

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UMA TRANSMISSÃO
CONTINUAMENTE VARIÁVEL PARA VEÍCULO BAJA SAE

Matheus Ribeiro Rodrigues

Professor orientador: Dr. Flávio Celso Trigo

Professora Coorientadora: Dr^a Linda Lee Ho

São Paulo

2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UMA TRANSMISSÃO
CONTINUAMENTE VARIÁVEL PARA VEÍCULO BAJA SAE

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia

Matheus Ribeiro Rodrigues

Professor orientador: Dr. Flávio Celso Trigo

Professora Coorientadora: Dr^a Linda Lee Ho

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Rodrigues, Matheus Ribeiro

Estudo teórico e experimental de uma transmissão continuamente variável para veículo Baja Sae / M.R. Rodrigues. – São Paulo, 2011.

p.81

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.CVT 2.Conforto veicular 3.Combustíveis (Economia) 4.Veículos de competição I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

O crescente mercado das transmissões continuamente variáveis (CVT - *Continuously Variable Transmission*) exige que suas características de operação sejam plenamente conhecidas e constantemente ajustadas. Suas qualidades intrínsecas permitem aos veículos que as possuem maior desempenho, economia de combustível e menor emissão de poluentes, quando comparados aos equipados com câmbios manuais e automáticos tradicionais. Neste trabalho, analisa-se a transmissão continuamente variável (TCV) de polias expansivas (ou de diâmetro variável), que utiliza uma correia de borracha como elemento encarregado da transmissão de torque. A referida transmissão é semelhante à atualmente utilizada pela Equipe Poli de Baja em seu protótipo monoposto fora-de-estrada que participa de competições universitárias organizadas pela SAE-Brasil (*Society of Automotive Engineers*). A análise da TCV visa melhorar o desempenho do veículo Baja e foi efetuada de acordo com duas abordagens: uma experimental e outra teórica. A vertente experimental, dada a quantidade de parâmetros que poderiam influenciar nos resultados, exigiu a aplicação de uma técnica denominada delineamento de experimentos (*Design of Experiments* - DOE), cuja ideia central é otimizar os testes em termos de combinações de parâmetros, de modo a determinar a melhor configuração de montagem da TCV que atenda às necessidades do veículo. Paralelamente à realização dos experimentos, com o objetivo de obter a curva característica da TCV (relação de transmissão em função do tempo), efetuou-se a modelagem teórica da dinâmica de sua polia motora, primeiro elemento na cadeia de transmissão, e cujo conhecimento servirá como base para futuros trabalhos de modelagem teórica dos elementos subsequentes, quais sejam, a polia movida e o estágio fixo de redução, sempre com o intuito de melhorar o desempenho do veículo.

ABSTRACT

The increasing Continuously Variable Transmission (CVT) market demands that its characteristics of performance are fully known and constantly improved. Vehicles equipped with CVTs present higher performance, fuel economy and lower emissions than those assembled with conventional manual and automatic transmissions. In this work, a variable-diameter pulley CVT which uses a rubber V-belt as torque transmitting element is analyzed. This component is similar to the one currently used by “Equipe Poli de Baja”, a team that designs and builds a single seater off-road vehicle to compete in an intercollegiate competition organized by SAE (Society of Automotive Engineers). The current study aims at improving the performance of the Baja prototype and was conducted according to two approaches: Experimental and theoretical. The experimental results depend on several parameters of the CVT as well as on combinations among them and with other components/systems of the powertrain. This way, in order to optimize the parameters selection and the testing conditions, a Design of Experiments (DOE) was performed. At the same time, a theoretical model of the dynamics of the driving pulley was developed, with the purpose of determining the CVT characteristic curve (CVT ratio as a function of time). Since the driving pulley is the first component of the driving train, the knowledge of its dynamics could help in future attempts to modeling the whole powertrain.

Aos meus pais e irmão pelo apoio ao longo da minha vida.

À Luciana pelo carinho, compreensão e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu caro Professor Dr. Flávio Celso Trigo pela orientação, incentivo e contribuição com sugestões fundamentais para a solução dos problemas encontrados na elaboração do trabalho.

À Professora Dr.^a Linda Lee Ho, do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e à Professora Dr.^a Carla Almeida Vivacqua, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela orientação com o método de Delineamento de Experimentos.

Aos amigos da Equipe Poli de Baja pelo incentivo e dedicação na elaboração dos testes realizados ao longo do trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	7
2. DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS APLICADO À TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL DE VEÍCULO BAJA SAE	8
2.1. Introdução	8
2.1.1. Conceitos gerais de experimentação	9
2.1.2. Processo para conduzir experimentos	11
2.1.3. Técnicas de planejamento e análise de experimentos	12
2.1.3.1. Planejamento fatorial	12
2.1.3.2. Planejamento fatorial 2^k	13
2.1.3.3. Planejamento fatorial fracionado 2^{k-p}	17
2.2. Realização do experimento	20
2.2.1. Objetivos do experimento	20
2.2.2. Parâmetros do experimento.....	21
2.2.3. Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta.....	25
2.2.4. Seleção da matriz experimental	26
2.2.5. Realização do experimento	27
2.2.6. Análise de dados	28
2.2.7. Interpretação dos resultados	42
3. MODELAGEM DA TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL (TCV).....	43

3.1. Funcionamento da TCV	43
3.2. Modelagem da polia motora.....	45
3.2.1. Introdução	45
3.2.2. Cálculo da função Lagrangeana	49
3.2.3. Cálculo da força generalizada	53
3.2.4. Equação diferencial de movimento do sistema.....	57
4. OBTENÇÃO DA CURVA DE RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO DA TCV...	60
4.1. Métodos de obtenção da curva	60
4.1.1. Ensaio do trem de força em bancada.....	60
4.1.2. Ensaio do veículo com sensores embarcados.....	62
4.2. Escolha do método de obtenção da curva da relação de transmissão da TCV	63
4.3. Aparato experimental	64
4.3.1. Sensor de rotação da polia motora	64
4.3.2. Sensor de rotação da polia movida.....	65
4.3.3. Sistema de aquisição de Dados (<i>Datalogger</i>)	68
4.4. Metodologia do teste	70
4.4.1. Localização do teste	70
4.4.2. Procedimento de teste	71
4.5. Realização dos testes e resultados	72
5. CONCLUSÃO	78
5.1. Delineamento de Experimentos aplicado à TCV de um veículo Baja SAE	
Modelagem da TCV	78
5.2. Modelagem da TCV	78
5.3. Obtenção da curva da relação de transmissão da TCV	79
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Matriz de planejamento para experimento fatorial de dois fatores de controle [Montgomery, 2004]	13
Tabela 2.2 - Matriz de planejamento para o experimento fatorial 2^3 [Montgomery, 2004]	14
Tabela 2.3 - Experimento fatorial 2^3 [Montgomery, 2004].....	18
Tabela 2.4 - Fatores de controle e níveis de ajuste	25
Tabela 2.5 - Matriz experimental	27
Tabela 2.6 - Dados experimentais	28
Tabela 2.7 - Níveis ideais para otimizar aceleração.....	33
Tabela 2.8 - Níveis ideais para otimizar velocidade final.....	36
Tabela 2.9 - Níveis ideais para otimizar a variância da aceleração	39
Tabela 2.10 - Níveis ideais para otimizar a variância da velocidade final.....	42
Tabela 2.11 - Configurações ótimas para a aceleração e a velocidade final.....	42
Tabela 4.1 - Pesagem dos critérios.....	63
Tabela 4.2 - Matriz de decisão	64
Tabela 4.3 - Configuração do trem de força do veículo Poli Titan.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tipos de transmissões veiculares. a) Transmissão mecânica sincronizada; b) Transmissão semiautomática: conversor de torque, embreagem de troca de marcha, engrenagens sincronizadas; c) Transmissão totalmente automática convencional; d) Transmissão automaticamente variável de polias expansivas (diâmetros variáveis). [Lechner; Naunheimer; Bertsche, 2007]	2
Figura 1.2 - Modelo DAF 33 e a sua transmissão por TCV	3
Figura 1.3 - Nova TCV da Nissan-Jatco. Fonte: <i>Nissan Motor Company</i>	4
Figura 1.4 - Transmissão Multitronic da Audi. Fonte: Audi AG.....	5
Figura 1.5 - Fluxograma do cálculo da relação de transmissão do estágio fixo	6
Figura 2.1 - Gráfico de efeitos principais para experimento fatorial 2^k [Galdámez, 2002]	15
Figura 2.2 - Gráficos de efeitos de interação [Galdámez, 2002]	16
Figura 2.3 - Experimento realizado simulando as provas de aceleração e velocidade	21
Figura 2.4 - Camo de 32°	21
Figura 2.5 - Polia movida em aço (esq.) e em alumínio (dir.)	22
Figura 2.6 – Componentes da polia movida da TCV.....	22
Figura 2.7 - Configurações da chapa corta-fogo	23
Figura 2.8 - Tampa da polia motora.....	24
Figura 2.9 - Algumas opções de massas disponíveis	24
Figura 2.10 - Molas torcionais: verde e amarela.....	25
Figura 2.11 - Gráfico seminormal da aceleração: grupo 2.....	30
Figura 2.12 - Gráfico seminormal da aceleração: grupo 3.....	30
Figura 2.13 - Gráfico seminormal da aceleração: grupo 4.....	31
Figura 2.14 - Efeitos principais da aceleração	32
Figura 2.15 - Efeitos de interação da aceleração.....	32
Figura 2.16 - Gráfico seminormal da velocidade: grupo 2	33
Figura 2.17 - Gráfico seminormal da velocidade: grupo 3	34
Figura 2.18 - Gráfico seminormal da velocidade: grupo 4	34
Figura 2.19 - Efeitos principais para a velocidade final.....	35

Figura 2.20 - Efeitos de interação para a velocidade final	35
Figura 2.21 - Gráfico seminormal da variância da aceleração: grupo 2	36
Figura 2.22 - Gráfico seminormal da variância da aceleração: grupo 3	37
Figura 2.23 - Gráfico seminormal da variância da aceleração: grupo 4	37
Figura 2.24 - Efeitos principais para a variância da aceleração	38
Figura 2.25 - Efeitos de interação da variância da aceleração	38
Figura 2.26 - Gráfico seminormal da variância da velocidade final: grupo 2.....	39
Figura 2.27 - Gráfico seminormal da variância da velocidade final: grupo 3.....	40
Figura 2.28 - Gráfico seminormal da variância da velocidade final: grupo 4.....	40
Figura 2.29 - Efeitos principais da variância da velocidade final	41
Figura 2.30 - Efeitos de interação da variância da velocidade final	41
Figura 3.1 - Modelo ilustrativo dos componentes do veículo Baja SAE [Albuquerque, 2003]	43
Figura 3.2 - Funcionamento da TCV	44
Figura 3.3 – Configuração de máximo torque (maior relação de transmissão) [Comet Industries].....	45
Figura 3.4 - Configuração de máxima velocidade (menor relação de transmissão) [Comet Industries].....	45
Figura 3.5 - Polia motora da TCV	46
Figura 3.6 - Vista superior da polia motora da TCV	46
Figura 3.7 – Posições de componentes da polia motora da TCV [Allen, 2003]	47
Figura 3.8 - Sistemas de coordenadas utilizado para elaboração das equações de Lagrange.....	48
Figura 3.9 - Força normal aplicada no rolete e força normal de compressão da correia	53
Figura 3.10 - Forças atuando na polia	54
Figura 3.11 - Curva de torque do motor.....	55
Figura 3.12 - Curva de potência do motor	56
Figura 3.13 - Relação entre deslocamento axial do disco móvel e a diferença do raio da polia motora`	58
Figura 4.1 - Bancada de teste para obtenção da curva da TCV [Martinez et al., 2010]	61

Figura 4.2 - Prova de aceleração e velocidade	62
Figura 4.3 – Instalação do sensor indutivo.....	65
Figura 4.4 - Sensor de efeito Hall	66
Figura 4.5 - Configuração final da roda dentada.....	67
Figura 4.6 - Montagem do sensor de efeito Hall e roda dentada ao eixo de saída da caixa de redução.....	68
Figura 4.7 - Espaçamento entre o sensor de efeito Hall e o alvo	68
Figura 4.8 - Sistema de aquisição de dados DL1. Fonte: <i>Race Technology</i>	69
Figura 4.10 – Local da realização do teste	70
Figura 4.11 - Montagem do sensor de efeito Hall.....	73
Figura 4.12 - Detalhe de montagem do sensor de efeito Hall.....	73
Figura 4.13 - Veículo realizando o teste	74
Figura 4.14 - Curva característica da TCV	74
Figura 4.15 - Curva característica da TCV filtrada.....	75
Figura 4.16 - Gráfico da relação de transmissão da TCV em função da rotação da polia movida.....	76
Figura 4.17 - Gráfico filtrado da relação de transmissão da TCV em função da rotação da polia movida	76
Figura 4.18 - Gráfico da rotação do motor em função da velocidade do veículo	77

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Introdução

Veículos motorizados necessitam de algum tipo de equipamento capaz de efetuar a conversão da energia disponibilizada pelo motor de forma a permitir sua utilização da maneira mais eficiente na movimentação do veículo. Por utilização eficiente entende-se o atendimento às demandas da dinâmica de operação do veículo em relação ao terreno (superfície, inclinação) e a fatores aleatórios, como resistência do fluido que o envolve, por exemplo.

O principal objetivo no desenvolvimento de uma transmissão para um veículo de uso terrestre é converter a potência fornecida pelo motor em tração do veículo da maneira mais eficiente possível durante a maior faixa de velocidades. Esse objetivo deve ser cumprido assegurando um bom comprometimento entre o número de marchas, desempenho em subida, aceleração e consumo de combustível do veículo. (Lechner; Naunheimer; Bertsche, 2007).

Atualmente o desenvolvimento de transmissões automotivas tem focado a melhoria na vida útil e rendimento da transmissão, redução de massa e de ruído e melhorias na facilidade de uso. As transmissões são normalmente classificadas em quatro grupos principais (Figura 1.1):

- Transmissão mecânica escalonada de z-velocidades;
- Transmissão semiautomática ou totalmente automática escalonada de z-velocidades;
- Transmissão hidráulica automática;
- Transmissão continuamente variável (mecânica, hidrodinâmica, hidrostática ou elétrica).

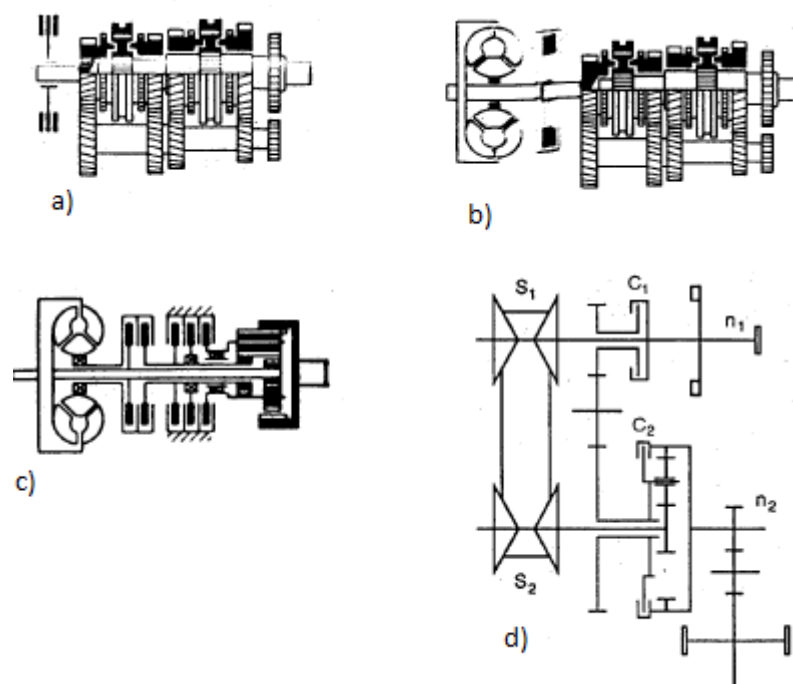


Figura 1.1 - Tipos de transmissões veiculares. a) Transmissão mecânica sincronizada; b) Transmissão semiautomática: conversor de torque, embreagem de troca de marcha, engrenagens sincronizadas; c) Transmissão totalmente automática convencional; d) Transmissão automaticamente variável de polias expansivas (diâmetros variáveis). [Lechner; Naunheimer; Bertsche, 2007]

O escopo deste trabalho limitar-se-á apenas às transmissões continuamente variáveis.

Uma Transmissão Continuamente Variável (TCV) é um dispositivo de transmissão de potência, no qual a relação de transmissão é mudada de maneira contínua. Uma TCV, diferentemente das transmissões escalonadas, transmite potência sem descontinuidades, de forma a evitar mudanças abruptas no torque e na velocidade de saída e é especialmente útil onde certo número fixo de relações de transmissão não é adequado para realizar a função desejada. Isso é justificado pelo fato de a transmissão continuamente variável fornecer uma variação contínua de relações de transmissão entre seus valores máximo e mínimo. Não apenas o câmbio analisado permite uma movimentação mais suave do automóvel, proporcionando maior conforto ao operador, mas também, por ser mais compacto, caracteriza-se por ser mais leve e por ocupar menor espaço no compartimento do motor.

As TCVs vêm ganhando mercado e têm sido muito empregadas principalmente no setor automobilístico, para reduzir o consumo de combustível, diminuir a emissão de poluentes no ar e também para maximizar a dirigibilidade e o conforto. A tecnologia de TCV mais utilizada atualmente é o sistema de polias expansivas ou de diâmetros variáveis, no qual a transmissão entre uma polia e outra é realizada por uma correia. A tecnologia de polias expansivas, porém, tem capacidade de torque limitada e, por consequência, é utilizada em aplicações onde o torque se situa abaixo de cerca de 250 *N.m*. Esse limite de torque pode ser excedido caso a tecnologia utilizada seja a TCV toroidal, mais conhecida como transmissão infinitamente variável (*Infinitely Variable Transmission – IVT*), uma vez que ela é capaz de transmitir torques mais altos.

Segundo a *Automotive World* em sua publicação *The light vehicle transmission report*, a DAF (*Doorne Aanhangwagen Fabriek*), foi a primeira empresa a comercializar veículos equipados com TCV's de polias expansivas utilizando uma correia de borracha como elemento transmissor de torque, o DAF 600 em 1958. A Figura 1.2 ilustra a transmissão por TCV aplicada no modelo DAF 33.

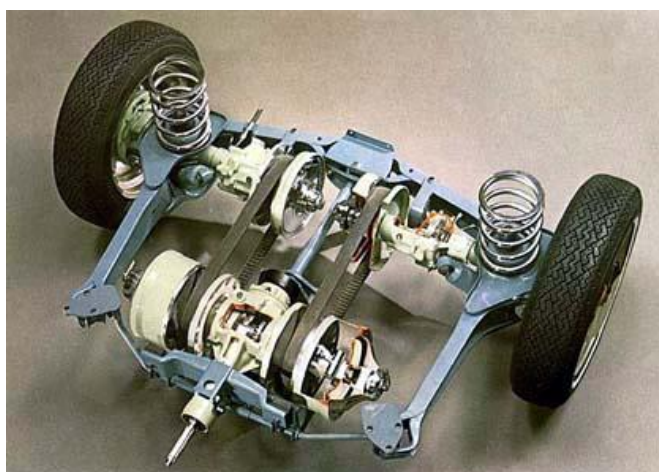


Figura 1.2 - Modelo DAF 33 e a sua transmissão por TCV

Em veículos de passeio, as transmissões continuamente variáveis de polias expansivas utilizam correias de aço como elemento transmissor do torque e, por essa razão, possuem a capacidade de fornecer maior torque e menor manutenção. Uma desvantagem dessa correia é o seu alto custo, justificado pelo fato de ser fabricada em ligas de aço específicas e também de necessitarem boa precisão. Mesmo assim, a

TCV apresenta vantagens quando comparada ao sistema automático composto por engrenagens planetárias, como por exemplo, a maior eficiência e a menor massa.

Quanto ao mercado desse tipo de transmissão, destacam-se algumas montadoras como, por exemplo, a Subaru, que utiliza uma TCV nomeada *Lineartronic*, montada longitudinalmente e acionada por corrente e a Nissan, que em parceria com a Jatco lançou uma nova geração de TCVs compactas e leves, que combinam uma TCV acionada por correia e uma caixa de engrenagens, Figura 1.3



Figura 1.3 - Nova TCV da Nissan-Jatco. Fonte: Nissan Motor Company

No Japão, onde grande parte dos veículos é de pequeno porte, as transmissões continuamente variáveis são muito populares. Pela mesma razão esse tipo de transmissão vem ganhando mercado rapidamente na China.

Já na América do Norte o mercado para veículos de pequeno porte é muito menor, porém como a capacidade de torque das TCVs tem aumentado, é esperado que essas transmissões apresentem maior penetração no mercado.

Na Europa, onde os motoristas estão mais acostumados à transmissão manual e, portanto, ao aumento da rotação do motor de maneira rápida, a TCV fornece a sensação de falta de potência, dado que a rotação do motor permanece relativamente constante. Para atender esse mercado a empresa Ricardo desenvolveu um software para o veículo BMW Mini CVT que introduziu o conceito de *stepped shifts*, de modo que a TCV opera como uma marcha convencional, uma vez que algumas de suas

relações de transmissões foram previamente selecionadas e programadas no software de maneira que quando o motorista aciona a alavanca de câmbio a troca de marcha é efetuada, ou seja, as polias se ajustam à nova relação de transmissão automaticamente. Outro exemplo de montadora europeia que utiliza a TCV é a Audi, que utilizou no modelo A6 de 2.8 litros de 1999 a transmissão nomeada *Multitronic*, a qual era capaz de transmitir torques de até 280 N.m, Figura 1.4.

