo chassi. A velocidade máxima do veículo é alcançada quando a curva de Potência de Tração se iguala a curva de Potência de Tração.

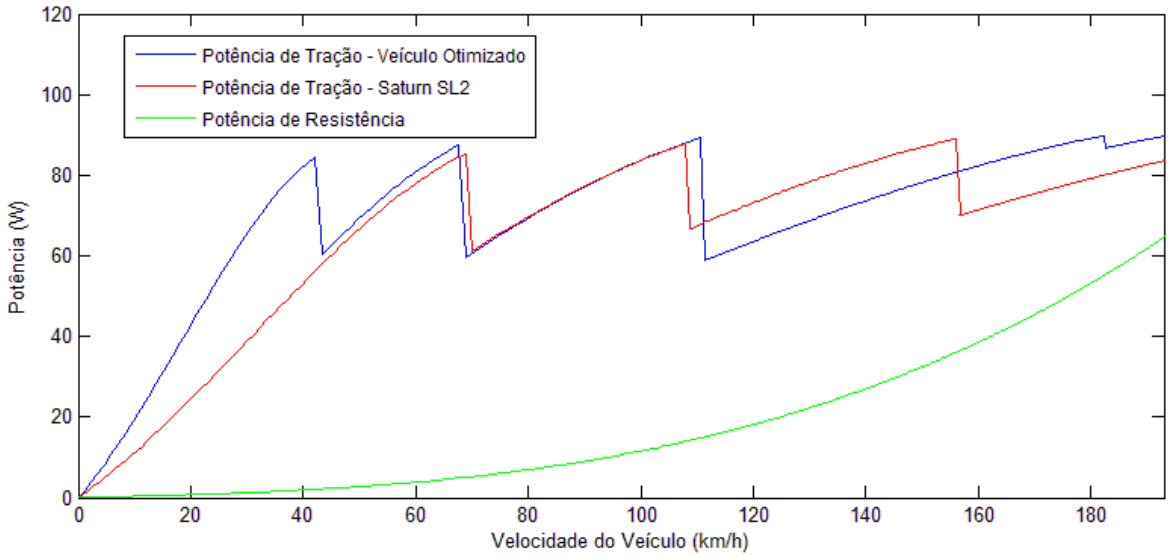


Figura 5.4 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) do Saturn SL2 e do veículo otimizado.

5.2 RESULTADOS UTILIZANDO CODIFICAÇÃO REAL (PONTOS FLUTUANTES)

A otimização com codificação real considerou três objetivos distintos. Por meio da ponderação dos pesos atribuídos aos parâmetros alvo na função objetivo, foi possível otimizar o veículo para: melhor relação entre os parâmetros (ou otimização "pura"), veículo esporte (beneficiando a aceleração) e veículo de passeio (beneficiando a economia de combustível). As configurações de Cadeia Cinemática obtidas são mostradas na Tabela 5.1 (Colherinhas et all, 2014).

Tabela 5.1 Resultados das otimizações reais das configurações dos veículos de Espote e Passeio em comparação com o Saturn SL2 e a otimização "Pura"

Otimização	**Pura**	**Esporte**	**Passeio**	**Saturn SL2**
Função Objetivo	**244,87**	241,53	232,58	224,15
Consumo de Combustível (km/l)	**11,07**	10,65	13,84	11,64
Tempo (s) de 0 à 100 km/h	**8,9**	8,8	10,9	10,1
Máxima velocidade (km/h)	**196,92**	199,58	183,15	194,47
Raio de Roda - rr (mm)	**283**	286	289	290
Razão de Eixo Traseiro – Ra	**4,17**	4,03	3,40	2,95
Razão de trasmissão 1 – Rt1	**3,62**	3,44	3,51	3,25
Razão de trasmissão 2 – Rt2	**2,72**	2,41	2,84	2,06
Razão de trasmissão 3 – Rt3	**1,55**	1,62	1,26	2,42
Razão de trasmissão 4 – Rt4	**0,88**	0,98	1,09	1,03
Razão de trasmissão 5 – Rt5	**0,72**	0,80	0,66	0,73

A Tabela 5.1 também explicita o valor calculado para os parâmetros originais do Saturn SL2. Esses valores serão base de comparação das análises. È desejável sempre aumentar o valor dos parâmetros Economia de Combustível e Máxima velocidade, assim como diminuir o valor de tempo de aceleração de 0 á 100 km/h.

A Figura 5.5 apresenta o gráfico do melhor indivíduo para cada geração da configuração onde ocorre a otimização pura (assim como sua média), e os valores máximos da convergência da otimização do veículo de passeio e do veículo esportivo, comparados com o valor objetivo do veículo original Saturn SL2.

É possível notar que a codificação real converge com muito mais rapidez que na representação binária, como foi previsto na Seção 4.6.1, pois a representação real consegue trabalhar com muito mais destreza quando há muitas variáveis, não sendo necessário armazenar a grande quantidade de bits que há na codificação binária. O tempo de simulação para as 150 gerações foi de poucos minutos, o que torna esse algoritmo uma poderosíssima ferramenta para projetos iniciais de seleção de powertrain.