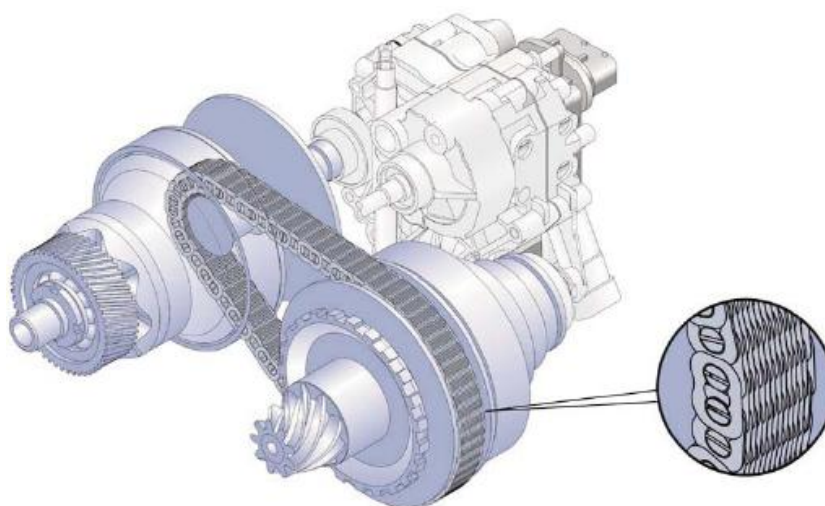


Figura 1.4 - Transmissão Multitronic da Audi. Fonte: Audi AG

No Brasil alguns veículos são e já foram comercializados com esse tipo de transmissão, como por exemplo o Nissan Sentra, a Mercedes Classes A e B e o Honda Fit.

Segundo Trzesniowski (2010), a utilização de transmissões continuamente variáveis em carros de corrida é polêmica. Uma vez que quando em operação de troca de marchas, ou seja, quando a TCV está operando entre os seus limites superior e inferior de relações de transmissão, a rotação do motor permanece praticamente constante e o piloto tem a sensação que o pedal do acelerador está travado. Segundo o mesmo autor testes em veículos de fórmula F3 utilizando a TCV Variometric, citada anteriormente, foram realizados nos anos 1960. O veículo testado apresentou bons resultados em pista estreita e molhada, porém também apresentou perda de potência em retas.

Já no contexto da competição Baja SAE, a transmissão continuamente variável de polias expansivas é largamente utilizada, uma vez que é uma transmissão

leve e de fácil instalação e manutenção. Essa transmissão também apresenta vantagens se comparada a uma transmissão escalonada manual, como por exemplo, a não necessidade de atenção do piloto para a realização da troca de marchas, além de não ser necessário acionar uma embreagem, proporcionando maior conforto e capacidade de dirigibilidade ao piloto.

A correta modelagem e os posteriores testes que determinarão a curva característica dessa transmissão continuamente variável são muito importantes para o projeto do veículo, já que o cálculo da relação de transmissão do estágio fixo depende dessas informações, conforme ilustra o fluxograma na Figura 1.5.

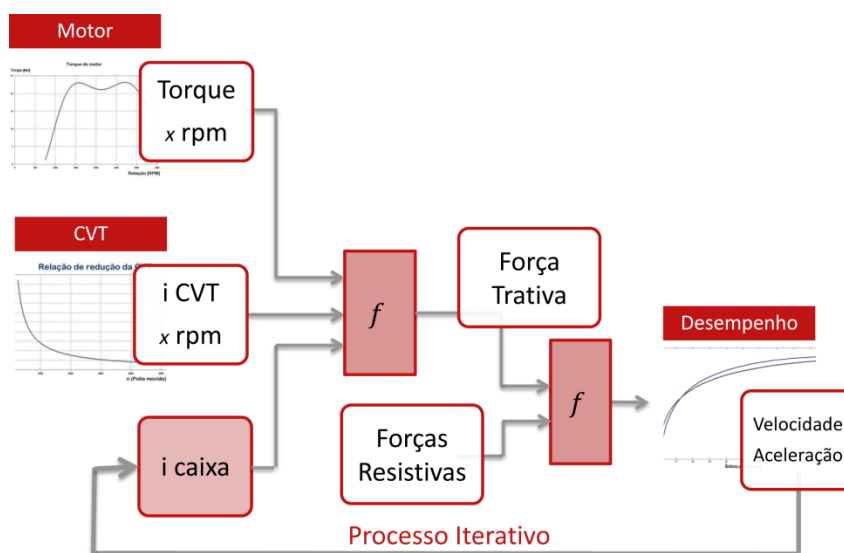


Figura 1.5 - Fluxograma do cálculo da relação de transmissão do estágio fixo

A partir da curva de torque do motor, obtida através de ensaios em dinamômetro, da curva característica da TCV e de uma relação de transmissão inicial para a caixa de engrenagens de estágio fixo a força trativa do veículo é calculada. Já a partir de parâmetros como o coeficiente de resistência ao rolamento e o coeficiente de arrasto são calculadas as forças resistivas. Deste modo são geradas curvas de desempenho do veículo relacionando velocidade, espaço e tempo percorridos. A partir da análise dessas curvas novas relações de transmissão são propostas até que um valor considerado ótimo é obtido.

Caso a curva característica da transmissão continuamente variável obtida através de testes não represente o comportamento real da mesma, o projeto da transmissão do veículo estará comprometido, dado que os dados de entrada desse projeto não são condizentes com a realidade do veículo e desta maneira a relação de transmissão do estágio fixo não será ótima.

1.2. Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são divididos em dois:

1. Determinação da configuração da TCV que maximize o desempenho longitudinal do veículo Baja no contexto da Competição Baja SAE.
2. Obtenção da curva característica da TCV (relação de transmissão da TCV em função do tempo), a qual será utilizada no projeto do próximo veículo da Equipe Poli de Baja. Essa obtenção pode ser dividida em duas vertentes: uma teórica e outra experimental.

2. DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS APLICADO À TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL DE VEÍCULO BAJA SAE

2.1. Introdução

Os conceitos estatísticos possuem atualmente um papel muito importante nas empresas. Segundo Chew¹ (1957 apud Galdámez, E. 2002 p. 2), estatística é a arte de adquirir conhecimento através da coleta, análise e interpretação de informações. Nas empresas essa ciência é transformada em ferramentas de qualidade (Seis Sigma, Delineamento de Experimentos – *Design of Experiments*, Reprodutividade & Repetibilidade – R&R, entre outras), contribuindo na melhoria contínua dos produtos ou processos de fabricação.

O delineamento de experimentos é muito utilizado nas empresas e apresenta-se como uma das formas para se alcançar as características de competitividade ou os fatores críticos citados pela ASQ (*American Society for Quality*) (inovação, flexibilidade e velocidade), além de atender às necessidades e às expectativas dos consumidores (Montgomery, 2004).

O delineamento de experimentos pode ser definido como um teste no qual se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos que cada entrada apresenta nas respostas ou variáveis de saída do experimento.

Montgomery (2004) ainda discorre que as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas para, de maneira geral, melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos.

¹ CHEW, V. **Experimental designs in industry**. John Wiley & Sons Inc. New York, 1957.

As técnicas de delineamento podem ser utilizadas em determinadas etapas, quais sejam: no decorrer da fase de projeto preliminar; durante o projeto de produto; no correr do processo de fabricação; bem como na etapa de avaliação e melhoria. Conforme observado, pondera-se que é necessário analisar a influência dos fatores de controle. Desta forma, quando o estudo apontar que apenas o efeito de um fator seja avaliado nas respostas, recomenda-se utilizar a técnica de delineamento de experimentos em blocos aleatorizados. Todavia, no caso de a investigação do efeito provocado por dois ou mais fatores sendo que, cada um deles com dois ou mais níveis de ajuste, indica-se o manejo de técnicas clássicas de planejamento, a saber: delineamento de experimentos fatorial completo, fatorial fracionado ou experimentos com pontos centrais

2.1.1. Conceitos gerais de experimentação

A seguir serão apresentados alguns conceitos e termos fundamentais para a aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos.

As **variáveis de resposta** são variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, a partir de estímulos introduzidos de maneira proposital nos fatores que regulam ou ajustam os processos de fabricação. Em um dado experimento, podem existir uma ou mais variáveis de resposta (y) importantes de se avaliar.

Os **fatores de controle** são aqueles alterados deliberadamente no delineamento de experimentos. A introdução de estímulos nos fatores de controle tem como objetivo avaliar os efeitos produzidos nas variáveis de resposta do experimento, e, com isso, determinar os principais fatores do processo. Nos experimentos os fatores de controle podem ser representados por números arábicos (1, 2, 3...) ou por letras (A, B, C...).

Já os **fatores de ruído** são aqueles (conhecidos ou não) que influenciam nas variáveis de resposta do experimento, porém não são controláveis. Cuidados devem ser tomados durante a realização dos testes, pois é importante evitar que os efeitos produzidos pelos fatores de controle fiquem misturados ou mascarados com os efeitos provocados pelos fatores de ruído.

Os **níveis dos fatores**, por sua vez, são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Eles são identificados por nível baixo (-1) e nível alto (+1).

Tratamento é uma combinação dos níveis dos fatores de controle, ou seja, cada uma das corridas do experimento representará um tratamento.

O **efeito principal** é, por definição, a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado.

Já o **efeito de interação** é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator.

O plano elaborado para conduzir os experimentos, o qual deve incluir os fatores de controle, os níveis desses fatores e, portanto, os tratamentos do experimento, é denominado **matriz de experimentos**.

A **aleatorização** é definida como o processo de definição da ordem dos tratamentos da matriz experimental. Pode ser definida através de sorteios ou por limitações específicas dos testes. A aleatorização deve ser realizada de maneira a balancear os efeitos produzidos por fatores não controláveis nas respostas analisadas e para atender aos requisitos intrínsecos dos métodos estatísticos, os quais exigem que os componentes do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes.

O processo de repetir cada uma das combinações da matriz experimental sob as mesmas condições de experimento é denominado **repetição**. Este conceito, segundo Montgomery (2004), permite encontrar uma estimativa do erro experimental; parâmetro utilizado para determinar se as diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas.

A técnica da separação por **blocos** é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não controláveis) do experimento. Com o objetivo de criar um experimento mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas analisadas, tal técnica é utilizada.

2.1.2. Processo para conduzir experimentos

É muito importante estabelecer o planejamento dos testes antes de iniciar a experimentação. Isso porque durante o experimento o processo deve ser cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com os planos, visto que erros no procedimento experimental invalidarão os resultados. Para coordenar as atividades do procedimento experimental, faz-se necessária a utilização de um plano estratégico, apresentado a seguir: (Galdámez, E. 2002)

- 1- **Definição dos objetivos do experimento:** os objetivos do experimento são definidos, assim como as pessoas responsáveis pela sua realização.
- 2- **Parâmetros do experimento:** nesta etapa é realizada a coleta de informações técnicas do produto ou processo a ser analisado. Também devem relacionar todos os fatores de controle, fatores de ruído, os níveis dos fatores e as variáveis de resposta julgados relevantes para a realização do experimento.
- 3- **Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta:** nessa fase os fatores de controle, as faixas de variação dos níveis de ajuste desses fatores e as respostas do experimento, assim como o método de medição dos fatores, devem ser selecionados, de maneira que apenas os mais relevantes, dentre aqueles listados na etapa Parâmetros do experimento, devem ser considerados.
- 4- **Seleção da matriz experimental:** para a construção da matriz experimental, devem ser considerados o número de fatores de controle, o número de níveis e os fatores não controláveis do processo. Ainda nessa fase são definidos: as sequências das corridas, o número de réplicas, as restrições do experimento e as possíveis interações que possam vir a ocorrer entre os fatores avaliados.
- 5- **Realização do experimento:** durante essa etapa todos os procedimentos devem ser executados conforme o plano. Qualquer mudança no momento em que os experimentos são realizados deve ser registrada (datas, alteração na sequência de corridas, etc.).
- 6- **Análise de dados:** *softwares* estatísticos (MINITAB, EXCEL, STATISTICA, R), que ajudam a usar o delineamento de experimentos, os gráficos lineares e os gráficos de probabilidade normal podem ser utilizados nessa etapa. Os conceitos estatísticos são aplicados nos resultados de um experimento,

descrevendo o comportamento das variáveis de controle, a relação entre elas e estimando os efeitos produzidos nas respostas observadas.

7- Interpretação dos resultados: após a análise dos resultados, as pessoas responsáveis pelo plano de atividades, devem extrair as conclusões práticas dos resultados.

8- Elaboração de relatórios: o trabalho realizado deve ser descrito, identificando-se limitações práticas e teóricas encontradas, recomendações para futuros experimentos e conclusões obtidas. Esta etapa é importante, pois demonstra que estudo desenvolvido é um processo contínuo de aprendizado.

2.1.3. Técnicas de planejamento e análise de experimentos

Antes da construção da matriz experimental, etapa nº4 do processo para conduzir experimentos, é necessário definir qual técnica de planejamento e análise de experimentos será utilizada. Diversas são as técnicas de planejamento e análise de experimentos e algumas dessas técnicas serão explicadas sucintamente a seguir.

2.1.3.1. Planejamento fatorial

Button² (apud Galdámez, E. 2002 p.19), explica que o planejamento fatorial é indicado para a fase inicial do procedimento experimental quando há necessidade de se definir quais os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável de resposta escolhida. É um modelo de efeitos fixos, ou seja, a análise dos efeitos provocados pelos fatores não pode ser transferida para outros níveis que não os analisados no planejamento.

Essa técnica será explicada através de um exemplo. Considere um experimento com dois fatores (A e B), em que o fator A possui a níveis e o fator B possui b níveis. Portanto, nesse experimento existem ab combinações de teste. A Tabela 2.1 apresenta a matriz de planejamento para o experimento fatorial de dois fatores de controle, nos níveis a e b . Suponha-se que sejam necessárias n repetições. Deste modo, é importante ressaltar que as abn observações do experimento devem ser realizadas aleatoriamente.

² BUTTON, S.T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado**. São Paulo, Universidade Estadual de Campinas. Apostila.

Tabela 2.1 - Matriz de planejamento para experimento fatorial de dois fatores de controle [Montgomery, 2004]

	Níveis	Fator B			
		1	2		b
Fator A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$		$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$		$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	:	:	:	:	:
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$		$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

Segundo Montgomery (2004), com o experimento organizado dessa forma é possível verificar se:

- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator A;
- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator B;
- a interação dos fatores (coluna x linha) altera significativamente a resposta.

2.1.3.2. Planejamento fatorial 2^k

Um experimento fatorial com k fatores, cada um deles com dois (2) níveis, é denominado experimento fatorial 2^k . Essa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para em seguida determinar e interpretar os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e assim, poder identificar as melhores condições experimentais.

O exemplo a seguir demonstra como deve ser realizado o planejamento fatorial 2^k . Considere um experimento com três fatores (x_1, x_2 e x_3), cada um testado com dois níveis (-1 e $+1$). Deste modo a matriz de planejamento para o experimento fatorial 2^3 é representada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Matriz de planejamento para o experimento fatorial 2^3 [Montgomery, 2004]

N Teste	Fatores de controle			Ordem do Teste	Resposta (y_i)
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	-1	6	y_1
2	+1	-1	-1	8	y_2
3	-1	+1	-1	1	y_3
4	+1	+1	-1	2	y_4
5	-1	-1	+1	5	y_5
6	+1	-1	+1	3	y_6
7	-1	+1	+1	4	y_7
8	+1	+1	+1	7	y_8

Na matriz de planejamento as linhas representam os diferentes níveis ou as combinações dos fatores (níveis codificados: -1 (mínimo) e +1 (máximo)) e as colunas representam o conjunto de fatores investigados ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$). Abaixo será mostrada a ordem padrão de organização do experimento em questão.

1. Para x_1 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, +1, -1, +1, ..., ou seja, o sinal dessa coluna se altera em grupos de $2^0 = 1$.
2. Para x_2 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, +1, +1, ..., ou seja, o sinal dessa coluna se altera em grupos de $2^1 = 2$.
3. Para x_1 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, ..., ou seja, o sinal dessa coluna se altera em grupos de $2^2 = 4$.
4. Para x_4 , o sinal se altera em grupos de $2^3 = 8$.
5. O procedimento é igual para $x_5, x_6, \dots, x_k$. Ou seja, para x_k o sinal se altera em grupos de $2^{(k-1)}$.

A partir desse arranjo se garante que todas as colunas da matriz sejam ortogonais entre si, e desse modo, é possível determinar os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes produzem nas respostas.

Existem métodos estatísticos para estimar os efeitos principais e de interação dos fatores, como o método dos sinais, o algoritmo de Yates e a utilização dos gráficos de probabilidade normal, porém apenas o método que utiliza os gráficos

lineares (que representam os efeitos principais e de interação) será explicado. Para a geração de tais gráficos diversos *softwares* podem ser utilizados (exemplos: EXCEL, STATISTICA, MINITAB, R).

Para representar e interpretar os efeitos principais e de interação graficamente, é necessário definir duas propriedades:

- o sinal ($\pm$) indica se a resposta aumenta ou diminui com a variação do nível de (-1) para (+1);
- a magnitude indica a intensidade do efeito.

A Figura 2.1 ilustra o gráfico do efeito principal (E_i) de um fator x_i . Esse gráfico mostra a variação média das respostas em função da mudança no nível (-1, +1) do fator x_i , mantendo os outros fatores constantes, ou seja, $\bar{y}_i^{-1}$ representa a média das respostas quando x_i apresenta nível -1, enquanto que $\bar{y}_i^{+1}$ representa a média das respostas quando x_i apresenta nível +1, independentemente dos níveis dos outros fatores.

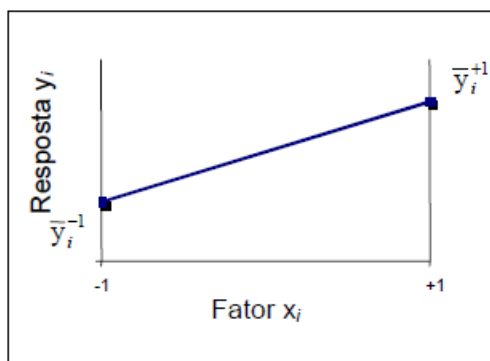


Figura 2.1 - Gráfico de efeitos principais para experimento fatorial 2^k [Galdámez, 2002]

Já os gráficos de efeitos de interação descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores. Na Figura 2.2 podem-se observar dois exemplos de gráficos de efeitos de interação. Nesses gráficos o ponto I é obtido calculando-se a média das respostas quando $x_1 = -1$ e $x_2 = +1$, já o ponto II quando $x_1 = +1$ e $x_2 = +1$ e assim por diante para os pontos III e IV.

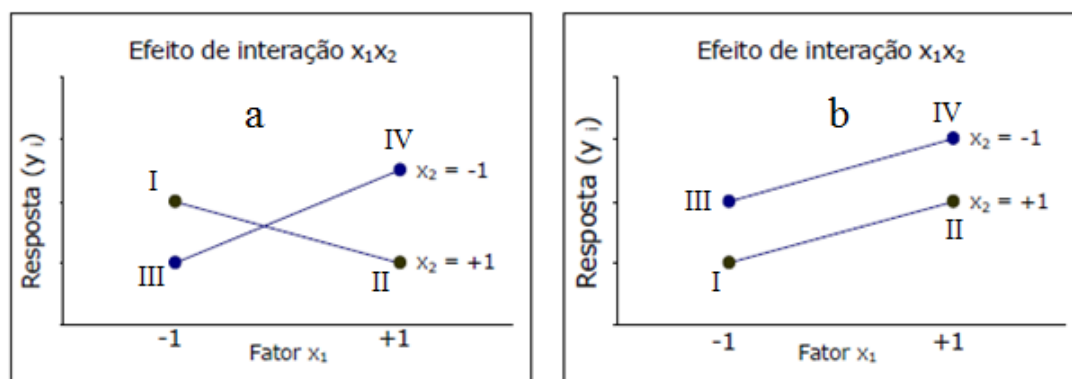


Figura 2.2 - Gráficos de efeitos de interação [Galdámez, 2002]

A Figura 2.2 a ilustra que o efeito provocado pela mudança de nível no fator x_1 na resposta depende do nível do fator x_2 , logo, existe interação entre os dois fatores. Já a Figura 2.2 b demonstra que o efeito provocado pela mudança do nível do fator x_1 na resposta é independente do nível do fator x_2 , portanto, não existe interação entre os dois fatores.

A técnica fatorial 2^k apresenta a vantagem de indicar as principais tendências e determinar uma direção promissora para a otimização dos resultados finais, através da análise dos experimentos. Porém, essa técnica também apresenta limitações, como por exemplo:

- não é possível obter informações dos fatores em níveis intermediários;
- torna-se inviável utilizar a técnica quando existe um numero grande de fatores;
- corre-se o risco de conduzir experimentos superdimensionados, já que, podem ser considerados vários fatores a realização dos testes.

A construção e o planejamento de experimentos utilizando-se a técnica de confundimento (*factorial experiments with design confounded*) ou a técnica de experimentos fatorial fracionado 2^{k-p} soluciona as limitações identificadas no planejamento fatorial 2^k . A técnica de confundimento é utilizada para acomodar um experimento fatorial completo em blocos. Tais blocos possuem tamanho menor que o número de tratamentos de uma réplica. Já a técnica de experimentos fatorial fracionado 2^{k-p} será explicada a seguir.

2.1.3.3. Planejamento fatorial fracionado 2^{k-p}

A aplicação das técnicas de planejamento de experimentos fatoriais fracionados 2^{k-p} proporciona a possibilidade de estudar o efeito de um ou mais fatores de controle ao mesmo tempo. Através dessa técnica é possível analisar os efeitos sobre uma resposta de interesse de k fatores com dois níveis cada um, em 2^{k-p} combinações de testes. Portanto, essa técnica permite a realização de apenas uma parte do experimento sem comprometer significativamente a precisão das conclusões decorrentes da análise de resultados. Além disso, simultaneamente os custos e o tempo de duração dos ensaios são significativamente reduzidos.

Quando a técnica de experimentos fatoriais fracionados 2^{k-p} é utilizada, assume-se que os efeitos de interação de ordem superior são desprezíveis e por isso informações confiáveis são necessárias. Montgomery (2004) ressalta ainda três ideias importantes que justificam a utilização dessa técnica. A primeira é a dispersão dos efeitos: quando existem vários fatores de controle, torna-se provável que o processo seja influenciado apenas por alguns efeitos principais e de interação de ordem inferior. A segunda característica é conhecida como propriedade de projeção. Neste caso, os experimentos fatoriais fracionados podem ser planejados em matrizes maiores, que podem ser construídas a partir de um subconjunto de fatores significativos. Já a terceira é a experimentação sequencial: ocorre quando é possível combinar as corridas de dois ou mais experimentos fatoriais fracionados.