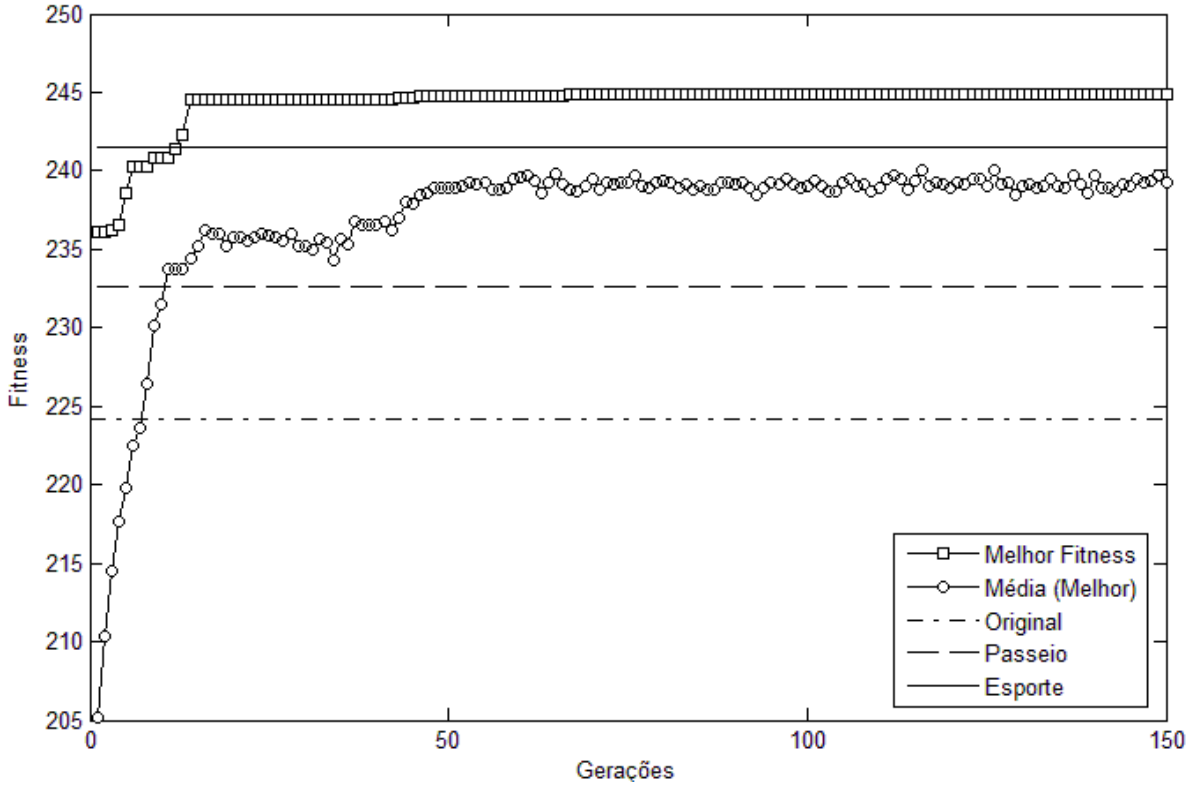


Figura 5.5 Resultados da Otimização (Fitness x Gerações) das configuração de melhor fitness e suas médias, e os valores máximos para os veículos de Passeio e Esporte, assim como o veículo original

Após várias simulações iniciais para testar o algoritmo foi possível determinar as melhores probabilidades de crossover, mutação e elitismo, assim como determinar o tamanho das populações. Os parâmetros foram ajustados com 7 % de probabilidade de mutação, 70 % de crossover, 15 % de elitismo para uma população com 250 cromossomos no total. A Figura 5.5 mostra a convergência para um valor máximo logo com cerca de 20 gerações, onde a média converge em torno de 60 gerações, revelando o melhor indivíduo.

O valor objetivo do melhor indivíduo é cerca de 9,2 % maior que o veículo originial Saturn SL2, enquanto os veículos esportivo e de passeio são 7,8 % e 3,8 % superiores ao mesmo Saturn, respectivamente.

5.2.1 Otimização Pura

Para a otimização pura, os valores de entrada obtidos foram: razão de eixo traseiro $R_a = 4{,}17$, o raio da roda $r_r = 283\ mm$ e $R_{t_1} = 3{,}62$, $R_{t_2} = 2{,}72$, $R_{t_3} = 1{,}55$, $R_{t_4} = 0{,}88$ e $R_{t_5} = 0{,}72$, para as razões de transmissão. Obtendo-se, portanto, pela função objetivo um valor $fitness = 244{,}87$, que representa a combinação do consumo de combustível $e_c = 11{,}07\ km/litro$, do tempo $t_{0-100} = 8{,}9\ s$ e da velocidade máxima alcançada $v_{máx} = 196{,}92\ km/h$. Para o modelo Saturn SL2 a função objetivo possui um valor $fitness = 224{,}15$, correspondendo a um consumo de combustível $e_c = 11{,}64\ km/litro$, a um tempo $t_{0\ a\ 100km/h} = 10{,}1\ segundos$ e a uma velocidade máxima alcançada $v_{máx} = 194{,}47km/h$.

A análise desses valores mostra que o modelo Saturn SL2 economiza em torno de 0,57 $km/litro$, ou 4,93% em relação ao veículo otimizado, entretanto para alcançar uma velocidade de 0 a 100 km/h demora 1,2 s, ou 11,88% a mais e é penalizado em 2,45 km/h na sua velocidade máxima, o que corresponde á 1,26 %. Isso sugere que no veículo otimizado priorizou-se a sua aceleração, entretanto o valor máximo da função objetivo se baseia na combinação destes três parâmetros.

Na Figura 5.6 é observada a aceleração em g's (gravidade), em função do tempo, do veículo com otimização pura e do Saturn SL2, notando-se claramente a maior aceleração do veículo otimizado, assim como a maior velocidade em menor tempo deste veículo na Fig. 5 (b). A aceleração máxima obtida com o veículo otimizado foi de 0,43 g's, enquanto com o veículo original esse valor foi de 0,34 g's, representando um aumento de 26%.

As curvas de velocidade x tempo são bastante parecidas, porém nota-se que o veículo otimizado possui velocidade superior durante todo o circuito, excluindo-se a região em entorno de 20 s. Outro fato é que o veículo otimizado alcança os 10 primeiros segundos com maior prioridade, isso se deve ao fato da otimização estar voltada para o melhor tempo de 0 a 100 km/h.

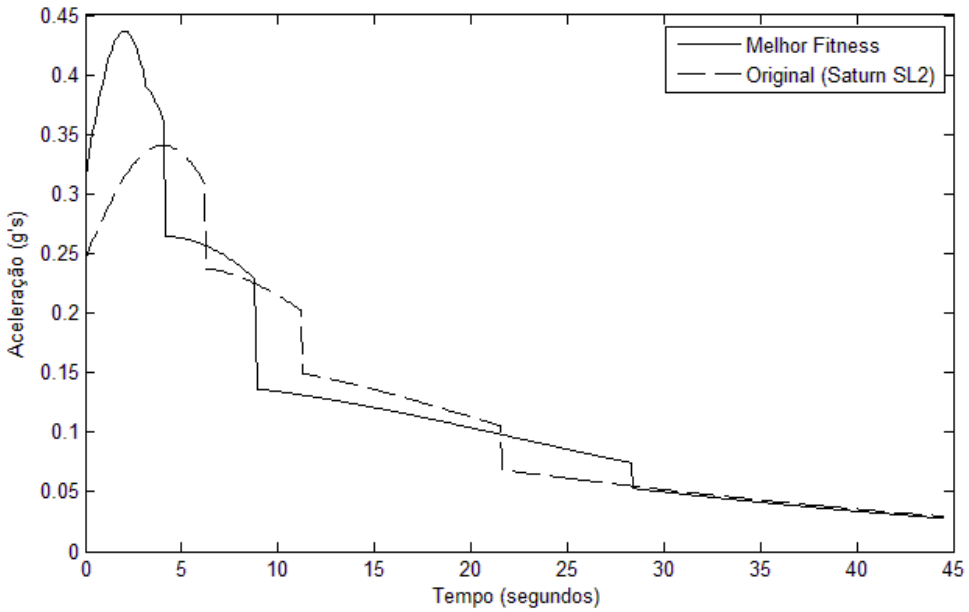


Figura 5.6 Teste de Aceleração (Aceleração x Tempo) para o Veículo Original (Saturn SL2) e para o Melhor Fitness

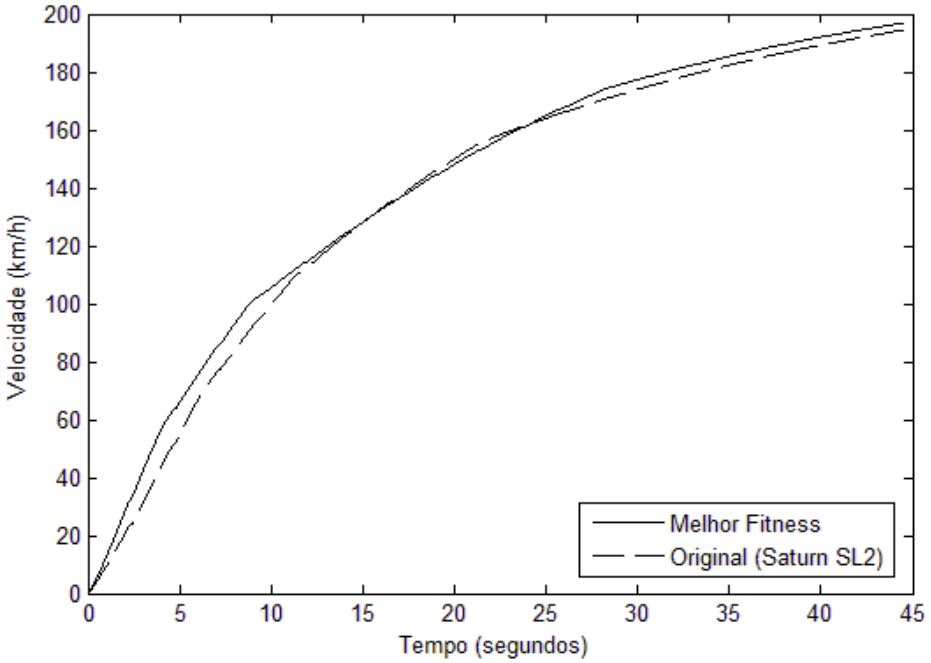


Figura 5.7 Teste de Aceleração (Velocidade x Tempo) para o Veículo Original (Saturn SL2) e para o Melhor Fitness

A Figura 5.8 explicita as Potências de Tração disponíveis em cada marcha no teste de aceleração para os dois veículos. Pode-se observar que o veículo otimizado utiliza razões de velocidade maiores para as duas primeiras marchas e menores para marchas restantes em relação ao Saturn SL2. Isso possibilita maiores valores de Potência disponível para acelerar o veículo levando a uma maior velocidade final (86,23 W para o veículo otimizado e 73,82 W para o Saturn SL2). A curva de Potência de Resistência é igual, pois os casos são analisados utilizando o mesmo chassi. A velocidade máxima do veículo é alcançada quando a curva de Potência de Resistência se iguala a curva de Potência de Tração.

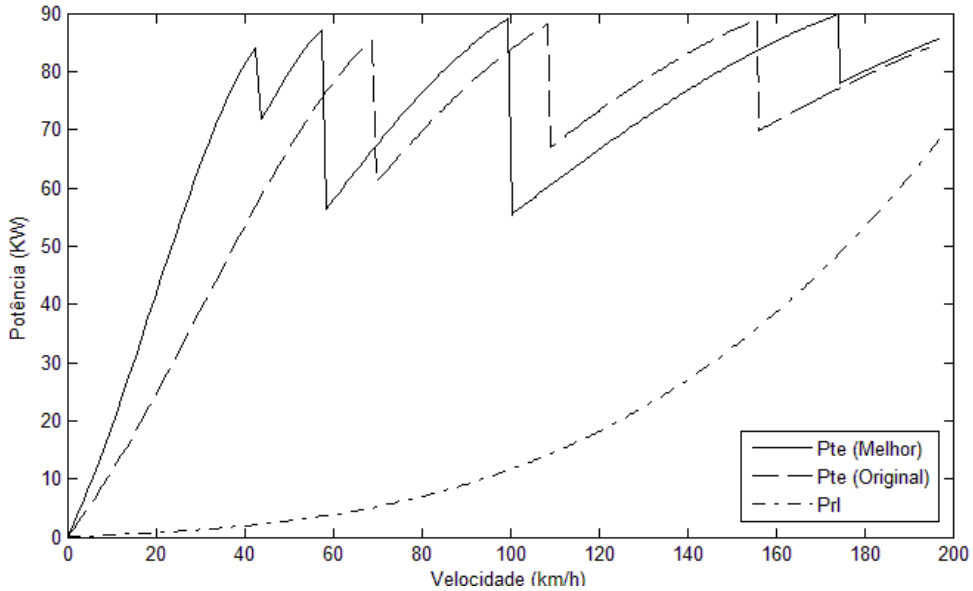


Figura 5.8 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) do Saturn SL2 e do veículo otimizado.

5.2.2 Otimização Ponderada

Num aperfeiçoamento da metodologia de otimização, foi proposto priorizar alguns dos três parâmetros alvo, beneficiando carros que possuem a intenção de economizar mais combustível ou diminuindo o tempo de 0 a 100 km/h e a aumentando a velocidade máxima para beneficiar carros de modelo esportivo.

A configuração do veículo esportivo resultou em razão de eixo traseiro $R_a = 4{,}03$, o raio da roda $r_r = 286\,mm$ e $R_{t_1} = 3{,}44$, $R_{t_2} = 2{,}41$, $R_{t_3} = 1{,}62$, $R_{t_4} = 0{,}98$ e $R_{t_5} = 0{,}80$, para as razões de transmissão. Essa configuração obteve $fitness = 241{,}53$, $e_c = 10{,}65\,km/litro$, tempo $t_{0-100} = 8{,}8\,s$ e da velocidade máxima alcançada $v_{máx} = 199{,}58\,km/h$. Em relação ao veículo original, a velocidade máxima é 2,63% maior, a aceleração é 12,87% maior. Porém o consumo de combustível é 8,52% maior. Isso era esperado, já que para aumentar aceleração, o veículo gasta mais energia.

A configuração do veículo de passeio resultou em razão de eixo traseiro $R_a = 3{,}40$, o raio da roda $r_r = 289\,mm$ e $R_{t_1} = 3{,}51$, $R_{t_2} = 2{,}84$, $R_{t_3} = 1{,}26$, $R_{t_4} = 1{,}09$ e $R_{t_5} = 0{,}66$, para as razões de transmissão. Essa configuração obteve $fitness = 232{,}58$, $e_c = 13{,}84\,km/litro$, tempo $t_{0-100} = 10{,}9\,s$ e da velocidade máxima alcançada $v_{máx} = 183{,}15\,km/h$. Em relação ao veículo original, a velocidade máxima é 5,82% menor, a aceleração é 7,92% menor. Por outro lado o consumo de combustível é 18,90% menor. Em detrimento de desempenho, esse modelo obteve um aumento bastante significativo de eficiência.

A Figura 5.9 compara as acelerações dos dois modelos. Observa-se que a aceleração máxima é de 0,42 g's, obtida pelo modelo esportivo. Os degraus representam troca de marcha.