O exemplo a seguir ilustra um estudo com três fatores de controle (1, 2 e 3), com dois níveis cada um deles. Supondo o caso de ser inviável economicamente, ou por qualquer outro motivo, realizar-se as oito combinações ($2^3 = 8$), pondera-se ser mais eficiente realizar-se um experimento fatorial fracionado, em que é possível efetuar apenas quatro (metade) observações ($2^{3-1} = 4$). Consoante pode ser observado na Tabela 2.3, em que todas as combinações possíveis do experimento fatorial completo 2^3 estão presentes, verifica-se que as colunas 12, 13, 23 e 123 são estimadas através da multiplicação das colunas que contém os fatores 1, 2 e 3. Nesta toada, por conveniência, as combinações (linhas da matriz) são separadas pelos sinais de positivo e negativo da coluna de interação de maior ordem, ou seja, a coluna 123, a qual merece destaque por ser denominada relação definidora do experimento. De

tal forma, pondera-se que neste tipo de experimento é possível optar pela execução das combinações referentes à parte positiva (teste número 1, 2, 3 e 4), o que é mais usual, ou executar a outra parte (corridas 5, 6, 7 e 8). No primeiro caso a combinação dos ensaios é representada por $I=123$. Se for selecionada a parte negativa, no entanto, deve-se lembrar que a relação definidora será $I=-123$.

Tabela 2.3 - Experimento fatorial 2^3 [Montgomery, 2004]

Combinações tratamento	Efeito fatorial								y_i
	I	1	2	3	12	13	23	123	
1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_1
2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_2
3	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_4
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_8

Agora, com o objetivo de ilustrar o processo de planejamento experimental com a técnica fatorial fracionada será utilizada a parte positiva do experimento, apresentada na Tabela 2.3. As seguintes combinações lineares para estimar os efeitos principais dos fatores 1, 2 e 3 são possíveis de serem identificadas na Matriz de Experimentos, conforme segue:

$$l_1 = 1/2 \cdot (+1 - 2 - 3 + 4)$$

$$l_2 = 1/2 \cdot (-1 + 2 - 3 + 4)$$

$$l_3 = 1/2 \cdot (-1 - 2 + 3 + 4)$$

E para os efeitos de interação 12, 13 e 23 se obtém:

$$l_{12} = 1/2 \cdot (-1 - 2 + 3 + 4)$$

$$l_{13} = 1/2 \cdot (-1 + 2 - 3 + 4)$$

$$l_{23} = 1/2 \cdot (+1 - 2 - 3 + 4)$$

Percebe-se que algumas combinações lineares são iguais ($l_1 = l_{23}, l_2 = l_{13}$ e $l_3 = l_{12}$), tornando impossível identificar claramente quais são os efeitos principais de cada fator, uma vez que estes estão misturados com os efeitos produzidos pela combinação de dois fatores. Na realidade está sendo determinado o efeito das combinações 1 + 23, 2 + 13 e 3 + 12, e esta propriedade é conhecida como efeito de confundimento.

O confundimento de um efeito principal ou de interação em um experimento pode ser determinado a partir da multiplicação do efeito com a relação definidora. Por exemplo, para o efeito principal 1:

$$(1)I = (1)123 = 23$$

O mesmo procedimento é utilizado para determinar $2 = 13$ e $3 = 12$. Observa-se que não existe confundimento entre os efeitos principais, porém essas informações estão confundidas com os efeitos das interações entre dois fatores.

Nesse contexto, deve-se considerar um aspecto muito importante nos experimentos fatoriais fracionados: a resolução. A resolução está relacionada ao padrão de confundimento entre os efeitos dos fatores. A utilização da maior resolução possível é recomendada, de modo que os efeitos de interação de mais alta ordem são desprezados. A seguir estão definidas as resoluções III, IV e V, consideradas mais importantes e mais utilizadas ao se construir os experimentos.

- Resolução III: ao menos alguns efeitos principais são confundidos com efeitos de interação de dois fatores;
- Resolução IV: ao menos alguns efeitos principais são confundidos com efeitos de três fatores e ao menos alguns efeitos de interação de dois fatores são confundidos entre si
- Resolução V: ao menos alguns efeitos principais são confundidos com efeitos de interação de quatro fatores e os efeitos de interação de dois fatores são confundidos com os efeitos de três fatores.

Dependendo do número de fatores que são investigados, apenas um quarto do experimento fatorial completo pode ser realizado, caracterizando um experimento

fatorial fracionado 2^{k-2} . Esse experimento pode ser construído com as combinações de tratamento ou colunas da matriz de um planejamento fatorial com $k-2$ fatores. Em seguida, são adicionadas duas colunas com as interações, escolhidas apropriadamente para incluir os primeiros $k-2$ fatores. Além disso, conforme o número de fatores outras frações podem ser utilizadas.

Finalmente, ressalta-se que a análise estatística e descritiva (gráficos lineares e probabilidade normal) dos efeitos principais e de interação dos fatores segue os mesmos princípios apresentados anteriormente para um experimento fatorial 2^k .

2.2. Realização do experimento

Nessa seção será descrita a realização do experimento, no qual os conceitos e técnicas de planejamento e análise descritos na seção anterior foram empregados.

Destaca-se que a realização do experimento seguiu as recomendações da seção 2.1.2: Processo para conduzir experimentos.

2.2.1. Objetivos do experimento

O objetivo do experimento é maximizar o desempenho longitudinal do veículo. Para tanto o teste padrão determinado simula duas provas da competição nacional Baja SAE, realizadas em terreno pavimentado. A primeira chamada de “aceleração” mede o tempo em que o veículo completa os primeiros 30 metros partindo do repouso. Já a segunda, chamada de “velocidade” mede a velocidade final alcançada pelo veículo em 100 metros. A Figura 2.3 mostra como foi realizado o experimento.



Figura 2.3 - Experimento realizado simulando as provas de aceleração e velocidade

2.2.2. Parâmetros do experimento

Nesta seção serão listados e explicados cada um dos fatores de controle e seus níveis de ajuste, os fatores de ruído e as variáveis de resposta. Abaixo estão listados os fatores de controle:

A – Ângulo do camo da polia movida: o camo (Figura 2.4 e Figura 2.6) é a peça responsável por guiar o prato móvel da polia movida, quando ele se desloca. Uma variação no seu ângulo proporciona maior ou menor tempo de deslocamento do prato móvel e subsequente transição até a menor relação de transmissão da TCV. As seguintes opções de ângulos estavam disponíveis: 32°, 35° e 41°.



Figura 2.4 - Camo de 32°

B – Material da polia movida: a polia movida original de fábrica (vendida pela empresa *Comet*) é usinada em aço. Porém, a Equipe Poli de Baja, visando

diminuir a massa e principalmente o momento de inércia desse componente, projeta e desenvolve uma polia movida semelhante à original em alumínio. Logo as opções disponíveis eram: aço original e alumínio (Figura 2.5). Os componentes da polia movida podem ser observados na Figura 2.6.



Figura 2.5 - Polia movida em aço (esq.) e em alumínio (dir.)

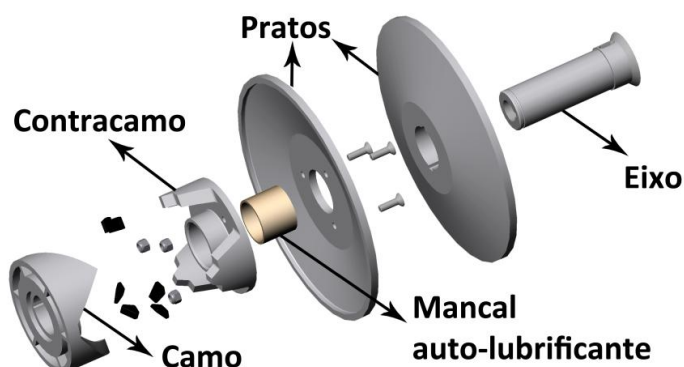


Figura 2.6 – Componentes da polia movida da TCV

C – Configuração da chapa corta-fogo: esse componente tem como função proteger o piloto do veículo Baja SAE contra possíveis chamas provenientes da queima de combustível na região do motor, que se localiza na traseira do veículo (Figura 2.7). Duas opções possíveis são: a “tradicional” que é uma chapa fina de alumínio que preenche todo o espaço entre o habitáculo e a região traseira do veículo e a “reduzida” em que apenas uma parte dessa região é coberta, dado que o tanque de combustível se localiza no lado esquerdo da traseira do veículo e que essa região também é coberta por outra chapa de alumínio.



Figura 2.7 - Configurações da chapa corta-fogo

D – Mola da polia movida: se localiza entre o contra-camo e o camo da polia movida (Figura 2.6). É responsável pela movimentação do prato móvel da polia movida. Duas opções são possíveis: uma mola com 5 voltas e outra mola com 6 voltas, denominadas mola 5 e mola 6, respectivamente.

E – Pré-tensão da mola da polia movida: com maior pré-tensão na mola da polia movida, mais rápido será o seu funcionamento. As opções possíveis são: sem pré-tensão e pré-tensão de um terço de volta até uma volta completa, quando se torna muito difícil montar a polia movida da TCV, devido à pressão da mola.

F – Tampa da polia motora: é a peça na qual as massas da polia motora se movimentam, ou seja, as massas da polia motora seguem o seu formato semiesférico para se locomover da posição inicial até a posição final, quando a polia motora atinge o seu maior diâmetro (Figura 2.8). As opções disponíveis são: tampa original, denominada tampa 1 e uma tampa customizada, em que sua massa foi reduzida, denominada tampa “leve”.

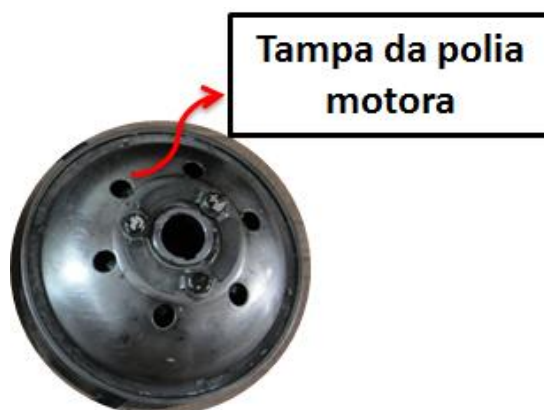


Figura 2.8 - Tampa da polia motora

G – Pressão dos pneus: em terreno pavimentado, quanto maior a pressão dos pneus, menor a área de contato dos mesmos com o solo e, portanto, menor a resistência ao movimento do veículo. Diversas opções são possíveis: desde 7 psi até 15 psi em cada pneu, podendo-se colocar pressões maiores nos pneus traseiros e menores nos dianteiros, uma vez que as rodas traseiras são as responsáveis pela tração do veículo.

J – Massas e molas da polia motora: responsáveis pelo funcionamento da polia motora, esses componentes determinam a partir de qual rotação do motor a polia motora inicia o seu movimento de “fechamento”, ou seja, quando o seu diâmetro aumenta. As opções de massas e molas da polia motora são muitas. Entre as massas disponíveis, tem-se: 71, 78, 91, 98 e 105 gramas (Figura 2.9); quanto às molas torcionais, tem-se molas amarelas, verdes e roxas (Figura 2.10), totalizando quinze possíveis combinações.

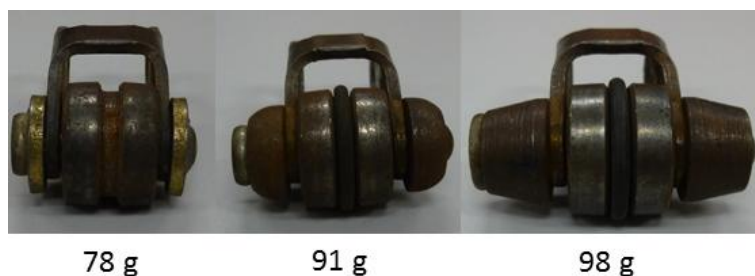


Figura 2.9 - Algumas opções de massas disponíveis



Figura 2.10 - Molas torcionais: verde e amarela

O único fator de ruído identificado foi a temperatura da TCV, a qual aumenta com o uso do veículo.

Já as variáveis de resposta são: a aceleração do veículo, ou seja, o tempo necessário para o veículo atingir a marca de 30 metros partindo do repouso e a velocidade final do veículo em 100 metros, medida como o tempo que o veículo levou para completar o último metro da pista, ou seja, entre as marcas de 99 e 100 metros, como ilustrado na Figura 2.3.

2.2.3. Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta

Os fatores de controle, já explicados na seção anterior, foram escolhidos e os níveis de ajuste desses fatores determinados, conforme demonstra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Fatores de controle e níveis de ajuste

Parâmetros		Níveis	
		+1	-1
A	Ângulo do camo da polia movida	32º	41º
B	Material da polia movida	Aço	Alumínio
C	Configuração da chapa corta-fogo	Tradicional	Reduzida
D	Mola da polia movida	Mola 5	Mola 6
E	Pré-tensão da mola da polia movida	Sem pré-tensão	1 volta de pré-tensão
F	Tampa da polia motora	Tampa 1	Tampa leve
G	Pressão dos pneus	7 psi na dianteira 9 psi na traseira	9 psi na dianteira 12 psi na traseira
J1	Massas e molas da polia motora	98 gramas amarela	105 gramas amarela
J2	Massas e molas da polia motora	91 gramas verde	91 gramas amarela

Quando o parâmetro apresentou mais de dois níveis de ajuste possíveis optou-se por selecionar os seus extremos. Já no caso das massas e molas da polia motora, dois grupos cada um com dois níveis de ajuste foram selecionados, uma vez que testes preliminares determinaram que essas quatro possibilidades, dentre todas as possíveis, apresentaram melhores resultados.

O fator de ruído identificado, a temperatura da TCV, não foi levado em consideração no experimento, uma vez que seus valores medidos não variaram muito durante os testes.

As variáveis de respostas são a aceleração e a velocidade do veículo Baja SAE, no caso o protótipo Poli Titan. Esses dados são obtidos através de um sensor ótico posicionado no assoalho do veículo. Na pista de teste, mais precisamente nas marcações de 0, 30, 99 e 100 metros, estão localizados anteparos que possuem altura próxima à altura livre do solo do veículo. Quando o veículo Baja, portando o sensor ótico de presença passa sobre o anteparo, um pulso é gerado pelo sensor, disparando um cronômetro. Deste modo, é possível medir o tempo para completar os primeiros 30 metros de movimento e o tempo necessário para percorrer o último metro de pista, bastando efetuar um cálculo simples para obter a velocidade final.

2.2.4. Seleção da matriz experimental

Para o experimento em questão optou-se pela configuração fatorial fracionado 2^{k-p} , separados em blocos, o que levou a necessidade de testes em apenas 32 configurações distintas, em vez de 512 configurações originais possíveis, caso todas as combinações fossem testadas (experimento fatorial 2^k).

Como a troca da chapa corta-fogo, assim como a montagem da polia movida demandam muito tempo e apresentam dificuldades de serem efetuadas, os seus blocos sofreram poucas alterações no decorrer do experimento, conforme se pode observar na matriz experimental, Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Matriz experimental

Configuração	Chapa Corta-Fogo (C)	Ângulo do Camo da Polia Movida (A)	Material da Polia Movida (B)	Mola da CVT Movida (D)	Pré-tensão da Mola da Polia Movida (E)	Cuia da Polia Motora (F)	Massa e Mola da Polia Motora (J)	Pressão dos Pneus (G)
1	-1	1	-1	-1	1	1	105 amarelo	1
2	-1	1	-1	-1	1	1	105 amarelo	-1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	98 amarelo	1
4	-1	1	-1	-1	1	-1	98 amarelo	-1
5	-1	1	1	-1	-1	1	91 verde	1
6	-1	1	1	-1	-1	1	91 verde	-1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	91 amarelo	-1
8	-1	1	1	-1	-1	-1	91 amarelo	1
9	-1	-1	1	1	-1	1	105 amarelo	-1
10	-1	-1	1	1	-1	1	105 amarelo	1
11	-1	-1	1	1	-1	-1	98 amarelo	-1
12	-1	-1	1	1	-1	-1	98 amarelo	1
13	-1	-1	-1	1	1	-1	91 amarelo	1
14	-1	-1	-1	1	1	-1	91 amarelo	-1
15	-1	-1	-1	1	1	1	91 verde	1
16	-1	-1	-1	1	1	1	91 verde	-1
17	1	-1	-1	-1	-1	1	98 amarelo	1
18	1	-1	-1	-1	-1	1	98 amarelo	-1
19	1	-1	-1	-1	-1	-1	105 amarelo	-1
20	1	-1	-1	-1	-1	-1	105 amarelo	1
21	1	1	1	1	1	1	98 amarelo	-1
22	1	1	1	1	1	1	98 amarelo	1
23	1	1	1	1	1	-1	105 amarelo	-1
24	1	1	1	1	1	-1	105 amarelo	1
25	1	-1	1	-1	1	1	91 amarelo	1
26	1	-1	1	-1	1	1	91 amarelo	-1
27	1	-1	1	-1	1	-1	91 verde	1
28	1	-1	1	-1	1	-1	91 verde	-1
29	1	1	-1	1	-1	-1	91 verde	-1
30	1	1	-1	1	-1	-1	91 verde	1
31	1	1	-1	1	-1	1	91 amarelo	-1
32	1	1	-1	1	-1	1	91 amarelo	1

2.2.5. Realização do experimento

O experimento foi realizado de fevereiro a março de 2011 no estacionamento da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, mediante autorização, e contou com a colaboração dos integrantes da Equipe Poli de Baja.

A Tabela 2.6 apresenta os dados coletados no experimento, que seguiu a matriz experimental, apresentada na Tabela 2.5.

Tabela 2.6 - Dados experimentais

Configu- ração	Aceleração (tempo em 30 metros)				Velocidade Final (km/h)			
1	4,258	4,228	4,382	4,321	52,08	50,58	51,42	50,86
2	4,239	4,34	4,329	4,286	52,18	52,47	50,22	52,18
3	4,123	4,226	4,242	4,254	53,07	52,67	52,37	52,77
4	4,235	4,34	4,338	4,32	51,99	52,08	52,37	51,61
5	4,336	4,37	4,384	4,358	51,89	51,14	50,86	50,77
6	4,626	4,608	4,579	4,608	51,51	51,14	50,77	50,68
7	4,591	4,597	4,56	4,52	45,66	45,29	45,81	45,58
8	4,789	5,077	4,678	4,762	45,66	44,93	45,14	45,81
9	4,399	4,265	4,244	4,262	51,89	51,99	51,61	51,42
10	4,228	4,201	4,295	4,281	51,61	52,37	52,18	51,7
11	4,28	4,272	4,283	4,305	50,58	50,58	50,31	49,52
12	4,355	4,263	4,397	4,496	49,52	49,26	49,09	48,74
13	4,143	4,308	4,206	4,197	52,57	53,78	53,07	53,27
14	4,2	4,176	4,201	4,21	53,57	53,07	53,27	53,07
15	4,365	4,558	4,266	4,364	50,13	50,58	50,4	50,22
16	4,285	4,294	4,209	4,361	51,23	51,61	51,23	51,7
17	4,343	4,204	4,286	4,312	50,95	50,77	50,86	50,4
18	4,282	4,194	4,248	4,238	51,14	51,04	51,04	51,32
19	4,177	4,183	4,193	4,173	52,18	50,86	51,32	51,99
20	4,257	4,32	4,398	4,425	50,77	51,14	50,86	51,32
21	4,284	4,326	4,353	4,346	50,22	50,4	50,49	51,32
22	4,268	4,247	4,303	4,253	50,58	49,87	51,23	49,6
23	4,183	4,315	4,384	4,338	51,51	50,49	50,77	51,04
24	4,428	4,486	4,406	4,324	50,68	50,22	50,22	49,96
25	4,278	4,289	4,257	4,348	51,42	50,77	50,77	49,52
26	4,318	4,273	4,281	4,338	50,22	50,13	50,22	49,96
27	4,376	4,402	4,422	4,437	50,13	50,77	50,49	50,04
28	4,304	4,338	4,325	4,322	50,86	49,69	51,14	50,68
29	4,377	4,421	4,564	4,498	48,66	49,52	49,78	48,74
30	4,379	4,342	4,41	4,58	49	49,96	48,32	47,91
31	4,184	4,208	4,242	4,16	51,14	49,6	49,78	50,86
32	4,361	4,267	4,283	4,248	50,4	50,68	50,4	49,17

2.2.6. Análise de dados

De posse dos dados experimentais, apresentados na Tabela 2.6, o *software* estatístico R foi utilizado para a geração dos gráficos seminormais de cada reposta e

suas variâncias, assim como os gráficos lineares dos efeitos principais e dos efeitos de interação de cada resposta e suas variâncias.

Segundo Wu; Hamada (2000), se nenhum efeito principal ou qualquer interação desses efeitos for significativo para a resposta em análise, os pontos marcados no gráfico seminormal serão colineares, podendo-se traçar uma reta partindo da origem e com inclinação σ , tal que esta é uma estimativa do erro experimental. Porém, quando há efeitos significativos no experimento, é possível identifica-los como sendo os pontos que se situam fora da reta traçada pela maioria dos outros pontos. Deste modo, quanto mais distante um ponto estiver dessa reta, maior será a significância estatística do efeito que este ponto representa no experimento em questão. No gráfico seminormal, portanto, todos os grandes efeitos estimados se situam no canto superior direito do gráfico, acima da reta definida anteriormente.

De posse dos parâmetros mais significantes analisam-se os gráficos lineares dos efeitos principais e dos efeitos de interação e determina-se o nível de ajuste que apresenta o valor mais otimizado para aquela resposta.

1 – Aceleração

Os gráficos seminormais da aceleração estão ilustrados nas seguintes figuras: Figura 2.11, Figura 2.12 e Figura 2.13.