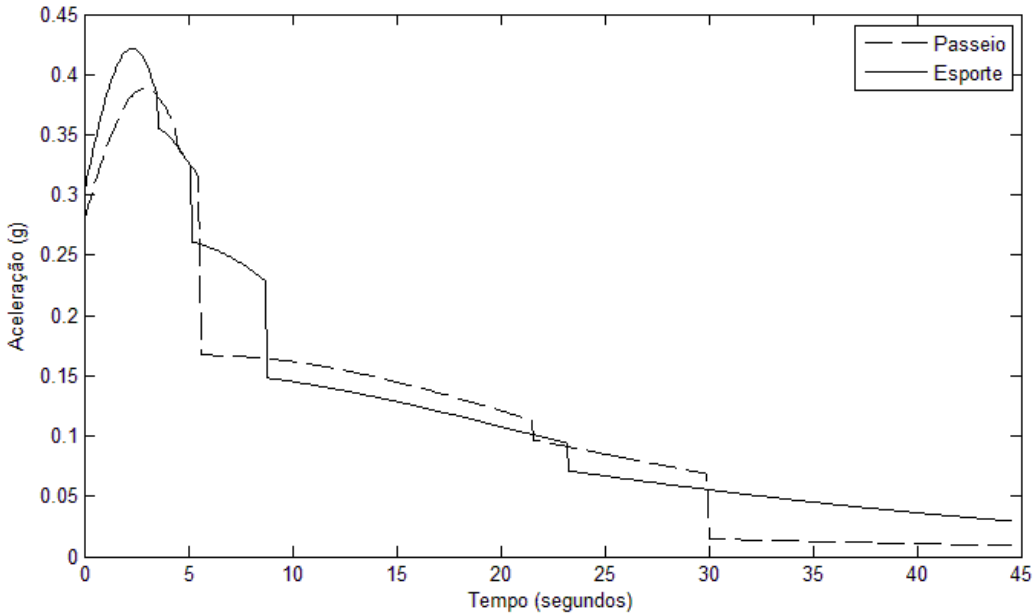


Figura 5.9 Teste de Aceleração (Aceleração x Tempo) para veículos de Passeio e Esporte

A Figura 5.10 compara as velocidades dos dois modelos onde se vê a clara vantagem do veículo esportivo em relação ao de passeio durante todo o circuito e, em especial, até os 100 km/h, assim como em torno de sua velocidade máxima.

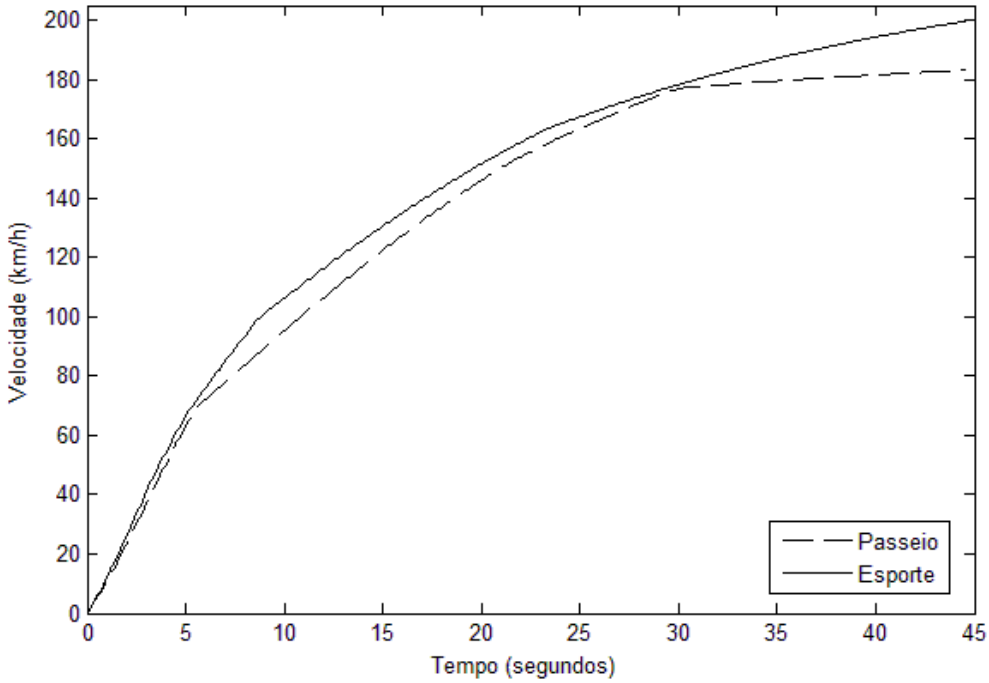


Figura 5.10 Teste de Aceleração (Velocidade x Tempo) para veículos de Passeio e Esporte

É explicitado na Figura 5.11 as curvas de Potência em função da velocidade do veículo.

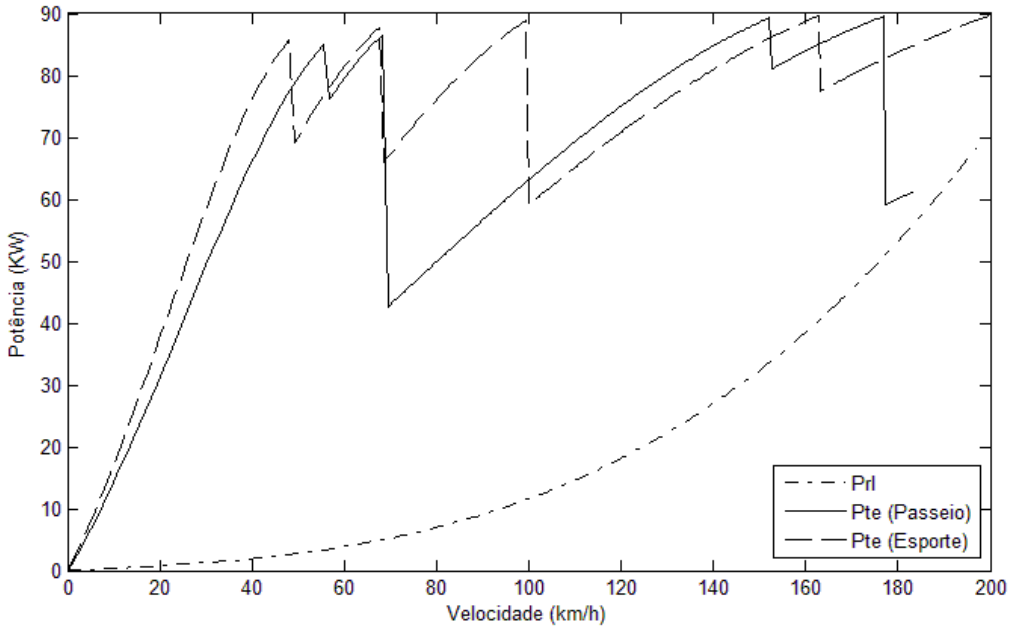


Figura 5.11 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) dos veículos de Passeio e Esporte

O modelo de passeio fica bastante tempo na terceira marcha, enquanto o modelo esportivo é o primeiro a alcançar a quinta marcha. Essa é uma solução não muito usual em projetos automotivos.

Finalmente, a Figura 5.12 compara todos os modelos em um gráfico de Potência x Velocidade. Assim podemos analisar como a otimização resolveu o impasse para as diferentes situações.

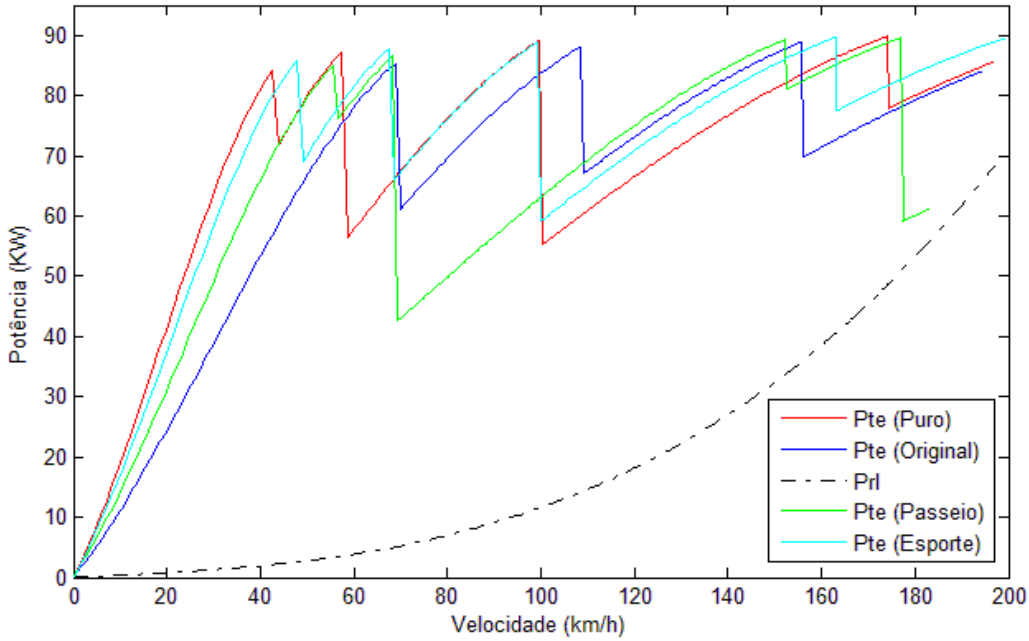


Figura 5.12 Curvas de Potência de Tração e de Resistência (W) em função da Velocidade do Veículo (km/h) para todos os veículos em questão

Para aumentar a energia cinética do veículo, trabalho deve ser realizado. Quanto mais rápido a energia é adicionada, mais rápido o veículo vai acelerar. Assim, configurações que possuem maior área sobre a curva Potência x Tempo (Figura 5.12), são beneficiadas no teste de aceleração. Por esse mesmo motivo, essas configurações são penalizadas no teste de economia de combustível. As primeiras marchas possuem potência máxima menor do que as marchas mais elevadas. Isso ocorre, pois a eficiência da transmissão aumenta com o a diminuição da razão de transmissão.

O modelo com a otimização pura é o primeiro a passar a primeira marcha e o veículo original é o ultimo. O algoritmo resolveu o modelo de passeio de uma maneira bastante diferente dos projetos tradicionais. Ao invés de prolongar o uso da 5ª marcha, a 3ª marcha é usada com o fim de aumentar a eficiência energética. Isso fez a área sobre a curva desse modelo diminuir de maneira bastante significativa.

6 CONCLUSÕES

A otimização gerou resultado satisfatório, pois o valor da função objetivo encontrado para o veículo otimizado superou o valor calculado para o veículo original de maneira significativa (9,24%). Além disso, também em relação ao modelo original, o modelo esportivo superou o tempo de aceleração em 12,87% e o modelo de passeio superou a economia de combustível em expressivos 18,90%. Esse é um indicativo de que a ferramenta pode ser útil no uso de projetos automotivos, principalmente em estágios iniciais de projeto. O valor da função objetivo é uma quantificação da maneira como os diversos parâmetros contribuem para o desempenho do veículo como um conjunto. Porém vários outros fatores que são determinantes para a escolha de uma configuração de cadeia cinemática ainda não foram investigados nesse estudo. Como exemplo pode-se citar os processos de fabricação, condições iniciais exigidas, facilidade de manutenção e outros.

Desde a primeira simulação em codificação binária até a seleção de veículos esportivos e econômicos em codificação real, o algoritmo evoluiu consideravelmente desde a sua primeira simulação. Foi possível obter grande redução do tempo computacional utilizando a codificação real, pelo fato das variáveis de entrada do problema serem contínuas e em grande quantidade. Também foi possível validar o programa, já que por caminhos diferentes (de um lado por codificação binária e pelo outro por real), conseguiu-se atingir a convergência de maneira similar. Sendo assim, desenvolveu-se uma ferramenta muito veloz e segura para atingir a convergência da otimização.

Esse projeto pode ser aperfeiçoado, entretanto, de diversas maneiras em trabalhos futuros para aumentar a sua utilidade e precisão. Modelos mais realistas podem ser desenvolvidos por meio de calibração feita em experimentação. A função objetivo pode ser aperfeiçoada através de adição de parâmetros, como arrancada (variação da aceleração no tempo), custo de fabricação e adição de condições limite, como velocidade mínima a certa inclinação. O algoritmo também pode realizar investigação por meio de outras estratégias de otimização.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Budynas, Richard G., e Keith Nisbett. 2010. *Elementos de Máquinas de Shigley.* McGraw Hill.

CarsDirect. s.d. Acesso em 30 de 10 de 2013. http://www.carsdirect.com/1994/saturn/sl2.

COLHERINHAS, G. B. ; DIAS, P. H. C. ; DINIZ, A. C. G. C. . Otimização das Razões de Transmissão de Cadeias Cinemáticas de Automóveis Via Algoritmo Genético. Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2014. São Paulo: ABCM, 2014. In: VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia - MG. 2014a.

COLHERINHAS, G. B. ; DIAS, P. H. C. ; RODRIGUES, A. P. S. P. ; DINIZ, A. C. G. C. Automotive Powertrain Optimization by Genetic Algorithm Analysing Transmission Ratios. Proceeding of the 4th International Conference on Engineering Optimization - EngOpt 2014. In: 4th International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, 2014b.

DieselNet. s.d. *DieselNet: Diesel Emission Online.* Acesso em 5 de 10 de 2013. http://www.dieselnet.com/.

EPA. s.d. *EPA Urban Dynamometer Driving Schedule.* Acesso em 24 de 10 de 2013. http://www.epa.gov/otaq/standards/light-duty/udds.htm.

Gillespie, Thomas D. 1992. *Fundamentals of Vehicle Dynamics.* Hardcover.

Goldberg, David E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.* The University of Alabama: Addison-Wesley Publishing Company.

Hoff, Craig J., e Davis W. Gregory. 2003. “Introduction to Automotive Powertrains.” Kettering University.

Linden, Ricardo. 2006. *Algorimos Genéticos - Uma importante ferramenta de Inteligência Computacional.* Rio de Janeiro: BRASPORT.