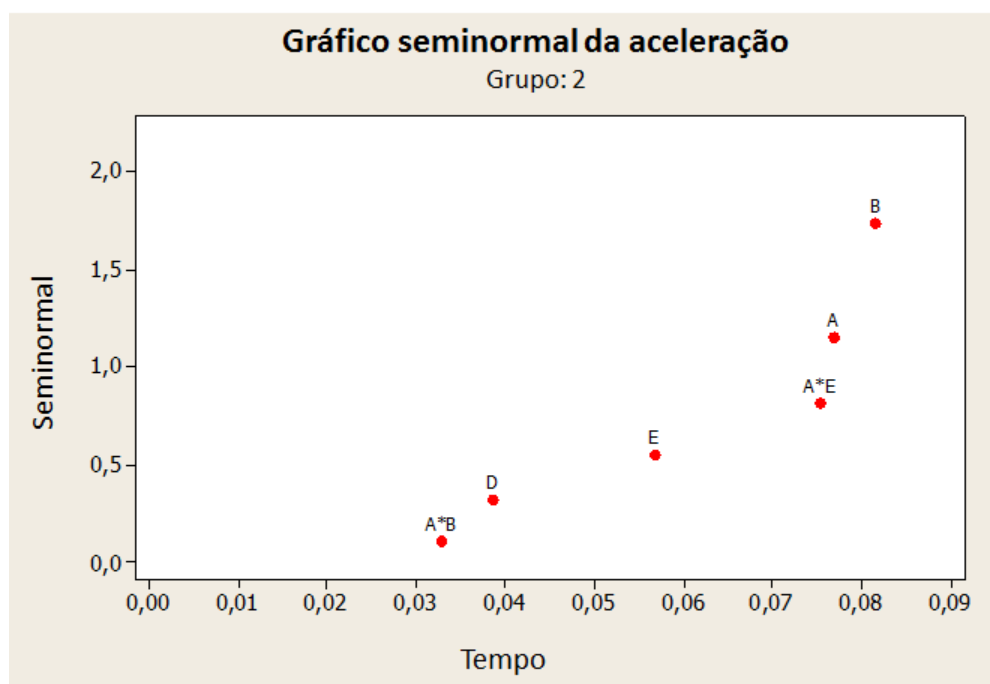


Figura 2.11 - Gráfico seminormal da aceleração: grupo 2

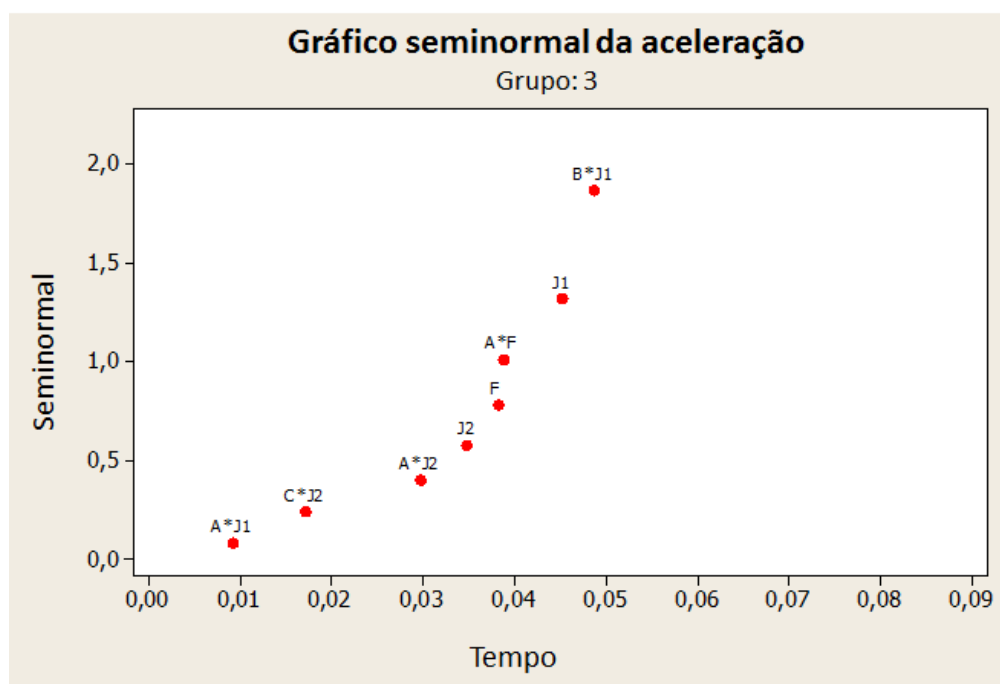


Figura 2.12 - Gráfico seminormal da aceleração: grupo 3

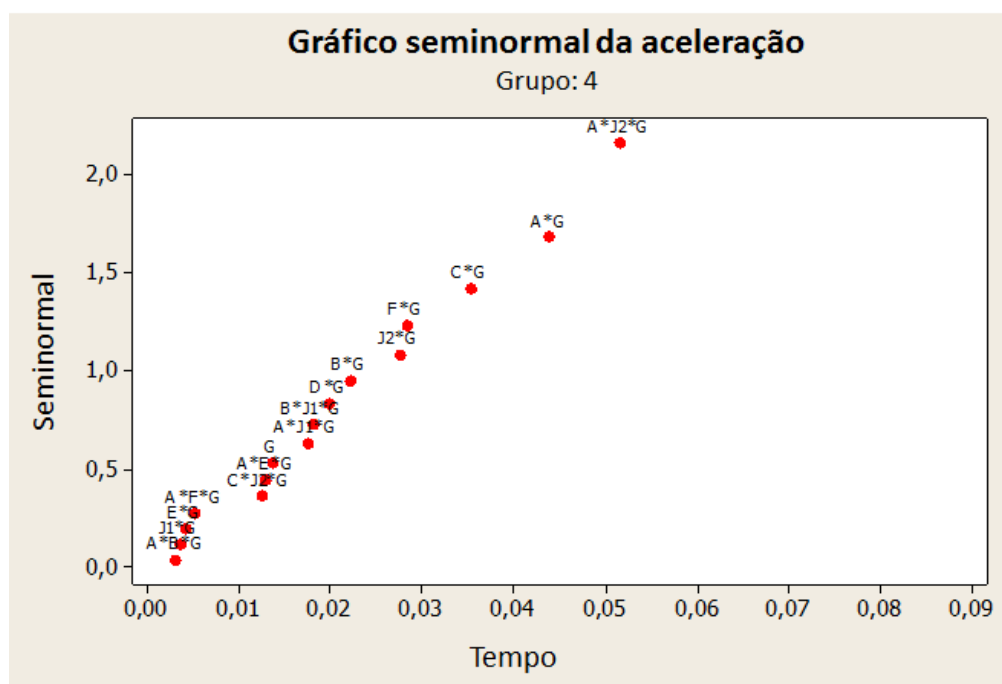


Figura 2.13 - Gráfico seminormal da aceleração: grupo 4

Analisando a Figura 2.11, observa-se como parâmetros mais importantes: B, A, A*E (que significa a interação entre os fatores A e E) e E. Já na Figura 2.12, tem-se os fatores B*J1 e J1 como mais importantes. Finalmente, na Figura 2.13 os parâmetros A*J2*G e A*G são os mais significantes.

De posse dos fatores mais significantes para a otimização do tempo de aceleração, observam-se a Figura 2.14 e a Figura 2.15 para determinar qual o nível de ajuste de cada fator que favorece a diminuição no tempo de aceleração, ou seja, buscam-se nesses gráficos os níveis de ajuste dos fatores selecionados que apresentam menor média de tempo para percorrer os primeiros 30 metros de pista.

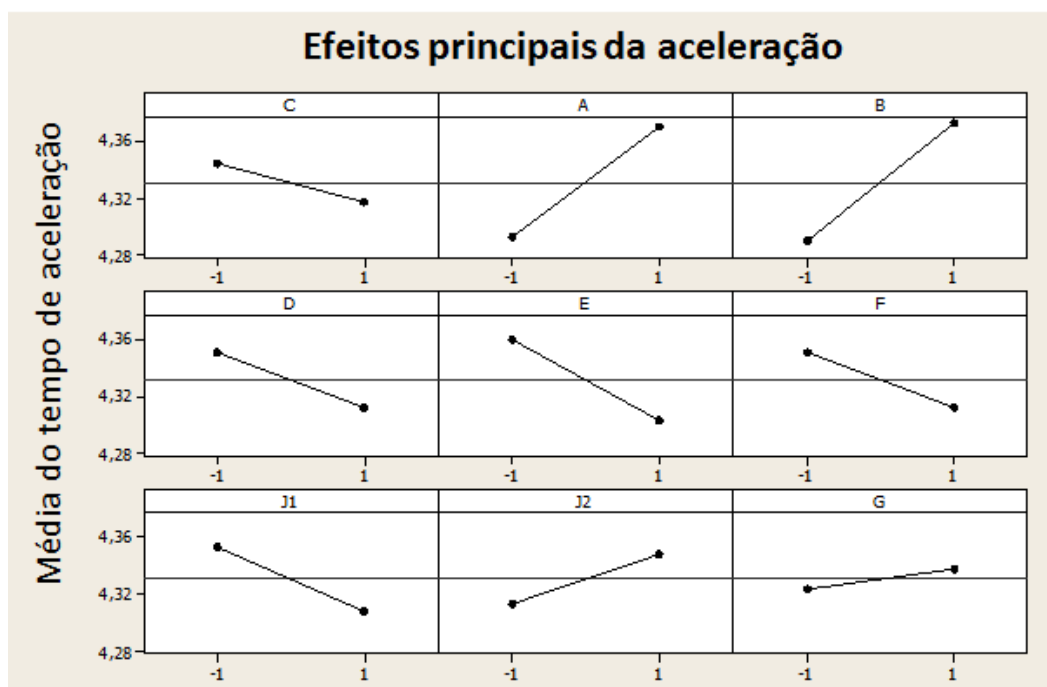


Figura 2.14 - Efeitos principais da aceleração

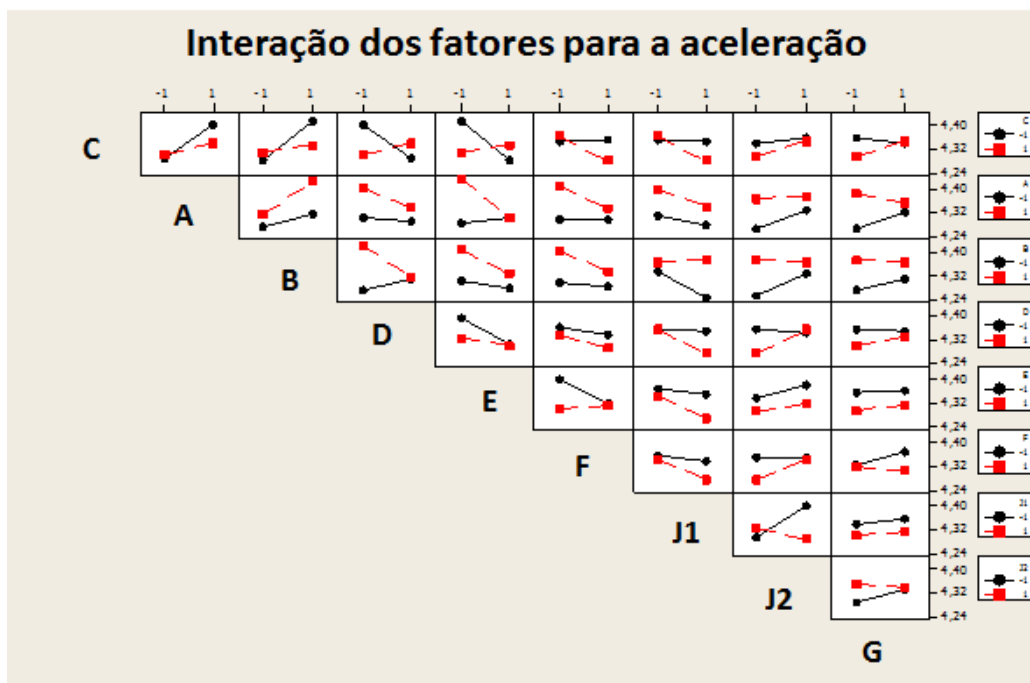


Figura 2.15 - Efeitos de interação da aceleração

Após analisar os efeitos principais e os efeitos de interação da aceleração (Figura 2.14 e Figura 2.15), obtém-se a Tabela 2.7 que mostra os níveis ideais para diminuir o tempo para percorrer os primeiros 30 metros.

Tabela 2.7 - Níveis ideais para otimizar aceleração

Fator	Nível de ajuste ideal
A	-1
B	-1
E	-1
G	-1
J1	+1
J2	-1

2 – Velocidade final

Observando os três gráficos seminormais da velocidade (Figura 2.16, Figura 2.17 e Figura 2.18), determinam-se como fatores mais importantes: E, B, A, A*E, B*J1, A*J2, A*F e F.

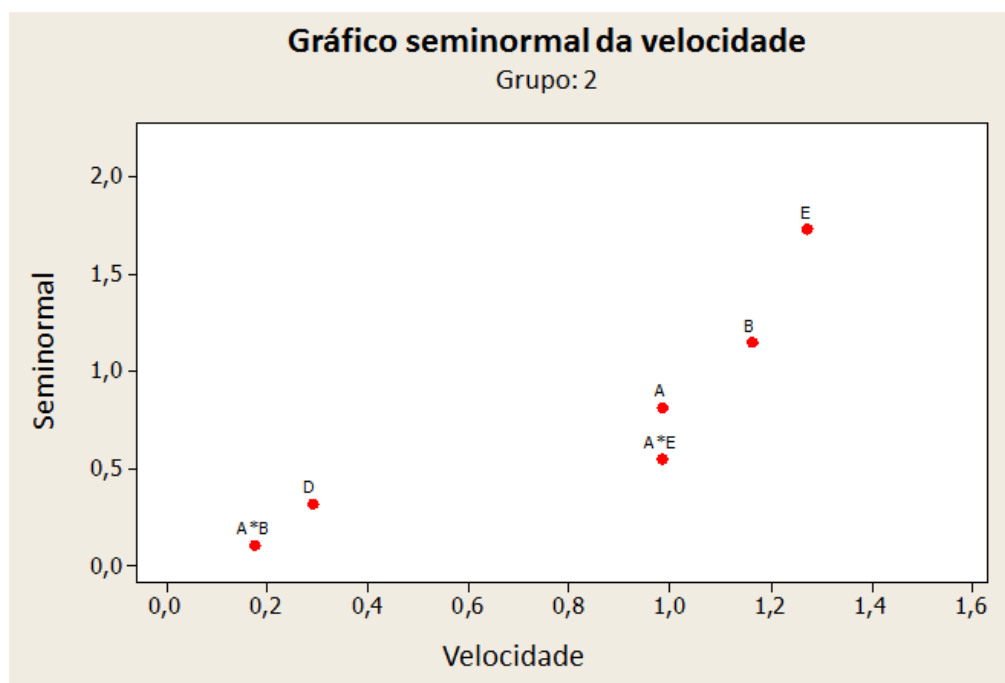


Figura 2.16 - Gráfico seminormal da velocidade: grupo 2

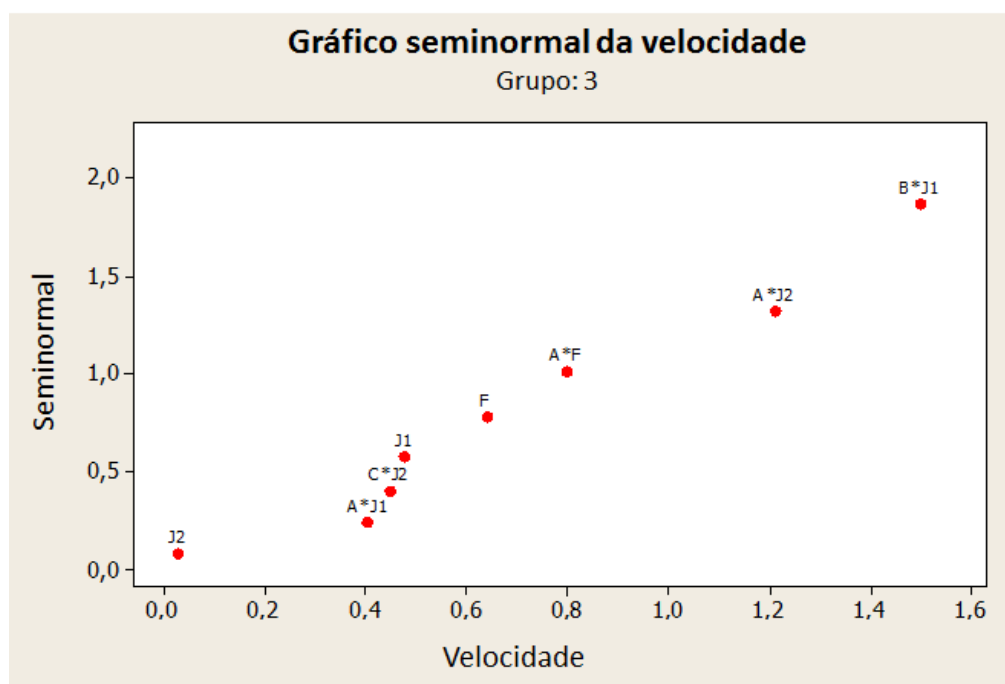


Figura 2.17 - Gráfico seminormal da velocidade: grupo 3

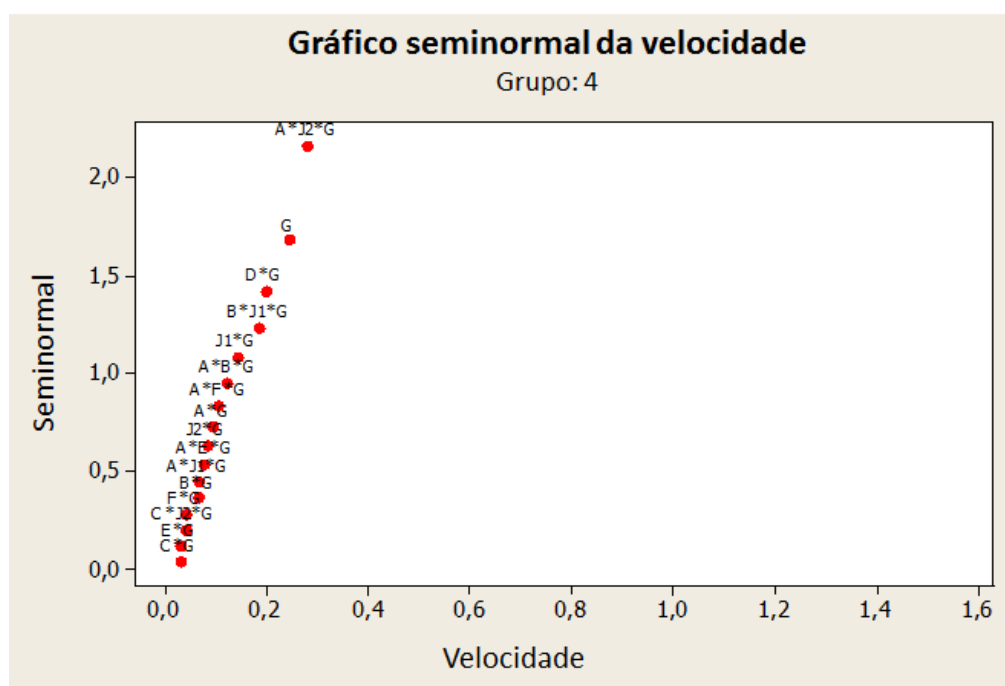


Figura 2.18 - Gráfico seminormal da velocidade: grupo 4

Agora, analisando os efeitos principais (Figura 2.19) e os efeitos de interação (Figura 2.20) da velocidade, obtém-se a Tabela 2.8, que ilustra os níveis ideais para aumentar a velocidade final do veículo em 100 metros.

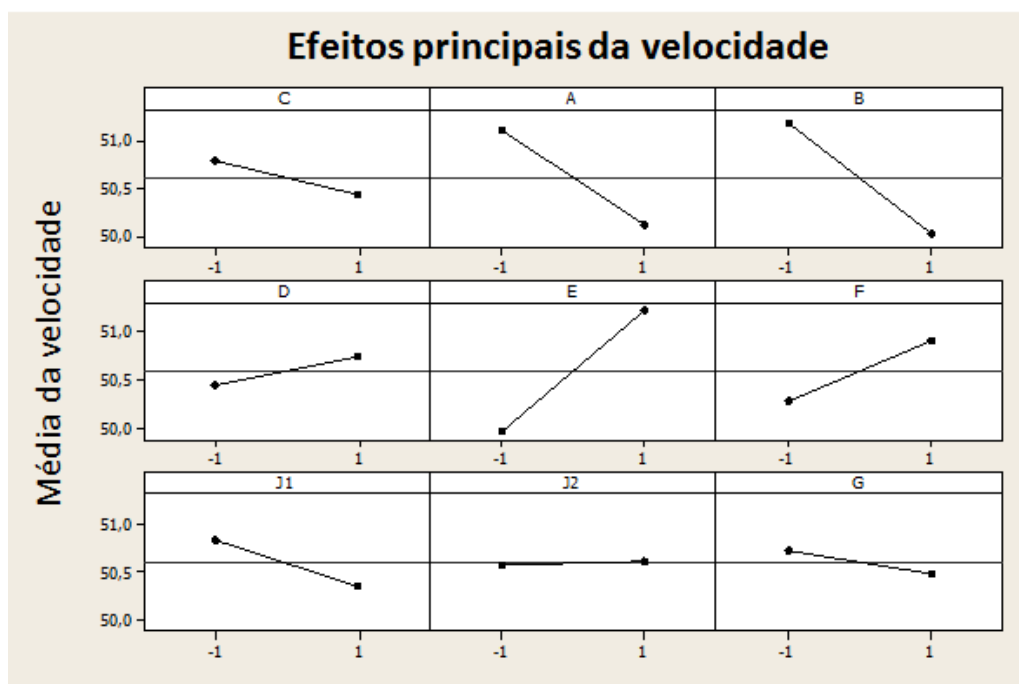


Figura 2.19 - Efeitos principais para a velocidade final

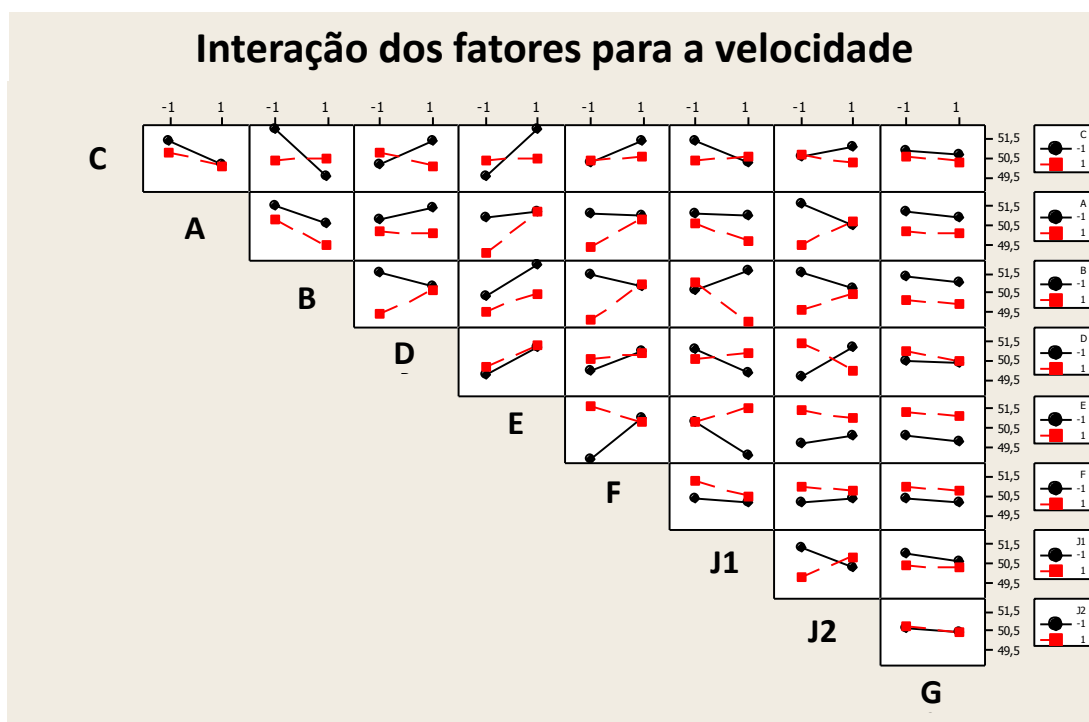


Figura 2.20 - Efeitos de interação para a velocidade final

Tabela 2.8 - Níveis ideais para otimizar velocidade final

Fator	Nível de ajuste ideal
A	-1
B	-1
E	+1
F	+1
J1	+1
J2	-1

3 – Variância da aceleração

Analisando os três gráficos seminormais da variância da aceleração (Figura 2.21, Figura 2.22 e Figura 2.23), é possível apontar os parâmetros mais significativos: D, B, A*F, G e A*G.

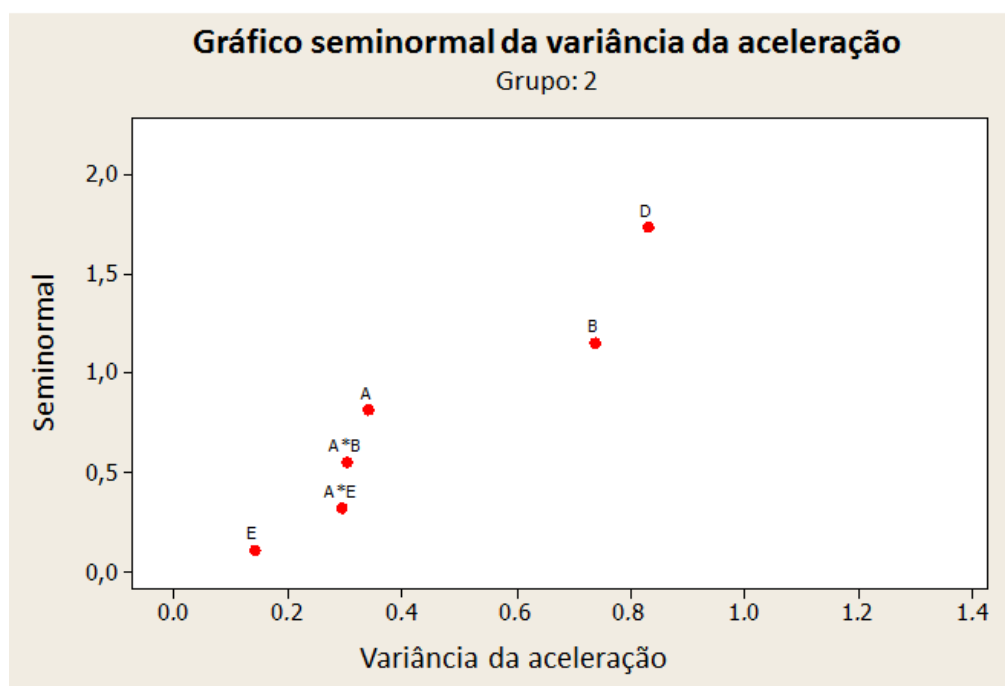


Figura 2.21 - Gráfico seminormal da variância da aceleração: grupo 2

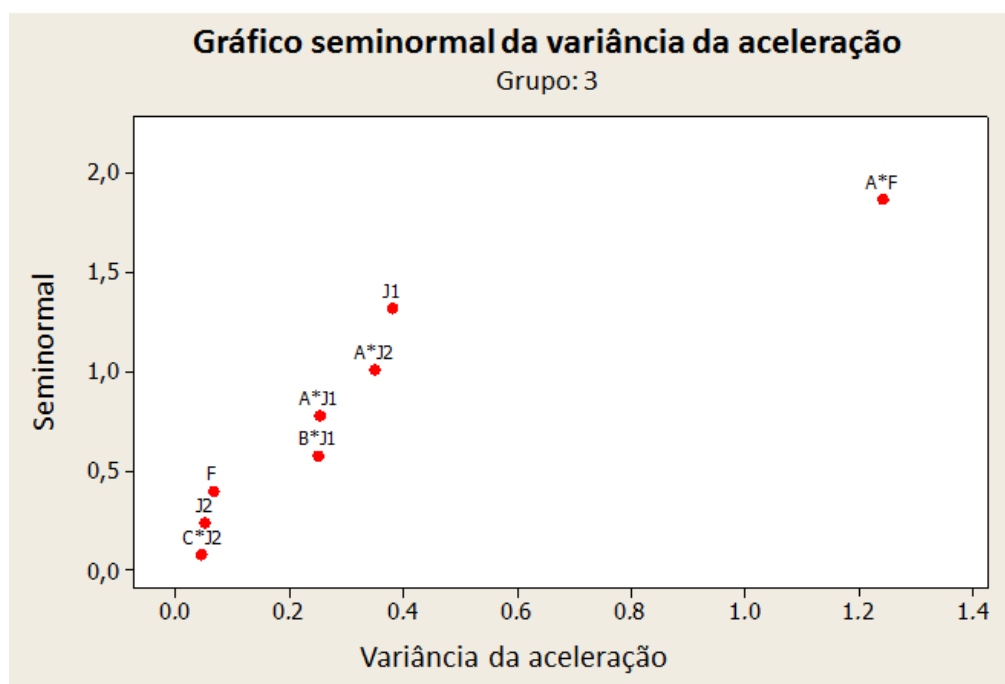


Figura 2.22 - Gráfico seminormal da variância da aceleração: grupo 3

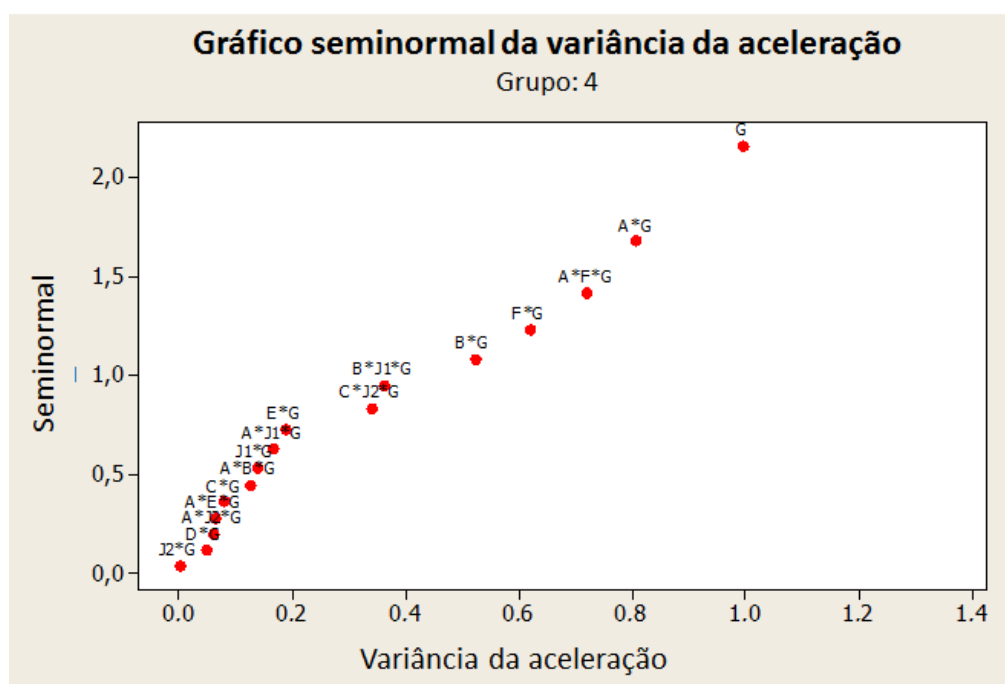


Figura 2.23 - Gráfico seminormal da variância da aceleração: grupo 4

Finalmente, observando os efeitos principais (Figura 2.24) e os efeitos de interação (Figura 2.25) da variância da aceleração, chega-se à Tabela 2.9, ilustrando os níveis de ajuste dos fatores que causam menor variância na aceleração do veículo.

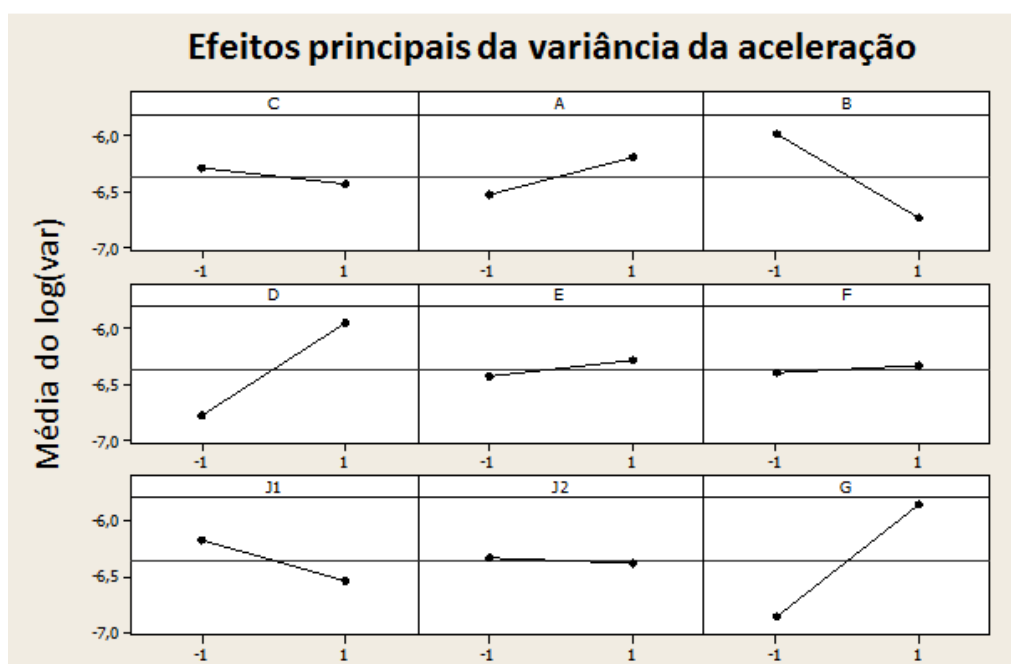


Figura 2.24 - Efeitos principais para a variância da aceleração

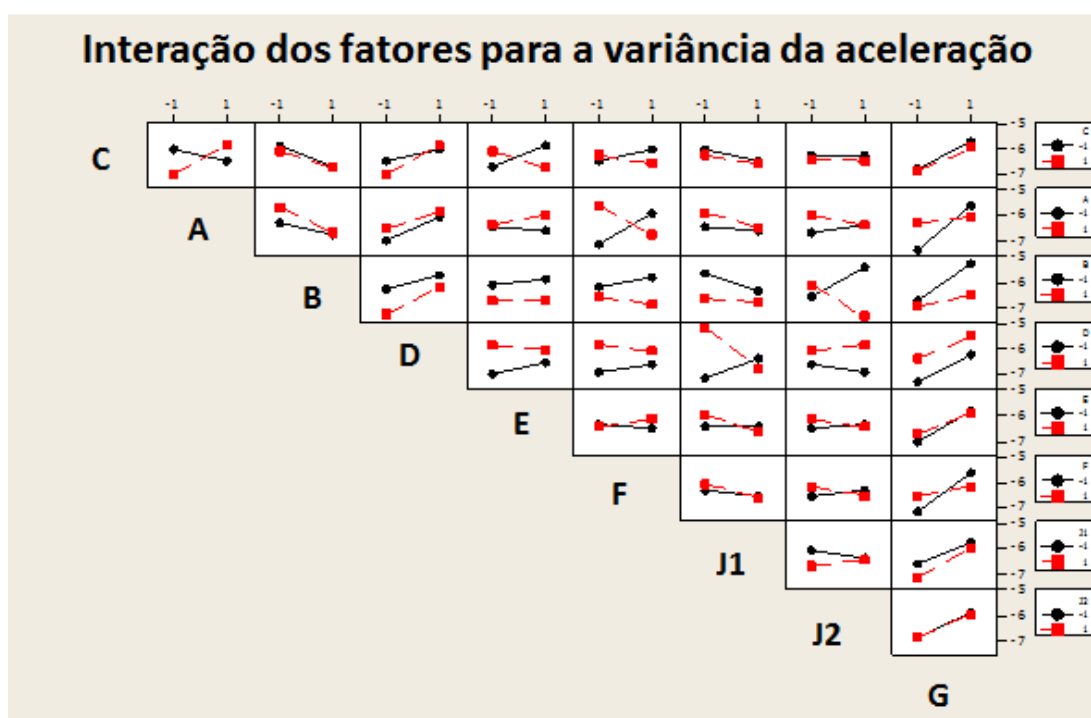


Figura 2.25 - Efeitos de interação da variância da aceleração

Tabela 2.9 - Níveis ideais para otimizar a variância da aceleração

Fator	Nível de ajuste ideal
A	1
B	-1
D	1
F	-1
G	1

4 – Variância da velocidade final

Finalmente, observando-se os gráficos seminormais da variância da velocidade (Figura 2.26, Figura 2.27 e Figura 2.28), determinam-se os fatores mais importantes: A, A*B e A*F.

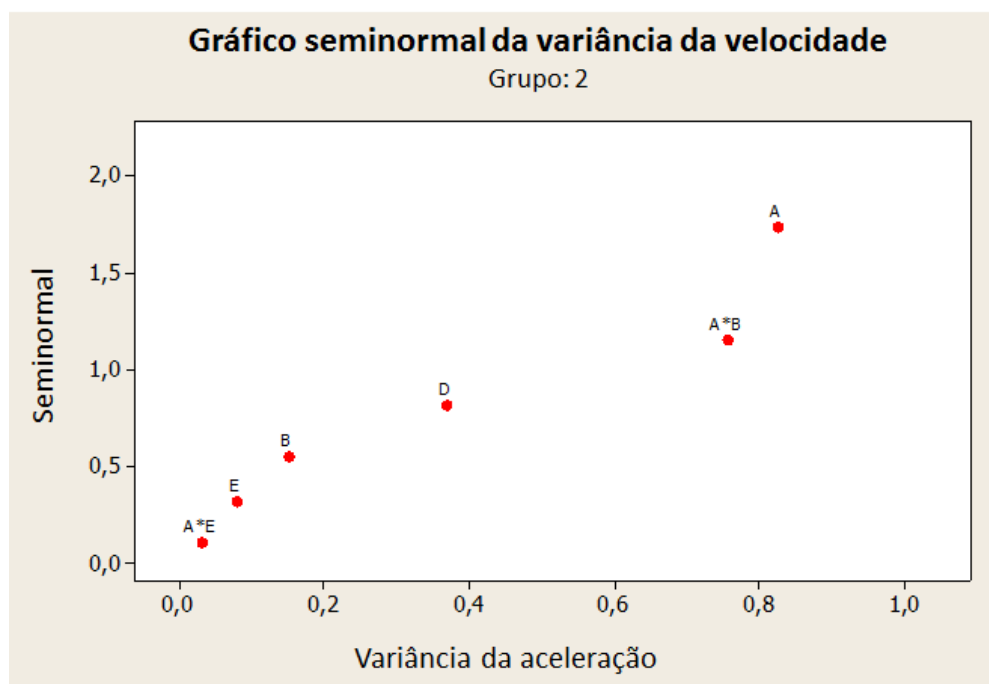


Figura 2.26 - Gráfico seminormal da variância da velocidade final: grupo 2

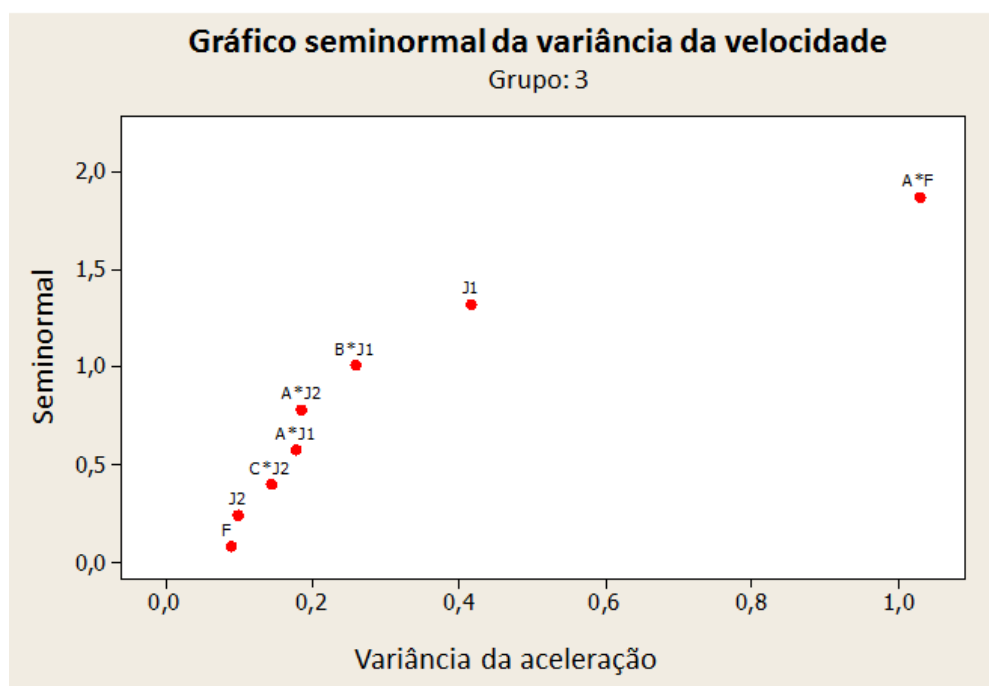


Figura 2.27 - Gráfico seminormal da variância da velocidade final: grupo 3

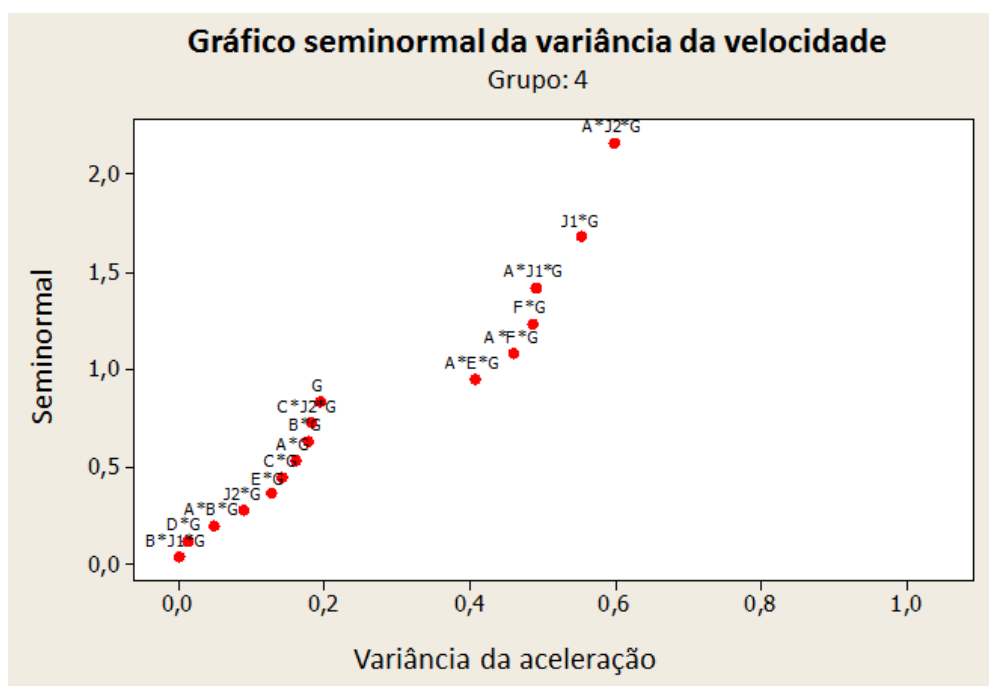


Figura 2.28 - Gráfico seminormal da variância da velocidade final: grupo 4

Por último, observando os efeitos principais (Figura 2.29) e os efeitos de interação (Figura 2.30) da variância da velocidade final, chega-se à Tabela 2.10, que mostra os níveis de ajuste dos fatores que causam menor variância na velocidade final do veículo.