Michalewicz, Z., e M. Schoenauer. 1996. *Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems.* Evolutionary Computation.

MIT. 1999. *GAlib, a C++ Library of Genetic Algorithm Components* . MIT.

Moedinger, Luís Henrique. 2005. *Algoritmos Evolutivos e Inteligência Coletiva Aplicados a problemas de otimização não-linear com restrições: Fundamentos e Estudo Comparativo.* Curitiba: Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação.

Moedinger, Luís Henrique, e Leandro dos Santos Coelho. 2009. “Sintonia de Controlador com escalonamento - Ganhos baseados em Algoritmos Meméticos.” Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Mognon, Vilson Rodrigo. 2004. *Algorimos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas.* Curitiba: Disseração de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Moran, Michael J., e Howard N. Shapiro. 2008. *Fundamentos de Termodinâmica para Engenharia.* Rio de Janeiro: LTC.

Pulkrabek, W. 1997. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine.* New Jersey, USA: Prentice Hall.

SAE J1263. 2009. "Norma SAE Road Load Measurement and Dynamometer Simulation Using coastdown Techniques."

SAE J1491. 2006. "Vehicle Acceleration Measurement."

Saramago, Sezimária F. Pereira. 2003. "Métodos de Otimização Randômica: Algoritmos Genéticos e Simulated Annealing." Em *Notas em Matemática Aplicada*, por Eliana X. L. Andrade, Rubens Sampaio e Geraldo N. Silva, 37. São Carlos, SP: SBMAC.

Yokohoma. 2008. *Yokohama Japan.* Acesso em 14 de 11 de 2013. http://www.yokohama.com/.

8 ANEXOS

Estes anexos apresentam apenas a fase inicial do algoritmo, conforme as explicações que foram feitas na Seção 4. Inúmeros parâmetros foram atualizados e otimizados depois de certo ponto. Para manter a integridade do projeto não está listado aqui todas as funções do algoritmo, nem mesmo a sua versão final.

8.1 TESTE DE ACELERAÇÃO E AVALIAÇÃO

aceleracao.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Teste de Aceleração e Função Fitness %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function fitness = aceleracao(Ra,rr,Rt1,Rt2,Rt3,Rt4,Rt5)

%%%%%%% INPUTS %%%%%%%

g    = 9.81;      % Gravidade (m/s^2)
Cd   = 0.345;     % Coeficiente de Arrasto
H    = 1.717;     % Altura do Veículo (m)
W    = 1.333;     % Largura do Veículo (m)
Af   = 0.8*H*W;   % Área Frontal do Veículo (m^2)
Cw   = 1091;      % Massa (kgf)
m    = Cw;        % Massa do Veículo (kg)
ko   = 0.012;     % Coeficiente de Fricção
T    = 298;       % Temperatura (K)
P    = 101325;    % Pressão (Pa)
R    = 287;       % Constante Específica de ar seco
rho  = P/(T*R);   % Massa volumétrica do ar
kpeak = 1;        % Coeficiente de Fricção
Wb   = 0.0254*102;    % Base da Roda
b    = 0.0254*45.9;   % Distância do eixo frontal ao cg
c    = 0.0254*56.1;   % Distância do eixo traseiro ao cg
h    = 0.0254*30;     % altura do cg
amax = kpeak*b/(Wb-kpeak*h);     % máxima aceleração (g)
amaxg = amax*g;      % máxima aceleração (m/s^2)
redline = 6000;
tfinal = 44.5;       % (s)

RR = m*ko*g;

%% BP(W) = BPa*N^3+BPb*N^2+BPc*N

BPa = -0.0000003;
BPb = 0.0024;
BPc = 12.461;

z = 2;
Vd = 1.9*0.001;

%%
```

```
% Rt(gear) -> rtg.m : Rt em função da marcha
% Ra (Rear Axle/ Razão do Eixo traseiro) e
% Rr (Road Resistance mm) são as variável a serem selecionadas. % Ra=2.95;
rr=310;

%% START %%

t(1) = 0;
s(1) = 0;
v(1) = 0.01;
gear = 1;
% Rt = rtg(gear,Rt1,Rt2,Rt3,Rt4,Rt5);
    if gear == 1
        Rt = Rt1;
    elseif gear == 2
        Rt = Rt2;
    elseif gear == 3
        Rt = Rt3;
    elseif gear == 4
        Rt = Rt4;
    elseif gear == 5
        Rt = Rt5;
    end
npt(1) = 1-(0.06+((Rt^1.5)/100));
NV(1) = 2660*Ra*Rt/rr;
N(1) = NV(1)*v(1)*3600/1000;
BP(1) = (BPa*(N(1)^3)+BPb*(N(1)^2)+BPc*N(1))/1000;
Pte(1) = BP(1)*npt(1);
wr(1) = 0.5*Af*Cd*rho*(v(1)^2);
Pwr(1) = wr(1)*v(1)/1000;
Prr(1) = RR*v(1)/1000;
Prl(1) = Pwr(1) + Prr(1);
me(1) = m*(1+0.04+0.0025*((Rt*Ra)^2));
a(1) = (Pte(1)-Prl(1))*1000/(me(1)*v(1));
if a(1) < amaxg
    aeff(1) = a(1);
else
    aeff(1) = amaxg;
end
bmep(1) = BP(1)*z/(Vd*(N(1)/60));

%% GERADOR %%

i=2;
deltat=0.1;

for t = 0.1:deltat:tfinal

    if N(i-1) > redline
        gear = gear+1;
        if gear <= 5
%             Rt=rtg(gear,Rt1,Rt2,Rt3,Rt4,Rt5);
            if gear == 1
                Rt = Rt1;
            elseif gear == 2
                Rt = Rt2;
            elseif gear == 3
                Rt = Rt3;
            elseif gear == 4
                Rt = Rt4;
```

```
            elseif gear == 5
                Rt = Rt5;
            end
        else
            break
        end
    end

time(i) = t;
v(i) = v(i-1)+aeff(i-1)*(deltat);
npt(i) = 1-(0.06+((Rt^1.5)/100));
NV(i) = 2660*Ra*Rt/rr;
N(i) = NV(i)*v(i)*3600/1000;
BP(i) = (BPa*(N(i)^3)+BPb*(N(i)^2)+BPc*N(i))/1000;
Pte(i) = BP(i)*npt(i);
wr(i) = 0.5*Af*Cd*rho*(v(i)^2);
Pwr(i) = wr(i)*v(i)/1000;
Prr(i) = RR*v(i)/1000;
Prl(i) = Pwr(i) + Prr(i);
me(i) = m*(1+0.04+0.0025*((Rt*Ra)^2));
a(i) = (Pte(i)-Prl(i))*1000/(me(i)*v(i));
if a(i) < amaxg
    aeff(i) = a(i);
else
    aeff(i) = amaxg;
end
bmep(i) = BP(i)*z/(Vd*(N(i)/60));
s(i) = s(i-1)+v(i-1)*deltat+0.5*aeff(i-1)*deltat^2;

    i=i+1;

end

%% Economia de combustível

fueleconomy = economiadecombustivel(Ra,rr,Rt1,Rt2,Rt3,Rt4,Rt5); %
miles/galão
fueleconomy = fueleconomy*1.609344/3.78541178; % km/l