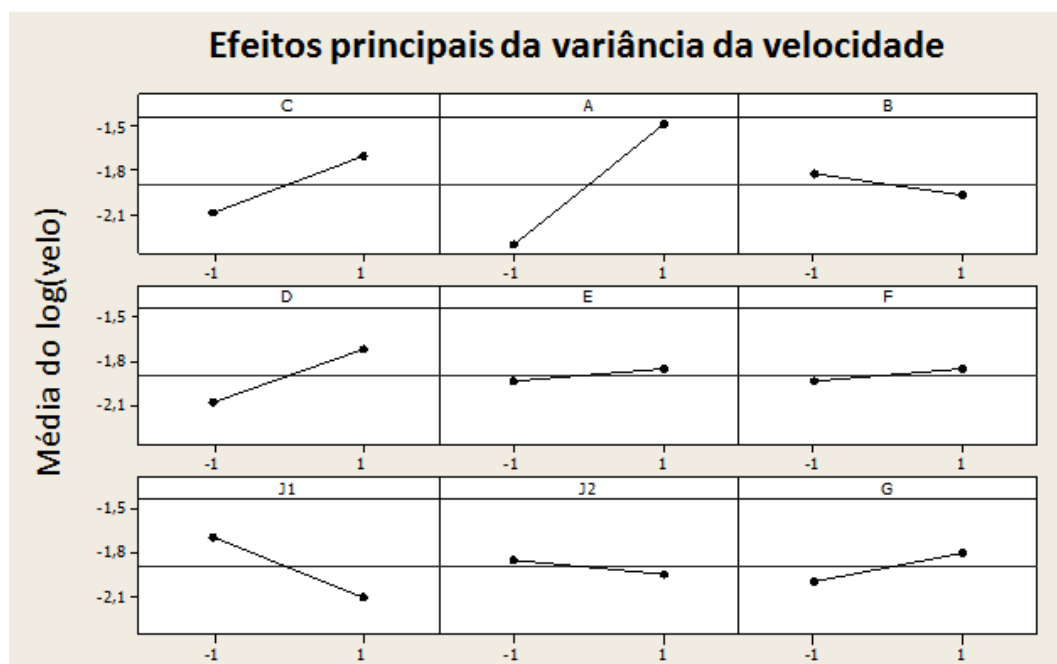


Figura 2.29 - Efeitos principais da variância da velocidade final

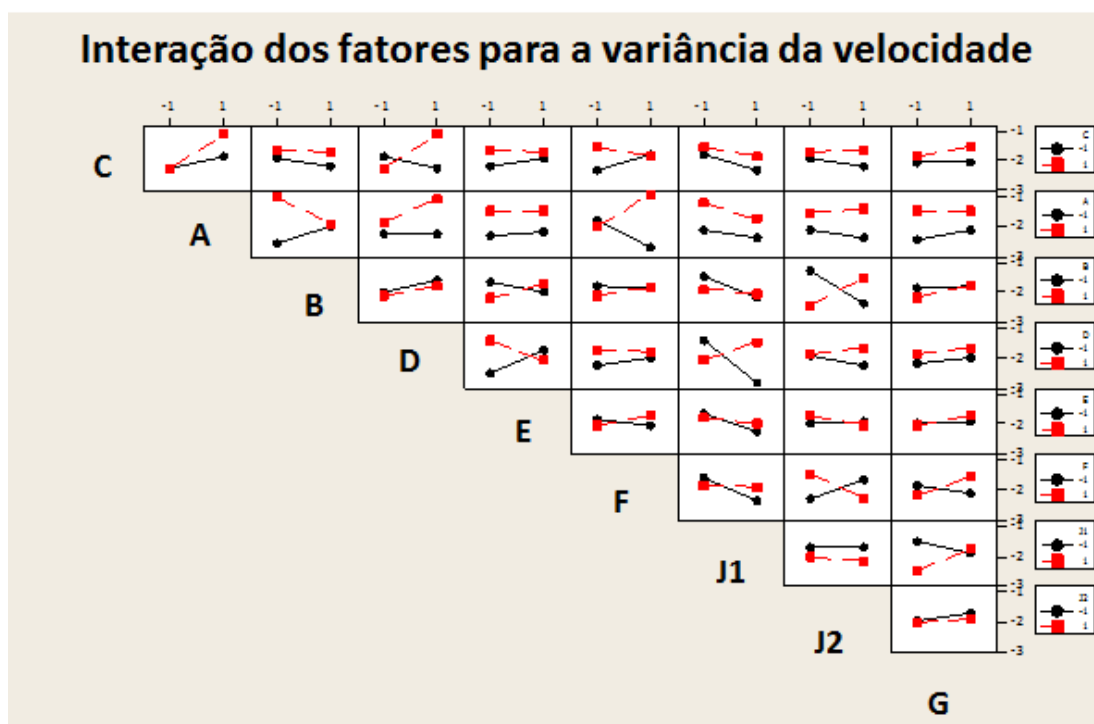


Figura 2.30 - Efeitos de interação da variância da velocidade final

Tabela 2.10 - Níveis ideais para otimizar a variância da velocidade final

Fator	Nível de ajuste ideal
A	1
B	-1
F	1

2.2.7. Interpretação dos resultados

Finalmente, levando-se em consideração que as respostas aceleração e velocidade são mais importantes que as suas variâncias, chegou-se à Tabela 2.11 que determina a configuração ótima do veículo para diminuir o tempo de aceleração e aumentar a velocidade final.

Tabela 2.11 - Configurações ótimas para a aceleração e a velocidade final

Parâmetros		Níveis		Configuração Ótima
		1	-1	
A	Ângulo do camo da polia movida	32º	41º	41º (-1)
B	Material da polia movida	Aço	Alumínio	Alumínio (-1)
C	Configuração da chapa corta-fogo	Tradicional	Reduzida	Reduzida (-1)
D	Mola da polia movida	Mola 5	Mola 6	Mola 6 (-1)
E	Pré-tensão da mola da polia movida	Sem pré-tensão	1 volta de pré-tensão	Sem pré-tensão (+1)
F	Tampa da polia motora	Tampa 1	Tampa leve	Tampa 1 (+1)
G	Pressão dos pneus	7 psi na dianteira 9 psi na traseira	9 psi na dianteira 12 psi na traseira	9 psi na dianteira 12 psi na traseira (-1)
J1	Massas e molas da polia motora	98 gramas amarela	105 gramas amarela	98 gramas amarela (+1)
J2	Massas e molas da polia motora	91 gramas verde	91 gramas amarela	91 gramas amarela (-1)

Utilizando a configuração ótima obtida através do delineamento de experimentos obteve-se diminuição no tempo para percorrer os primeiros 30 metros (aceleração) de 4,5% e aumento na velocidade final do veículo de 5% em comparação com a configuração utilizada pela equipe anteriormente.

3. MODELAGEM DA TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL (TCV)

3.1. Funcionamento da TCV

O modelo ilustrativo presente na Figura 3.1 representa os componentes do trem de força do veículo Baja SAE em estudo (motor, TCV, caixa de redução e rodas) atuando sobre uma pista qualquer.

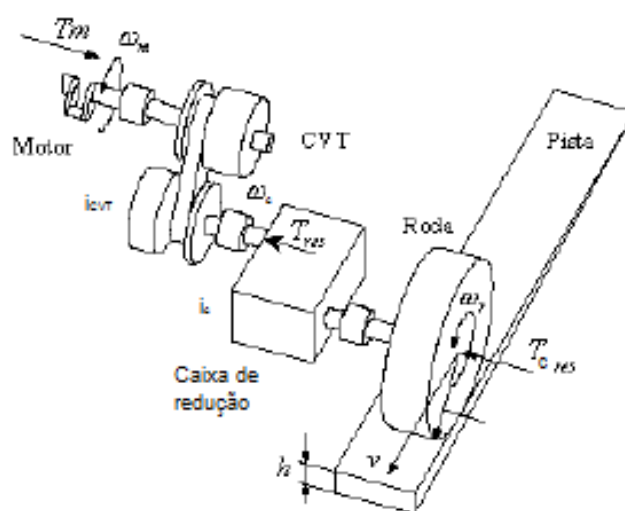


Figura 3.1 - Modelo ilustrativo dos componentes do veículo Baja SAE [Albuquerque, 2003]

T_m : Torque fornecido pelo motor [$N \cdot m$];

ω_m : Rotação na saída do motor [rpm];

i_{TCV} : Relação de transmissão da TCV;

T_{res} : Torque resistivo a TCV [$N \cdot m$];

ω_c : Rotação na saída da TCV, entrada da caixa de redução [rpm];

i_c : Relação de transmissão da caixa de redução;

ω_r : Rotação da roda do veículo [rpm];

T_{cres} : Torque resistivo à caixa de redução e ao deslocamento do veículo [$N \cdot m$];

v : Velocidade longitudinal do veículo [m/s];

h : Aclive da pista [m].

Antes de se iniciar a modelagem de qualquer sistema é importante conhecer o seu funcionamento como um todo. Deste modo, a modelagem e possíveis simplificações e aproximações se tornam mais evidentes.

A TCV analisada (modelo 790 da marca *Comet Industries*) é classificada como uma TCV de polias expansivas ou de diâmetros variáveis e possui uma correia de borracha como elemento transmissor do torque entre as duas polias expansivas. À medida que os discos das polias se afastam, a correia se aprofunda no sulco formado entre os discos destas. Se os discos se aproximam, a correia sobe e corre superficialmente. Através de movimentos contínuos e opostos (enquanto uma polia se abre, a outra se fecha), as polias alteram a relação de transmissão de forma contínua, como se houvessem infinitas marchas dentro do intervalo de máxima e mínima relação de transmissão, imposto pelos maiores e menores diâmetros possíveis de serem alcançados. A partir do instante em que a polia motora está totalmente fechada (ou seja, a correia está na posição mais superior possível nessa polia), a polia movida estará totalmente aberta (assim, a correia estará na posição mais inferior possível nessa polia). Nesta situação, pode-se observar que a TCV fornecerá a menor relação de transmissão possível e, se houver a necessidade de se aumentar a velocidade do veículo, ela variará apenas com a rotação do motor. A Figura 3.2 demonstra o funcionamento do mecanismo descrito.

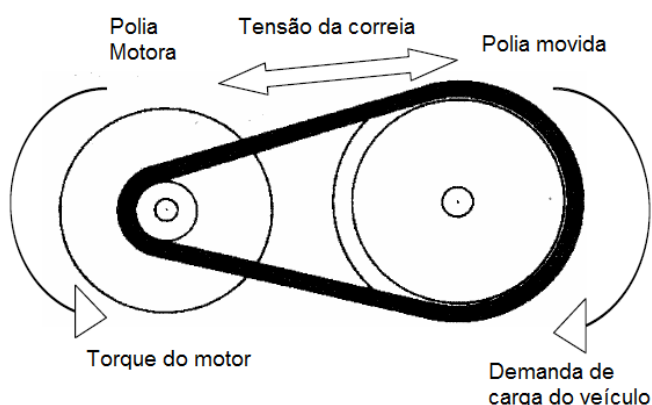


Figura 3.2 - Funcionamento da TCV

Já na Figura 3.3 e na Figura 3.4 pode-se observar o funcionamento e o comportamento dinâmico da TCV de acionamento automático por inércia de massas quando esse mecanismo se apresenta na configuração de maior relação de transmissão e na configuração de menor relação de transmissão, respectivamente.

Segundo catálogo do fabricante *Comet Industries*, a maior relação de transmissão possível é de 3,38:1, quando a polia motora se encontra totalmente aberta em operação, fornecendo máximo torque e a menor relação de transmissão para o modelo analisado é de 0,54:1, quando a polia motora se encontra totalmente fechada, fornecendo máxima velocidade. Sendo assim, a variação total da TCV analisada é de 6,26:1. Esta TCV é amplamente utilizada em veículos Baja SAE.

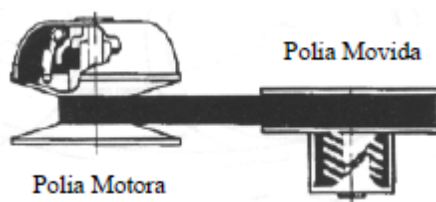


Figura 3.3 – Configuração de máximo torque (maior relação de transmissão) [Comet Industries]

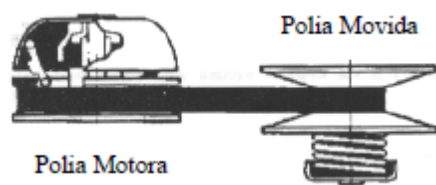


Figura 3.4 - Configuração de máxima velocidade (menor relação de transmissão) [Comet Industries]

3.2. Modelagem da polia motora

3.2.1. Introdução

Nesse presente trabalho será realizada a modelagem dinâmica da polia motora da TCV em estudo (*Comet Industries* modelo 790), ilustrada na Figura 3.5 e na Figura 3.6. Para tanto, as seguintes hipóteses simplificadoras foram adotadas:

- Foi considerado que não há estiramento da correia;

- Não há escorregamento da correia na polia motora.



Figura 3.5 - Polia motora da TCV

A TCV motora é composta por três roletes dispostos a 120° uns dos outros, conforme pode ser observado pela Figura 3.5 e pela Figura 3.6. Cada um desses roletes realiza um movimento angular, possuindo como ponto de pivotamento a sua fixação ao disco móvel da polia motora. Além disso, duas molas torcionais estão localizadas nesse ponto de fixação e realizam um momento de resistência ao movimento angular de cada rolete.



Figura 3.6 - Vista superior da polia motora da TCV

As posições inicial e final, tanto dos roletes, como também do disco móvel e da correia estão ilustrados na Figura 3.7.

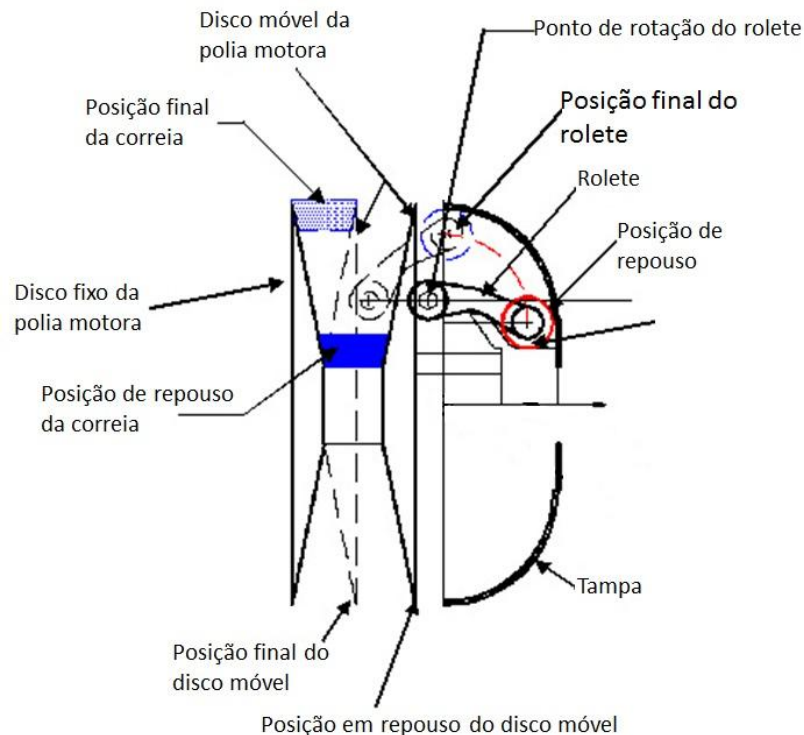


Figura 3.7 – Posições de componentes da polia motora da TCV [Allen, 2003]

A Figura 3.8 ilustra a polia motora da TCV analisada com o sistema de coordenadas utilizado para a modelagem de tal componente. Esse sistema foi escolhido de tal sorte que simplifique a determinação do comportamento dinâmico analisado, tendo em vista que essa modelagem será realizada a partir da aplicação das equações de Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_q \quad (3.1)$$

Sendo:

L : função Lagrangeana do sistema;

q : coordenadas generalizadas;

F_q : força generalizada.

A função Lagrangeana do sistema é definida como sendo a diferença entre as funções energia cinética (T) e energia potencial (V). Logo:

$$L = T - V \quad (3.2)$$

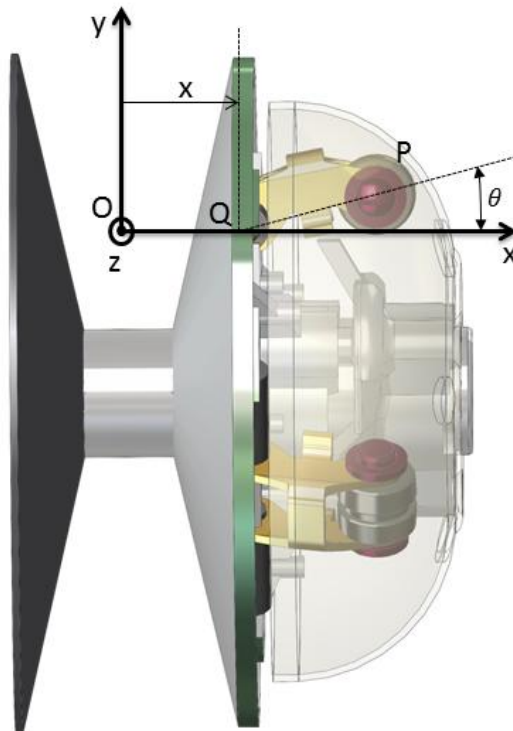


Figura 3.8 - Sistemas de coordenadas utilizado para elaboração das equações de Lagrange

Algumas considerações devem ser tomadas em relação à Equação de Lagrange. Segundo Wells (1967), para um sistema de n graus de liberdade, apenas n coordenadas (e suas derivadas em relação ao tempo) devem aparecer em L , ou seja, coordenadas supérfluas devem ser eliminadas.

Ainda segundo o mesmo autor, uma força generalizada não é sempre uma força no sentido usual da palavra. Se, por exemplo, a coordenada generalizada é um ângulo, a força generalizada será um momento de força, de forma que o produto entre a coordenada generalizada e a força generalizada resulte em trabalho.

Wells (1967) ainda explicita que a força generalizada F_q não é geralmente constante e pode variar com o tempo, velocidade, entre outros. De qualquer maneira,

as expressões para essa força devem ser conhecidas a partir da natureza do problema em questão.

Antes de se iniciar a modelagem do sistema, é importante que o sistema de coordenadas seja definido de maneira conveniente. Deste modo, a origem do sistema de coordenadas O está situada no plano médio entre os planos dos discos da polia, de maneira que quando o disco móvel (disco da direita na Figura 3.8) atinja a posição mais próxima possível do disco fixo (disco da esquerda) o valor da distância x , que representa a distância entre o ponto Q (extremidade fixa da haste ao disco móvel) e a origem do sistema de coordenadas (ponto O), é zero. O ponto P é o ponto de contato entre a extremidade livre da haste e a superfície interna da tampa. Já o ângulo θ representa a inclinação da haste em relação ao eixo x do sistema de coordenadas.

3.2.2. Cálculo da função Lagrangeana

Para o cálculo da energia cinética, será considerada a seguinte simplificação: a massa da haste está concentrada no corpo cilíndrico, denominado rolete, situado no ponto P (extremidade livre da haste). Desse modo, a energia cinética total do sistema é descrita como sendo:

$$T = 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot |\overrightarrow{V_P}|^2 + \frac{1}{2} \cdot J_O \cdot \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}^2 \quad (3.3)$$

Onde:

m : massa do rolete [kg];

M : massa do disco móvel da polia motora [kg];

$\dot{x}$: velocidade do deslocamento do disco móvel da polia motora [m/s];

V_P : velocidade absoluta do ponto P [m/s];

J_O : momento de inércia do disco móvel da polia motora em relação à origem do sistema de coordenadas O [kg · m²];

$\dot{\phi}$: rotação do motor [rad/s].

A velocidade absoluta do ponto P pode ser obtida através da seguinte relação:

$$\vec{V}_P = \vec{V}_Q + \vec{\Omega} \wedge (P - Q) \quad (3.4)$$

Sabendo-se que:

V_Q : velocidade absoluta do ponto Q [m/s];

Ω : rotação absoluta da haste PQ [rad/s];

$(P - Q)$: vetor posição relativa entre os pontos P e Q [m].

A velocidade absoluta do ponto Q pode ser decomposta em uma parcela de velocidade relativa ($V_{Q,r}$) e outra parcela de velocidade de arrastamento ($V_{Q,a}$).

$$V_Q = V_{Q,r} + V_{Q,a} = \dot{x} \vec{i} + \dot{\phi} \vec{i} \wedge (Q - O) = \dot{x} \vec{i} + \dot{\phi} \vec{i} \wedge x \vec{i} = \dot{x} \vec{i} \quad (3.5)$$

Já o vetor de rotação absoluta da haste PQ (Ω) leva em consideração sua rotação relativa à polia e a rotação da polia (parcela de rotação de arrastamento):

$$\vec{\Omega} = \dot{\phi} \vec{i} + \dot{\theta} \vec{k} \quad (3.6)$$

O vetor $(P - Q)$ é dado pela Equação (3.7) abaixo, na qual r é o comprimento da haste.

$$(P - Q) = (r \cdot \cos\theta) \vec{i} + (r \cdot \sin\theta) \vec{j} \quad (3.7)$$

Deste modo, tem-se finalmente:

$$\vec{V}_P = \dot{x} \vec{i} + (\dot{\phi} \vec{i} + \dot{\theta} \vec{k}) \wedge [(r \cdot \cos\theta) \vec{i} + (r \cdot \sin\theta) \vec{j}] \quad (3.8)$$

$$\vec{V}_P = (\dot{x} - \dot{\theta} \cdot r \cdot \sin\theta) \vec{i} + \dot{\theta} \cdot r \cdot \cos\theta \vec{j} + \dot{\phi} \cdot r \cdot \sin\theta \vec{k} \quad (3.9)$$

Portanto:

$$|\overrightarrow{V_P}|^2 = \dot{x}^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot r \cdot \sin\theta + \dot{\theta}^2 \cdot r^2 + \dot{\phi}^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2\theta \quad (3.10)$$

Finalmente, pode-se escrever a energia cinética do sistema em função de x , θ e ϕ . A rotação do motor (ϕ) é função conhecida do tempo e também é entrada do sistema.

$$T = \frac{3}{2} \cdot m \cdot (\dot{x}^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot r \cdot \sin\theta + \dot{\theta}^2 \cdot r^2 + \dot{\phi}^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2\theta) + \frac{1}{2} \cdot J_O \cdot \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}^2 \quad (3.11)$$

A partir da observação da Figura 3.7, percebe-se que a massa do rolete, presente na extremidade livre (ponto P) da haste realiza um movimento circular cujo centro é o ponto Q . Logo:

$$x_P^2 + y_P^2 = r^2 \quad (3.12)$$

Onde:

r : comprimento da haste [m].