%% Encontrando o tempo para o 0-100 km/h

v = 3.6*v;
j = 1;
while v(j)<100
    j = j + 1;
end
t100 = (j-1)/10;

%% Máxima Velocidade para o Veículo

maxvel = max(v);

%% OUTPUT %%

fitness = ((fueleconomy)*(1/t100)*(maxvel));
```

8.2 TESTE DE ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL

economiadecombustivel.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Teste de Economia de Combustível %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function fe = economiadecombustivel(Ra,rr,Rt1,Rt2,Rt3,Rt4,Rt5)

% Função que estima a quantidade de econmia de combustível
% em milhas por galão

%% Start

load('targetspeed.mat');
targetspeed=columnB;

gear = 1;
rhofuel = 760;
Rt = Rt1;
tfinal = 1369;
NV(1) = 2660*Ra*Rt/rr;
N(1) = NV(1)*targetspeed(1)*1.609;

%% BP(W) = BPa*N^3+BPb*N^2+BPc*N

BPa = -0.0000003;
BPb = 0.0024;
BPc = 12.461;
BP(1) = (BPa*(N(1)^3)+BPb*(N(1)^2)+BPc*N(1))/1000;
z = 2;
Vd = 1.9*0.001;

if BP(1) < 1
    BP(1) = 1;
else
    BP(1) = (BPa*(N(1)^3)+BPb*(N(1)^2)+BPc*N(1))/1000;
end

%% BMEP

if N(1) == 0
    BMEP(1) = 0;
else
    BMEP(1) = BP(1)*z/(Vd*(N(1)/60));
end

%% BSFC - Brake Specific Fuel Consumption (g/KWhr)

a = 1.826;
b = -0.001566;
c = 0.4592;
d = -0.002027;
e = 0.000001616;
f = -0.00006021;
g = 0.0000002761;
h = -0.0000000002217;
```

```
if
(a*(BMEP(1))+b*(BMEP(1)^2)+c*(N(1))+d*(N(1)*BMEP(1))+e*((BMEP(1)^2)*(N(1)))
+f*(N(1)^2)+g*(BMEP(1))*(N(1)^2)+h*(N(1)^2)*(BMEP(1)^2)) > 600
    BSFC(1) = 600;
else
    BSFC(1) =
(a*(BMEP(1))+b*(BMEP(1)^2)+c*(N(1))+d*(N(1)*BMEP(1))+e*((BMEP(1)^2)*(N(1)))
+f*(N(1)^2)+g*(BMEP(1))*(N(1)^2)+h*(N(1)^2)*(BMEP(1)^2));
end

%%
    dmf(1) = BSFC(1)*BP(1);
    mf(1) = 0;
    s(1) = 0;

%% Gerador

i=2;
deltat=1;

for t=1:deltat:tfinal

    if N(i-1)<1000
        gear = 1;
    elseif N(i-1)>3000
        gear = gear + 1;
    else
        gear = gear;
    end

    if gear <= 5
%         Rt = rtg(gear,Rt1,Rt2,Rt3,Rt4,Rt5);
        if gear == 1
            Rt = Rt1;
        elseif gear == 2
            Rt = Rt2;
        elseif gear == 3
            Rt = Rt3;
        elseif gear == 4
            Rt = Rt4;
        elseif gear == 5
            Rt = Rt5;
        elseif gear == 6
            display('Programa com erro!!')
        end
    else
        break
    end

    NV(i) = 2660*Ra*Rt/rr;
    N(i) = NV(i)*targetspeed(i)*1.609;
    BP(i) = (BPa*(N(i)^3)+BPb*(N(i)^2)+BPc*N(i))/1000;

    if BP(i) < 1
        BP(i) = 1;
    else
        BP(i) = (BPa*(N(i)^3)+BPb*(N(i)^2)+BPc*N(i))/1000;
    end
```

```
    if N(i) == 0
        BMEP(i) = 0;
    else
        BMEP(i) = BP(i)*z/(Vd*(N(i)/60));
    end


if(a*(BMEP(i))+b*(BMEP(i)^2)+c*(N(i))+d*(N(i)*BMEP(i))+e*((BMEP(i)^2)*(N(i)
))+f*(N(i)^2)+g*(BMEP(i))*(N(i)^2)+h*(N(i)^2)*(BMEP(i)^2)) < 0
        BSFC(i) = 0;
    elseif
(a*(BMEP(i))+b*(BMEP(i)^2)+c*(N(i))+d*(N(i)*BMEP(i))+e*((BMEP(i)^2)*(N(i)))
+f*(N(i)^2)+g*(BMEP(i))*(N(i)^2)+h*(N(i)^2)*(BMEP(i)^2)) < 600
        BSFC(i) =
(a*(BMEP(i))+b*(BMEP(i)^2)+c*(N(i))+d*(N(i)*BMEP(i))+e*((BMEP(i)^2)*(N(i)))
+f*(N(i)^2)+g*(BMEP(i))*(N(i)^2)+h*(N(i)^2)*(BMEP(i)^2));
    elseif
(a*(BMEP(i))+b*(BMEP(i)^2)+c*(N(i))+d*(N(i)*BMEP(i))+e*((BMEP(i)^2)*(N(i)))
+f*(N(i)^2)+g*(BMEP(i))*(N(i)^2)+h*(N(i)^2)*(BMEP(i)^2)) > 600
        BSFC(i) = 600;
    end

    dmf(i) = BSFC(i)*BP(i);
    mf(i) = dmf(i)/3600;
%     s(i) = s(i-1)+(targetspeed(i-1)*1.609*1000/(60*60))*deltat;

    i=i+1;

end

mftotal = sum(mf);
Vf = ((mftotal/1000)/rhofuel)*264.174;
fe = ((1.198767572222225e+04/1000)/1.609344)/Vf;

end
```

8.3 ALGORITMO GENÉTICO

AG.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Otimização Paramétrica de cadeia cinemática automotiva %%%
%%%   por meio de investigação das razões de transmissão   %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc; clear all;

nq = 20; % Número de indivíduos na população

%% x1 (Ra) "Axle ratio" - Razão de eixo traseiro
% x1i < x1 < x1f
x1i = 2.70; x1f = 4.30;

%% x2 (rr) "rolling radius" - Raio da Roda
% x2 = (280, 283, 286, ...)
```

```
x2 = [280; 283; 286; 287; 289; 292; 295; 296; 298; 299; 302; 305; 306; 308;
311; 312; 313; 315; 316; 317; 321; 322; 323; 324; 329; 330; 331; 345; 351;
356; 358; 359; 361; 365; 366; 369; 373; 376; 378; 379; 386; 392];
n2 = 42; % Número de variáveis de x2
x2i = 1; x2f = 42;

%% x3 »» x7 (Rt) "trasmission ratio" - Razões de Trasmissão
% x3i < x3 < x3f
x3i = 2.94; x3f = 4.36;
% x4i < x4 < x4f
x4i = 1.70; x4f = 2.94;
% x5i < x5 < x5f
x5i = 1.18; x5f = 1.70;
% x6i < x6 < x6f
x6i = 0.82; x6f = 1.18;
% x7i < x7 < x7f
x7i = 0.55; x7f = 0.82;

x=[x1i x1f; x2i x2f; x3i x3f; x4i x4f; x5i x5f; x6i x6f; x7i x7f];

%% Criação da matriz população inicial

bit = [8; 6; 8; 7; 6; 6; 5];
totalbits = bit(1)+bit(2)+bit(3)+bit(4)+bit(5)+bit(6)+bit(7);

C0 = randi([0 1], nq, totalbits);

for i = 1:nq

% Convertendo para a base decimal

for j = 2:7
    Cd0(1,1) = bin2dec(num2str(C0(i,1                    :sum(bit(1:1)))));
    Cd0(j,1) = bin2dec(num2str(C0(i,(sum(bit(1:j-1))+1):sum(bit(1:j
end

% Valores Reais dentro da região viável

for k = [1 3 4 5 6 7]
    X(i,k) = x(k,1)+(Cd0(k)*(x(k,2)-x(k,1)))/((2^bit(k)));
    X(i,2) = x2(int8(x(1,2)+(Cd0(2)*(x(2,2)-x(1,2)))/((2^bit(2)))));
end

% Função de Avaliação para a população inicial gerada
f(i,1) = aceleracao(X(i,1),X(i,2),X(i,3),X(i,4),X(i,5),X(i,6),X(i,7));

end

Obj_f = sum(f)

%% REPRODUÇÃO %%

% Probabilidades de acontecer Cf
ProbCf = f/sum(f);

% Probabilidades acumulativas
for i=1:nq
q(i) = sum(ProbCf(1:i));
```

```
end

% Vetor Randômico com valores entre 0 e 1
randRep=rand(nq,1);

% Seleção dos Cromossomos e Criação da nova população
for i=1:nq
    for j=1:1:nq
        if randRep(i)<q(j)
            CRep(i,:)=C0(j,:);
            break
        else
            CRep(i,:)=C0(i,:);
        end
    end
end

% Nova População

for i = 1:nq

% Convertendo para a base decimal

for j = 2:7
    CdRep(1,1) = bin2dec(num2str(CRep(i,1
:sum(bit(1:1)))));
    CdRep(j,1) = bin2dec(num2str(CRep(i,(sum(bit(1:j-
1))+1):sum(bit(1:j)))));
end

% Valores Reais dentro da região viável

for k = [1 3 4 5 6 7]
    X(i,k) = x(k,1)+(CdRep(k)*(x(k,2)-x(k,1)))/((2^bit(k)));
    X(i,2) = x2(int8(x(1,2)+(CdRep(2)*(x(2,2)-x(1,2)))/((2^bit(2)))));
end

% Função de Avaliação para a Reprodução
fRep(i,1) = aceleracao(X(i,1),X(i,2),X(i,3),X(i,4),X(i,5),X(i,6),X(i,7));

end

Obj_fRep = sum(fRep)

%% CRUZAMENTO %%

Pc = 0.60;      % Probabilidade de cruzamento
m = sum(bit(1:7));

nCruz = 1;
while mod(nCruz,2) ~= 0
    nCruz = 0;
    clear pos
    randCruz = rand(nq,1); % Gera Números Randômicos para o cruzamento
    for i = 1:nq
        if randCruz(i,1) <= Pc
            posCruz(nCruz+1,1) = i;
            nCruz=1+nCruz;
```

```
        end
    end
    if nCruz == 0 % Condição para voltar ao while
        nCruz = 1;
    end
end

% Posição de Cruzamento
k = round(1+rand*((m-1)-1));

% Cruzamento
for i = 1:nCruz
    Scr(i,:) = CRep(posCruz(i),:);
end
for i = 1:2:nCruz
    ScFr(i,:) = [Scr(i,1:k) Scr(i+1,k+1:m)];
    ScFr(i+1,:) = [Scr(i+1,1:k) Scr(i,k+1:m)];
end
for i = 1:nq
    CCruz(i,:) = CRep(i,:);
end
for i = 1:nCruz
    CCruz(posCruz(i),:) = ScFr(i,:);
end

for i = 1:nq

% Convertendo para a base decimal

for j = 2:7
    CdCruz(1,1) = bin2dec(num2str(CCruz(i,1
:sum(bit(1:1)))));
    CdCruz(j,1) = bin2dec(num2str(CCruz(i,(sum(bit(1:j-
1))+1):sum(bit(1:j)))));
end

% Valores Reais dentro da região viável

for k = [1 3 4 5 6 7]
    X(i,k) = x(k,1)+(CdCruz(k)*(x(k,2)-x(k,1)))/((2^bit(k)));
    X(i,2) = x2(int8(x(1,2)+(CdCruz(2)*(x(2,2)-x(1,2)))/((2^bit(2)))));
end

% Função de Avaliação para o Cruzamento
fCruz(i,1) = aceleracao(X(i,1),X(i,2),X(i,3),X(i,4),X(i,5),X(i,6),X(i,7));

end

Obj_fCruz = sum(fCruz)

%% MUTAÇÂO %%

Pm = 0.05;  % Probabilidade de ocorrer a mutação
E = m*nq;
randMut=rand(E,1);

nMut=0;
for i = 1:E
```

```
    if randMut(i,1) <= Pm
        posMut(nMut+1,1) = i;
        nMut=nMut+1;
    end
end

CMut = CCruz;

j=1;
for i = 1:E
    if j <= nMut
        if i == posMut(j)
            for k = 1:m:(m*nq+1)
                if posMut(j) >= k && posMut(j) < k+1
                    posCMut=1;
                    if CMut(posCMut,1) == 0
                        CMut(posCMut,1) = 1;
                    else
                        CMut(posCMut,1) = 0;
                    end
                end
            end
            j = j+1;
        end
    else
        break
    end
end

for i = 1:nq
% Convertendo para a base decimal

for j = 2:7
    CdMut(1,1) = bin2dec(num2str(CMut(i,1
:sum(bit(1:1)))));
    CdMut(j,1) = bin2dec(num2str(CMut(i,(sum(bit(1:j-
1))+1):sum(bit(1:j)))));
end

% Valores Reais dentro da região viável

for k = [1 3 4 5 6 7]
    X(i,k) = x(k,1)+(CdMut(k)*(x(k,2)-x(k,1)))/((2^bit(k)));
    X(i,2) = x2(int8(x(1,2)+(CdMut(2)*(x(2,2)-x(1,2)))/((2^bit(2)))));
end

% Função de Avaliação para a Mutação
fMut(i,1) = aceleracao(X(i,1),X(i,2),X(i,3),X(i,4),X(i,5),X(i,6),X(i,7));

end

Obj_fMut = sum(fMut)
```