Do sistema de coordenadas adotado, tem-se que:

$$x_P = x_Q + r \cdot \cos\theta = x + r \cdot \cos\theta \quad (3.13)$$

$$y_P = y_Q + r \cdot \sin\theta = r \cdot \sin\theta \quad (3.14)$$

Deste modo, a equação de vínculo holônomo, ou seja, a equação que determina o movimento do ponto P pode ser escrita como:

$$x^2 + 2 \cdot r \cdot x \cdot \cos\theta = 0 \quad (3.15)$$

Isolando o ângulo θ , temos uma relação entre o ângulo θ e o deslocamento do disco móvel x :

$$\cos\theta = \frac{-x^2}{2 \cdot r \cdot x} = \frac{-x}{2 \cdot r} \quad (3.16)$$

Para que a equação da energia cinética do sistema seja escrita em função apenas da única coordenada generalizada, ou seja, θ , é necessário derivar a equação (3.15) obtida anteriormente:

$$\dot{x} = 2 \cdot r \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta \quad (3.17)$$

Finalmente, substituindo a Equação (3.17) na Equação (3.11):

$$T = \frac{3}{2} \cdot m \cdot (\dot{\theta}^2 \cdot r^2 + \dot{\phi}^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2\theta) + \frac{1}{2} \cdot J_o \cdot \dot{\phi}^2 + 2 \cdot M \cdot r^2 \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin^2\theta \quad (3.18)$$

Já o cálculo da energia potencial é mais simples e está descrito abaixo:

$$V = 3 \cdot 2 \cdot \frac{K_\theta \cdot \theta^2}{2} = 3 \cdot K_\theta \cdot \theta^2 \quad (3.19)$$

Na equação (3.19) o número 3 se refere aos três roletes presentes na polia motora e o número 2 representa as duas molas torcionais situadas na base de cada rolete, atuando paralelamente.

Finalmente, pode-se escrever a expressão da função Lagrangeana, substituindo-se as equações (3.18) e (3.19) na equação (3.2) e rearranjando da maneira mais conveniente:

$$L = \left(\frac{3}{2} \cdot m \cdot r^2 + 2 \cdot M \cdot r^2 \cdot \sin^2\theta \right) \cdot \dot{\theta}^2 - 3 \cdot K_\theta \cdot \theta^2 + \frac{1}{2} \cdot (3 \cdot m \cdot r^2 \cdot \sin^2\theta + J_o) \cdot \dot{\phi}^2 \quad (3.20)$$

3.2.3. Cálculo da força generalizada

Como a coordenada generalizada é o ângulo θ , a força generalizada é, na realidade, o trabalho realizado pelas forças que atuam no sistema em deslocamentos compatíveis com os vínculos.

Observando o sistema analisado (Figura 3.9), percebe-se que a força normal (F_N) que atua na extremidade móvel do rolete (ponto P) não realiza trabalho no deslocamento angular da haste. Porém, a força normal de compressão que a correia exerce sobre o disco móvel da polia motora (N) exerce trabalho, deslocando o disco móvel na direção da coordenada x , que embora não seja uma coordenada generalizada, possui relação com a coordenada θ (equação do vínculo holônomo: Equação (3.15)).

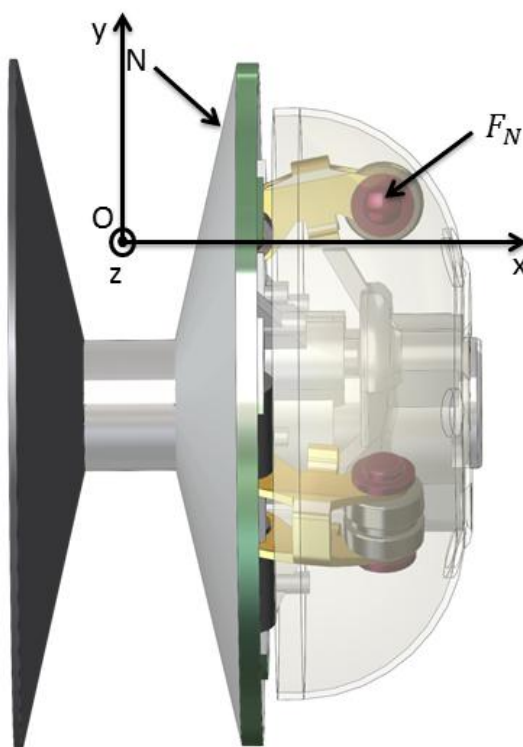


Figura 3.9 - Força normal aplicada no rolete e força normal de compressão da correia

Sendo assim, é possível escrever a expressão do trabalho realizado pela força de compressão que a correia exerce sobre o disco (N):

$$\delta W = N \cdot \cos(\varphi/2) \cdot \delta x \quad (3.21)$$

Porém, como a coordenada generalizada é o ângulo θ , existe a necessidade de se determinar uma expressão que substitua o deslocamento axial δx em deslocamento angular $\delta\theta$. A partir da equação (3.15), tem-se:

$$\delta x = 2 \cdot r \cdot \sin\theta \cdot \delta\theta \quad (3.22)$$

Finalmente, é possível determinar a força generalizada que atua no sistema:

$$\delta W = F_\theta \cdot \delta\theta = 2 \cdot r \cdot N \cdot \cos(\varphi/2) \cdot \sin\theta \cdot \delta\theta \quad (3.23)$$

$$F_\theta = 2 \cdot r \cdot N \cdot \cos(\varphi/2) \cdot \sin\theta \quad (3.24)$$

Uma estimativa da força normal de compressão que a correia exerce sobre o disco móvel da polia motora (N) pode ser realizada através de um estudo da transmissão por correias. A Figura 3.10 ilustra as forças atuando em uma polia. A força “centrífuga” (F_i) na corria pode ser desprezada.

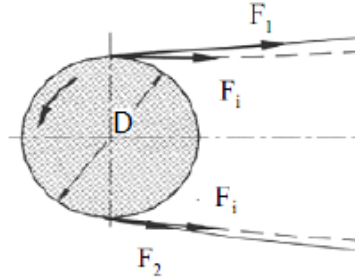


Figura 3.10 - Forças atuando na polia

Para uma correia de perfil V, temos a seguinte relação:

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\frac{\mu \cdot \theta_{ab}}{\sin(\varphi/2)}} \quad (3.25)$$

Onde:

μ : coeficiente de atrito entre a correia de borracha e a polia motora;

θ_{ab} : ângulo de abraçamento entre a correia e a polia motora.

$$\theta_{ab} = \pi - 2 \cdot \arcsen\left(\frac{D_{MOV} - D_{MOT}}{2 \cdot C}\right) \quad (3.26)$$

Sendo:

D_{MOV} : diâmetro da polia movida [m];

C : distância entre centros das polias motora e movida da TCV [m].

Outra equação conhecida da transmissão por correias é dada a seguir e utilizará a potência e a rotação do motor para o ponto onde o torque do mesmo é máximo. Também será levado em consideração o raio máximo da polia motora da TCV. Deste modo, a diferença entre as forças será maximizada.

$$F_1 - F_2 = \frac{P_{T_{m\acute{a}x}} \cdot K}{r_{m\acute{a}x} \cdot n_{T_{m\acute{a}x}}} \quad (3.27)$$

Onde:

$P_{T_{m\acute{a}x}}$: potência na rotação de máximo torque do motor [HP];

$n_{T_{m\acute{a}x}}$: rotação de máximo torque do motor [rpm];

$r_{m\acute{a}x}$: raio máximo da polia motora [m];

K : coeficiente que ajusta as unidades de medidas adotadas na equação [$K = 7100$].

A partir da curva de torque (Figura 3.11) e da curva de potência (Figura 3.12) do motor do veículo Baja SAE, motor de combustão interna Briggs&Straton 10 HP movido a gasolina, obtêm-se os valores de $n_{T_{m\acute{a}x}} = 3350 \text{ rpm}$ e $P_{T_{m\acute{a}x}} = 10,5 \text{ HP}$. As duas curvas foram obtidas através de ensaios em dinamômetro inercial de bancada.

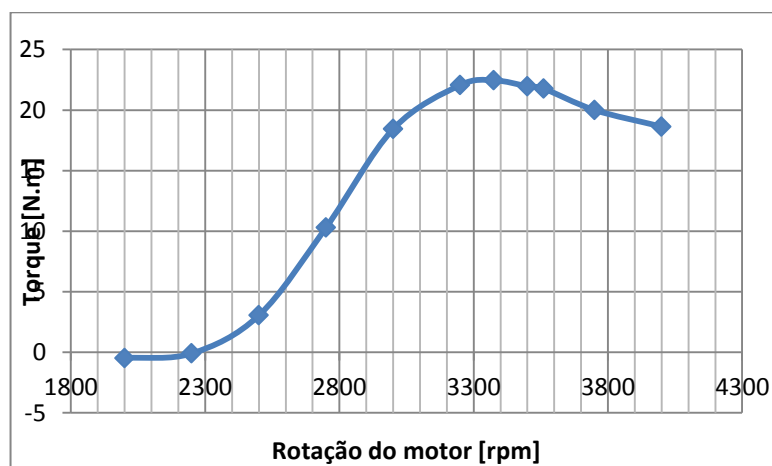


Figura 3.11 - Curva de torque do motor

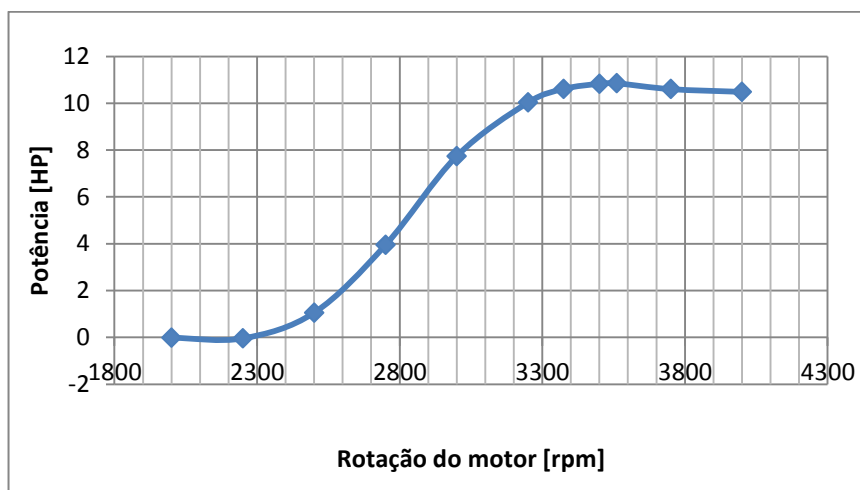


Figura 3.12 - Curva de potência do motor

O raio máximo da polia motora é conhecido e vale $r_{m\acute{a}x} = 87,5 \text{ mm}$. Substituindo os valores encontrados na Equação (3.23):

$$F_1 - F_2 = 254,3 \text{ N} \quad (3.28)$$

Como o valor máximo da polia motora ($D_{MOT} = 175 \text{ mm}$) está sendo utilizado e, portanto, a TCV está transmitindo sua menor relação de transmissão, o valor do raio da polia movida é mínimo ($D_{MOV} = 90 \text{ mm}$). A distância entre centros das polias da TCV ($C = 314 \text{ mm}$) também é conhecida e, portanto, na Equação (3.22) tem-se:

$$\theta_{ab} = 3,413 \text{ rad} = 195,5^\circ \quad (3.30)$$

O valor do ângulo da seção da correia em V é dado a partir do projeto das polias motora e movida e vale $\varphi = 26^\circ$. Já o coeficiente de atrito entre a borracha (material da correia) e o aço (material da polia motora) vale aproximadamente $\mu = 0,75$. Substituindo os valores encontrados na Equação (3.21), determina-se:

$$\frac{F_1}{F_2} = 87477,9 \quad (3.31)$$

Substituindo na Equação (3.24):

$$F_2 = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cong 0 \text{ N} \quad (3.32)$$

$$F_1 = 254,3 \text{ N} \quad (3.33)$$

O valor da força normal de compressão que a correia exerce sobre o disco móvel da polia motora é dado por:

$$N = \max(F_1, F_2) \cdot \mu = 190,73 \text{ N} \quad (3.34)$$

3.2.4. Equação diferencial de movimento do sistema

Para determinar a equação que rege a dinâmica do sistema é necessário substituir na Equação de Lagrange (Equação (3.1)) a expressão obtida para a função Lagrangeana do sistema (Equação (3.20)) e a Equação (3.24) obtida para a força generalizada. Primeiramente, resolvendo as derivadas parciais:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = (3 \cdot m \cdot r^2 + 4 \cdot M \cdot r^2 \cdot \sin^2 \theta) \cdot \dot{\theta} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) &= (3 \cdot m \cdot r^2 + 4 \cdot M \cdot r^2 \cdot \sin^2 \theta) \cdot \ddot{\theta} + \\ &+ 8 \cdot M \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta} &= 4 \cdot M \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2 - 6 \cdot K_{\theta} \cdot \theta + \\ &+ 3 \cdot m \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\phi}^2 \end{aligned} \quad (3.37)$$

Finalmente, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} &= F_{\theta} \rightarrow \\ (3 \cdot m \cdot r^2 + 4 \cdot M \cdot r^2 \cdot \sin^2 \theta) \cdot \ddot{\theta} + 4 \cdot M \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2 + \\ + 6 \cdot K_{\theta} \cdot \theta - 3 \cdot m \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\phi}^2 &= \\ = 2 \cdot r \cdot N \cdot \cos(\varphi/2) \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (3.38)$$

Ao se observar a equação (3.38) que rege o sistema analisado, percebe-se que a inércia rotacional da polia motora da TCV ($\frac{1}{2} \cdot J_o \cdot \dot{\phi}^2$) não comparece na equação diferencial do referido sistema, pois sua rotação $\dot{\phi}$ é conhecida.

Também é possível constatar que a equação diferencial obtida é não linear e depende de θ , da força normal de compressão que a correia exerce sobre o disco móvel da polia motora (N) e da rotação do motor $\dot{\phi}$. A rotação do motor, porém, não é constante, mas sim uma função variante do tempo, que é conhecida. Tal função pode ser obtida, por exemplo, através do comportamento da rotação do motor quando o veículo percorre uma pista de 100 metros, ou em uma subida de rampa com inclinação conhecida.

Cabe ressaltar que uma vez que o comportamento dinâmico da TCV como um todo, envolvendo a polia movida e as forças resistivas ao deslocamento do veículo, não foi realizado, o valor da força de compressão que a correia exerce sobre a polia (N) foi estimado e, portanto, a simulação da equação (3.38) resultaria em determinar a posição angular de equilíbrio do rolete na situação em que a força normal apresenta o valor estimado.

Para analisar o deslocamento axial do disco móvel da polia motora, deve-se utilizar a equação (3.16), de posse dos valores obtidos através da solução da equação diferencial obtida em (3.38).

A partir da Figura 3.13 é possível determinar a função que relaciona o deslocamento axial do disco móvel (x) com o raio da polia motora, ou seja, a posição da correia no sulco formando entre os discos móvel e fixo da polia motora em um dado instante, de acordo com a Equação (3.39).

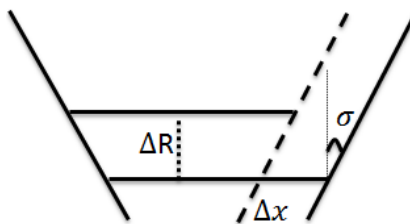


Figura 3.13 - Relação entre deslocamento axial do disco móvel e a diferença do raio da polia motora

$$tg(\sigma) = \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta R} \quad (3.39)$$

Onde:

σ - ângulo de inclinação dos discos das polias.

Finalmente, tem-se:

$$R_{MOT} = R_{MOT_{min}} + \left(\frac{\Delta x}{2 \cdot tg(\sigma)} \right) \quad (3.40)$$

Os raios da polia motora e da polia movida (não estudada nesse trabalho) determinarão a relação de transmissão da TCV. Sendo assim, seria possível determinar a curva de relação de transmissão da TCV em função do tempo (curva característica da TCV) teoricamente.

4. OBTENÇÃO DA CURVA DE RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO DA TCV

A relação de transmissão da TCV pode ser calculada a partir da relação entre as rotações das polias motora e movida. A medição da rotação da polia motora pode ser realizada a partir da rotação do motor, através de um sensor indutivo que medirá o pulso de tensão proveniente do cabo de vela do motor. Já a rotação da polia movida pode ser medida a partir de um sensor de efeito Hall, acoplado diretamente na polia movida ou caso a medição ocorra com o veículo em movimento, acoplado ao semieixo ou até mesmo à roda do veículo. Caso o posicionamento do sensor seja utilizado no semieixo ou na roda do veículo, a rotação da polia movida seria obtida multiplicando-se a rotação medida pela relação de transmissão da caixa de engrenagens, que é conhecida, ou seja:

$$\omega_{mov} = \omega_{roda} \cdot i_{caixa}$$

4.1. Métodos de obtenção da curva

Duas possibilidades para a obtenção da curva que relaciona a relação de transmissão da TCV em função da rotação do motor (curva da TCV) foram propostas:

- Ensaio do trem de força em bancada;
- Ensaio do veículo com sensores embarcados.

A seguir serão explicadas cada uma das possibilidades e suas vantagens e desvantagens.

4.1.1. Ensaio do trem de força em bancada

Para obter a curva da TCV a partir do ensaio do trem de força em bancada, seria necessária a construção da mesma, além de sua instrumentação (sensores e sistemas de gravação de dados).

Nessa bancada de testes estariam presentes: o motor do veículo, a polia motora da TCV (montada no motor), a polia movida da TCV (montada em um eixo) e algum sistema de freio que simulasse o torque resistivo ao movimento do veículo, como por exemplo, um freio de Prony ou um freio a disco, adaptado de um veículo. A Figura 4.1 ilustra uma bancada de testes utilizada por uma equipe de Baja da *Universidad Simon Bolívar*, da Venezuela, para a obtenção da curva da TCV.



Figura 4.1 - Bancada de teste para obtenção da curva da TCV [Martínez et al., 2010]

Algumas vantagens dessa possibilidade de obtenção da curva da TCV são:

- Variação da distância entre centros das polias da TCV;
- Aquisição de dados em ambiente controlado;
- Possibilidade de medição do torque da TCV.

Porém também existem desvantagens:

- Construção da bancada de testes;
- O comportamento registrado da TCV pode ser diferente do comportamento real da mesma quando em operação no veículo, dado que as forças resistivas ao movimento do veículo seriam impostas ao sistema.

Conclui-se, portanto, que este é um método válido para a obtenção da curva da TCV, porém pode ser mais custoso e não tão eficaz.

4.1.2. Ensaio do veículo com sensores embarcados

Outra possibilidade para a obtenção da curva da TCV é a medição dos dados necessários com o veículo em operação. Para tal, seria necessário que o veículo estivesse montado e em condições normais de operação e que o mesmo pudesse trafegar numa pista de testes. Caso esse ensaio fosse escolhido, seria possível simular uma prova da competição Baja SAE Brasil, na qual o carro deve acelerar em uma pista pavimentada de 100 metros, obtendo-se o tempo para percorrer os 30 metros iniciais (tempo de aceleração, medido em segundos), e a velocidade final ao término da pista (medida em km/h), conforme ilustra a Figura 4.2.



Figura 4.2 - Prova de aceleração e velocidade

Sendo assim, as vantagens desse sistema de medição são:

- Testar o carro e o piloto em uma prova da competição;
- Obter a curva da TCV com o torque resistivo real imposto ao veículo.

E as desvantagens seriam:

- Necessidade de montar o veículo inteiro para a realização dos testes;
- Sensores e sistema de aquisição de dados mais suscetíveis a quebras, uma vez que estariam em ambiente inóspito.

Portanto, esse sistema de medição estaria mais sujeito à quebra dos sensores e necessitaria da montagem do veículo como um todo, porém resulta numa curva da relação de transmissão da TCV o mais próxima possível da real, ou seja, quando o veículo está em operação.

4.2. Escolha do método de obtenção da curva da relação de transmissão da TCV

Para a escolha dentre um dos dois métodos de obtenção propostos decidiu-se pelo uso de uma matriz de decisão que considera os seguintes critérios:

- CUSTOS – todos os custos envolvidos na compra e fabricação de todo o aparato experimental;
- FABRICAÇÃO – simplicidade na fabricação e montagem do aparato experimental;
- CONFIABILIDADE – quão livres dos efeitos de parâmetros não controlados os dados estão;
- DURABILIDADE – durabilidade do aparato experimental;
- APLICABILIDADE – quão próximo do comportamento real os dados estão para que possam ser facilmente inseridos no modelo computacional.

A pesagem dos critérios (Tabela 4.1) foi feita atribuindo pesos de 0 a 10 para os critérios e normalizando, obtendo a seguinte pesagem:

Tabela 4.1 - Pesagem dos critérios

CRITÉRIO	PESO	PESO NORM.
APLICABILIDADE	10	2,17
CONFIABILIDADE	10	2,17
CUSTOS	9	1,96
DURABILIDADE	9	1,96
FABRICAÇÃO	8	1,74
TOTAL	46	10

Para cada critério foi atribuída uma nota 10 para o melhor método proposto e uma nota proporcional ao outro método, obtendo a matriz de decisão presente na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Matriz de decisão

CRITÉRIO	PESO	BANCADA		EMBARCADO	
		NOTA	NOTA*PESO	NOTA	NOTA*PESO
APLICABILIDADE	2,17	7	15,22	10	21,74
CONFIABILIDADE	2,17	10	21,74	8	17,39
CUSTOS	1,96	8	15,65	10	19,57
DURABILIDADE	1,96	10	19,57	9	17,61
FABRICAÇÃO	1,74	7	12,17	10	17,39
TOTAL	10,00		84,35		93,70

Conclui-se que o melhor método a ser utilizado é o do veículo com os sensores embarcados.

4.3. Aparato experimental

Nessa seção serão descritos os aparatos utilizados para a medição, aquisição e armazenamento dos dados, além das adaptações a serem realizadas no veículo para o posicionamento adequado dos sensores.

4.3.1. Sensor de rotação da polia motora

Duas opções foram propostas para a escolha do sensor de rotação da polia motora: sensor indutivo, que mede os pulsos de tensão da vela do motor ou um sensor de efeito Hall, que mede a rotação da polia motora através do princípio de fuga de fluxo magnético. Devido a sua maior facilidade de instalação e aplicação decidiu-se pelo uso do sensor indutivo.

O sensor indutivo é capaz de medir a rotação do motor, por meio da identificação dos pulsos de tensão, gerados no instante do centelhamento na vela de ignição. Esse sensor possui uma garra indutiva que deve ser posicionada no cabo de vela, distanciada do terminal aproximadamente 150 milímetros.

Quando uma centelha é gerada, uma corrente elétrica percorre o circuito de alta tensão, criando um campo magnético circular ao redor do cabo de vela. Esse campo magnético penetra no enrolamento da garra indutiva, induzindo, no circuito receptor do sensor, uma pequena corrente elétrica. Os sucessivos centelhamentos geram pulsos de tensão na garra indutiva, permitindo ao sensor, por meio de um circuito contador, identificar a rotação do motor. A Figura 4.3 exemplifica a montagem desse sensor no cabo de vela do motor.

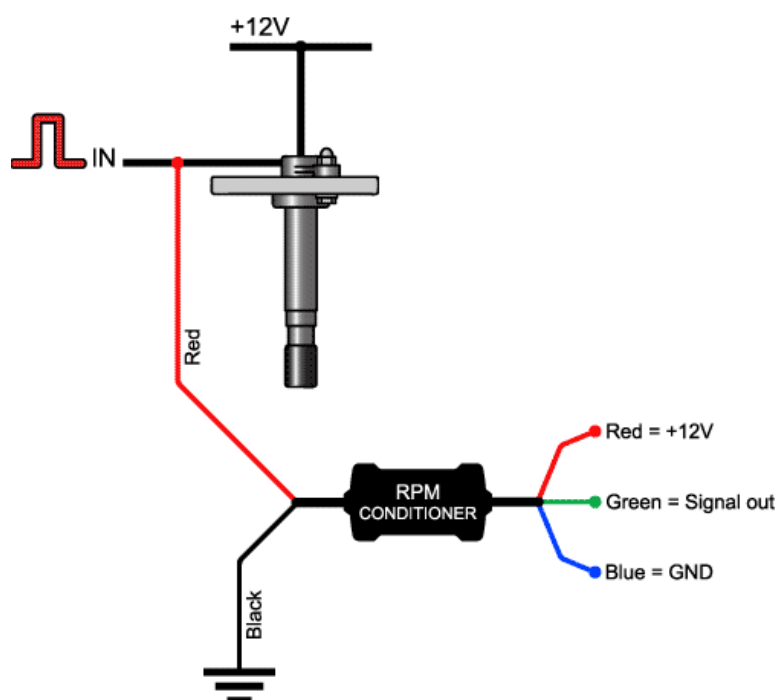


Figura 4.3 – Instalação do sensor indutivo

4.3.2. Sensor de rotação da polia movida

Para medição da rotação da polia movida só se dispõem do sensor de efeito Hall. Um sensor de efeito Hall (Figura 4.4) é um transdutor que varia a sua tensão de saída em resposta a mudanças no campo magnético. Na sua forma mais simples, o sensor opera como um transdutor analógico, retornando diretamente a tensão. O sensor consiste de uma pequena chapa de material semiconductor, através da qual passa uma corrente, montada em frente a um ímã que produz um campo magnético de magnitude aproximadamente uniforme. Como resultado, é gerado um sinal de

tensão transversal conhecida como tensão Hall. Quando outro dispositivo (outra chapa metálica de elevada permeabilidade magnética), preso ao eixo, passa próximo ao ímã e à chapa semicondutora, anulando o campo, a tensão de saída do sensor cai à zero. Isso produz como sinal de saída um pulso de forma aproximadamente quadrada, que pode ser utilizado por um sistema de aquisição de dados (*datalogger*) para medir a rotação do eixo.



Figura 4.4 - Sensor de efeito Hall

Como comentado anteriormente a rotação da polia movida pode ser medida diretamente no seu eixo ou em algum outro ponto após a caixa de redução onde a relação é fixa devido à transmissão por engrenagens. Pela facilidade de instalação do alvo e do sensor optou-se pelo uso do eixo de saída da caixa de redução para alocação do sistema.

Decidiu-se pela fabricação de uma roda dentada, que consiste de uma roda com vários alvos (dentes), em aço 1020, já que o sensor necessita de um alvo em material ferroso para funcionar. A roda dentada será afixada no eixo através de dois parafusos M6.

O fabricante aconselha um tamanho mínimo do alvo obtido através da fórmula:

$$l_{min} = \frac{RPM \cdot D}{20000}$$

Onde l_{min} é o tamanho mínimo em milímetros do alvo, RPM é a máxima rotação que o alvo atinge e D é o raio em milímetros na qual o alvo gira.

Sendo a rotação máxima do motor de 3800 RPM (calibrado para tal, uma vez que as regras da competição determinam essa rotação como a máxima permitida), a menor relação de transmissão da TCV de 0,54:1 e a relação de transmissão da caixa de redução de 7,6:1 (levando a uma rotação máxima de 930 RPM no eixo de saída da caixa de redução) e o diâmetro da roda dentada de 100 mm (máximo diâmetro possível no local) obtém-se um tamanho mínimo de alvo de 4,37 mm. Optou-se por uma roda dentada com 14 dentes levando a um alvo com 10,5 mm. As demais medidas foram obtidas levando em conta sugestões do fabricante e espaço físico disponível obtendo a configuração final como vista na Figura 4.5.

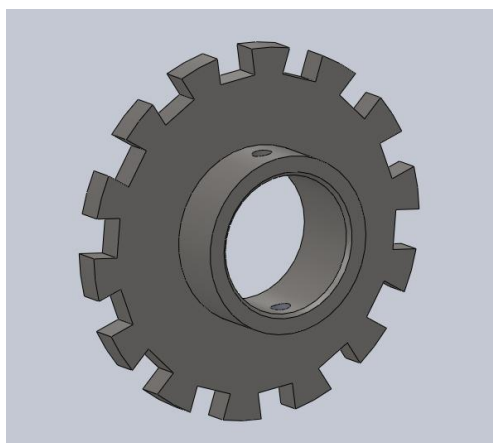


Figura 4.5 - Configuração final da roda dentada

O fabricante ainda limita o espaçamento entre o sensor e o alvo (*gap*) em 2 mm. Para tanto o suporte do sensor tem que ser robusto e posicionado de forma a não estar sujeito a intensas vibrações que poderiam tanto afastar o sensor do alvo, levando a medições incorretas, quanto aproximar, levando ao contato do sensor com o alvo e deteriorando o sensor. A Figura 4.6 mostra a montagem proposta e a Figura 4.7 o espaçamento entre sensor e roda dentada. Ambas figuras foram retiradas do modelo em CAD do veículo.

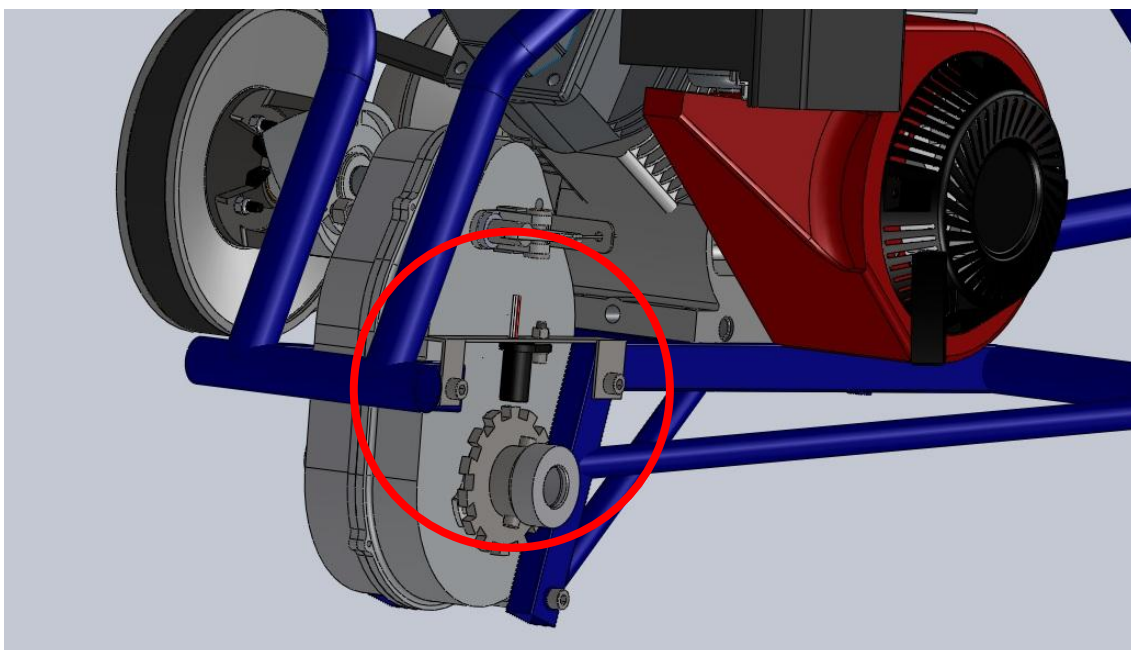


Figura 4.6 - Montagem do sensor de efeito Hall e roda dentada ao eixo de saída da caixa de redução

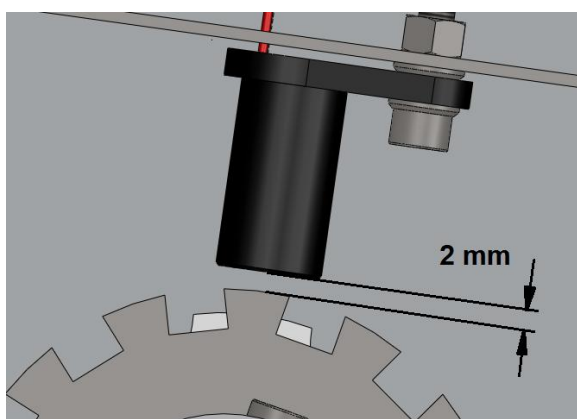


Figura 4.7 - Espaçamento entre o sensor de efeito Hall e o alvo

4.3.3. Sistema de aquisição de Dados (*Datalogger*)

Um sistema de aquisição de dados é um aparelho eletrônico que grava dados em relação ao tempo ou em relação a uma localização, seja por instrumentos ou sensores internos ou externos. Geralmente, tais sistemas são pequenos, alimentados por baterias, portáteis, equipados com um microprocessador, memória interna para acúmulo de dados, e sensores.

O sistema de aquisição de dados escolhido é o modelo DL1 da marca “Race-Technology” (Figura 4.8), compatível com os sensores previamente escolhidos. Este sistema de aquisição de dados possui 13 entradas externas, acelerômetros e GPS integrados, além de ser capaz de atualizar todos os seus canais, inclusive a velocidade e a posição, com uma frequência de 100Hz. Esse modelo é capaz de armazenar uma grande gama de dados do veículo para posterior análise através de um computador, dado que não possui um display integrado.



Figura 4.8 - Sistema de aquisição de dados DL1. Fonte: Race Technology

O modelo DL1 é capaz de armazenar dados de diferentes fontes simultaneamente, por exemplo: temperaturas, tempo de volta, rotação das rodas, de eixos, do motor, além de dados precisos provenientes do GPS e de acelerômetros integrados ao *datalogger*.

Com a utilização do GPS integrado é possível medir a velocidade do veículo, além de mapear a pista percorrida pelo mesmo. O mapeamento da pista se dá através de estimativas baseadas na combinação dos dados de aceleração lateral e velocidade.

A instalação do sistema de aquisição de dados no veículo deve ser realizada em uma superfície plana e os dados coletados são armazenados num cartão de memória *flash*.

Para iniciar o armazenamento de dados é necessário pressionar apenas um botão (“*Start/stop logging*”). O fabricante recomenda que uma volta de testes seja realizada anteriormente à tomada de dados. Para terminar o armazenamento o mesmo botão deve ser pressionado.

A análise de dados é efetuada a partir da inserção do cartão de memória em um computador que possua um *software* específico (fornecido pelo fabricante) já instalado.

4.4. Metodologia do teste

4.4.1. Localização do teste

Primeiramente deve ser selecionado o local para a realização dos testes, que deve ser pavimentado, com um percurso de no mínimo 100 metros de reta, além de possuir área de escape, necessária para a manobra e frenagem do veículo. Em atendimento a essas condições, foi selecionada a rua lateral ao Prédio de Engenharia Mecânica e Naval, situada no estacionamento da Escola Politécnica da USP (Figura 4.9), que apresenta pouco movimento de veículos, sendo, portanto, ideal para a realização do teste. É importante ressaltar que a Equipe Poli de Baja possui uma autorização para utilizar esta rua para a realização de testes.

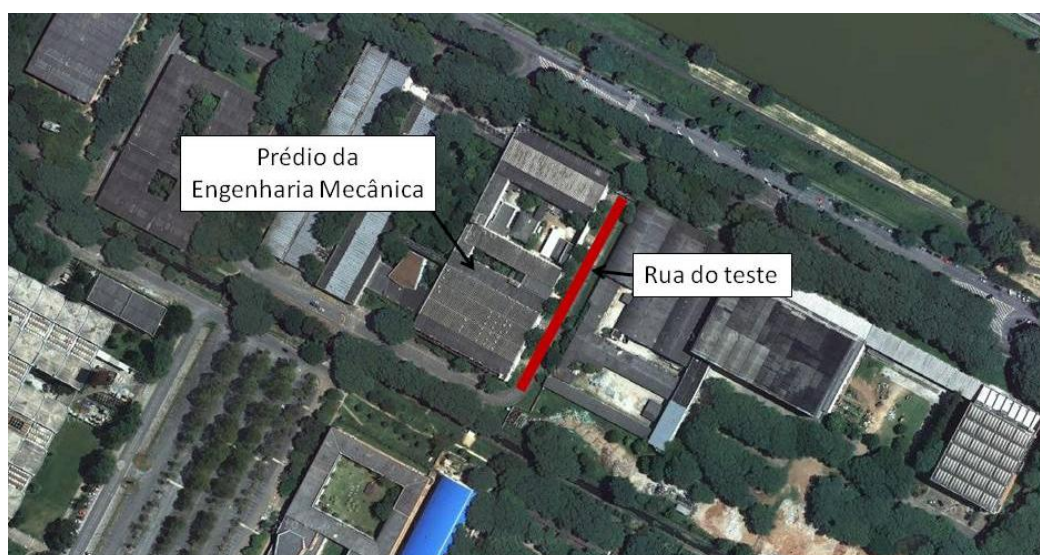


Figura 4.9 – Local da realização do teste

4.4.2. Procedimento de teste

O veículo a ser utilizado será o protótipo Poli Titan, que deverá estar equipado com todos os subsistemas devidamente montados, inclusive as carenagens, pois dessa forma será possível simular mais precisamente o comportamento do veículo na competição.

O veículo estará com a seguinte configuração do trem de força:

Tabela 4.3 - Configuração do trem de força do veículo Poli Titan

PEÇA	CONFIGURAÇÃO
Massas da polia motora	91 gramas
Molas torcionais da polia motora	Amarela
Ângulo do camo da polia movida	41°
Mola da polia movida	Mola 6
Material da polia movida	Alumínio
Pré-tensão da mola da polia movida	Sem pré-tensão
Tampa da polia motora	Tampa 1
Configuração da chapa corta-fogo	Reduzida
Marcha lenta do motor (sem carga)	1800 RPM
Rotação máxima do motor (sem carga)	3800 RPM

As configurações do trem de força indicadas na Tabela 4.3 levaram em consideração a experiência de testes realizados anteriormente, em particular o delineamento de experimentos, que avaliou diversas configurações da TCV do veículo e apresentou como resultado ótimo a configuração descrita acima.

A escolha da marcha lenta do motor leva em consideração o fato de a polia motora estar na eminência do início do seu funcionamento, quando montada segundo as características descritas na tabela acima. Essa configuração de marcha lenta proporciona o funcionamento imediato da TCV do veículo, gerando melhores resultados.

Já a rotação máxima do motor foi determinada devido às regras da competição Baja SAE, que limita a rotação máxima do motor em 3800 RPM, com margem de segurança de 100 RPM.

Os sensores de rotação, assim como o sistema de aquisição de dados, devem estar instalados no veículo.

A curva da relação de transmissão da TCV em função do tempo será obtida seguindo o procedimento de teste ilustrado na Figura 4.2, ou seja, o tempo de operação do veículo será o tempo em que o veículo completou os primeiros 100 metros de pista.

Outras medições também poderão ser efetuadas, como por exemplo, a curva de rotação do motor pela velocidade do veículo.

4.5. Realização dos testes e resultados

Nessa seção estão presentes fotos e resultados dos testes realizados no dia 22 de agosto de 2011 no local ilustrado na Figura 4.9.

A Figura 4.10 ilustra a montagem do sensor de efeito Hall utilizado para medir a rotação do eixo de saída da caixa de transmissão. Este sensor é responsável por medir a rotação da polia movida da TCV.



Figura 4.10 - Montagem do sensor de efeito Hall

Já a Figura 4.11 mostra com detalhes a distância entre o sensor e a roda dentada.



Figura 4.11 - Detalhe de montagem do sensor de efeito Hall

A Figura 4.12, por sua vez, ilustra o veículo realizando o teste na pista citada anteriormente.

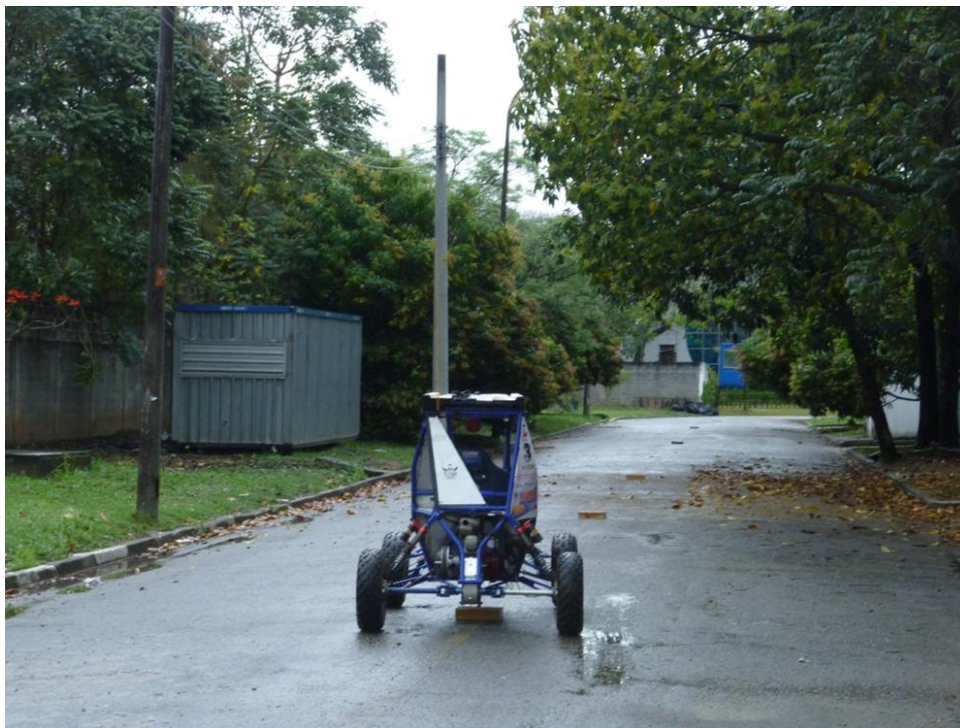


Figura 4.12 - Veículo realizando o teste

A Figura 4.13 ilustra o gráfico da relação de transmissão da TCV em função do tempo, denominada curva característica da TCV.

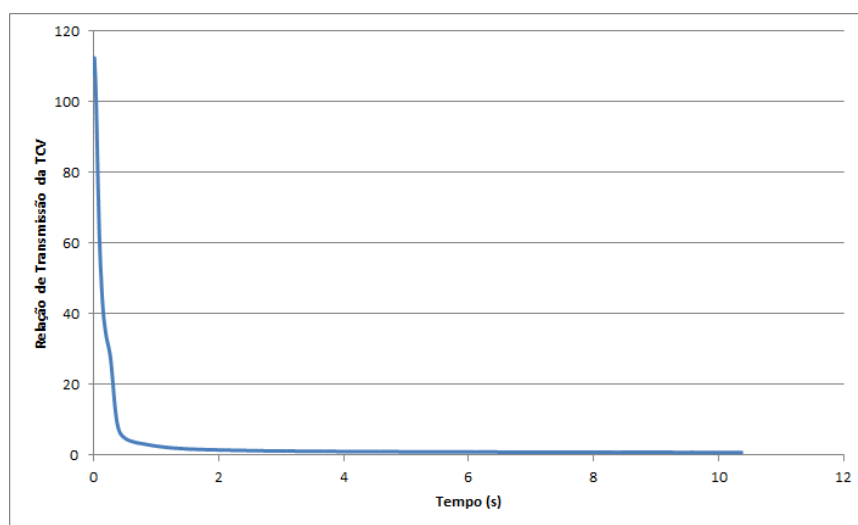


Figura 4.13 - Curva característica da TCV

A partir da observação da Figura 4.13 percebe-se claramente que a TCV sofre escorregamento no início do movimento do veículo, até aproximadamente 0,73 segundos, quando a relação de transmissão da TCV passa ao valor de aproximadamente 3,38, relação de transmissão máxima da TCV segundo o fabricante. Deste modo, a Figura 4.14 ilustra a curva característica da TCV denominada filtrada, em que o início da curva se dá a partir do momento em que a relação de transmissão da TCV atinge o seu valor máximo, segundo o fabricante.

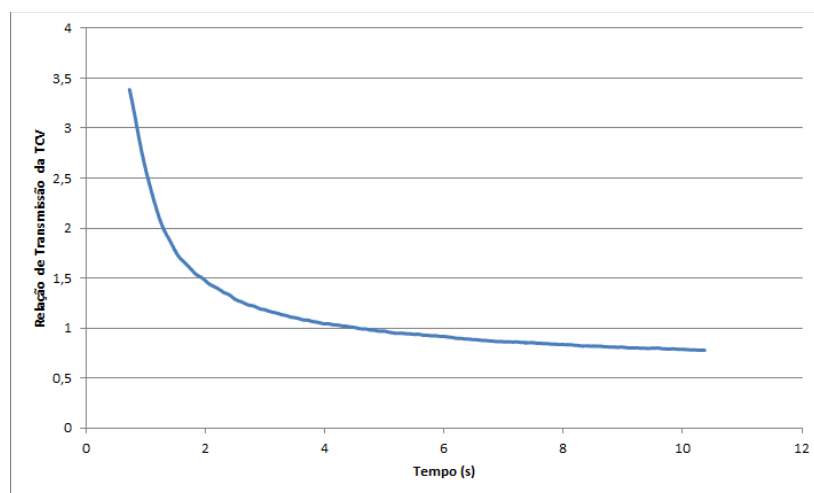


Figura 4.14 - Curva característica da TCV filtrada

Percebe-se também, ao se analisar a Figura 4.14, que a relação de transmissão mínima atingida no decorrer do teste é de aproximadamente 0,77, ou seja, a TCV não atingiu a relação de transmissão mínima de 0,54 (dados do fabricante *Comet Industries*).

Outro gráfico importante para o desenvolvimento do veículo é o gráfico da relação de transmissão a TCV em função da rotação da polia movida, Figura 4.15 e Figura 4.16, sendo que a última figura ilustra o gráfico filtrado.

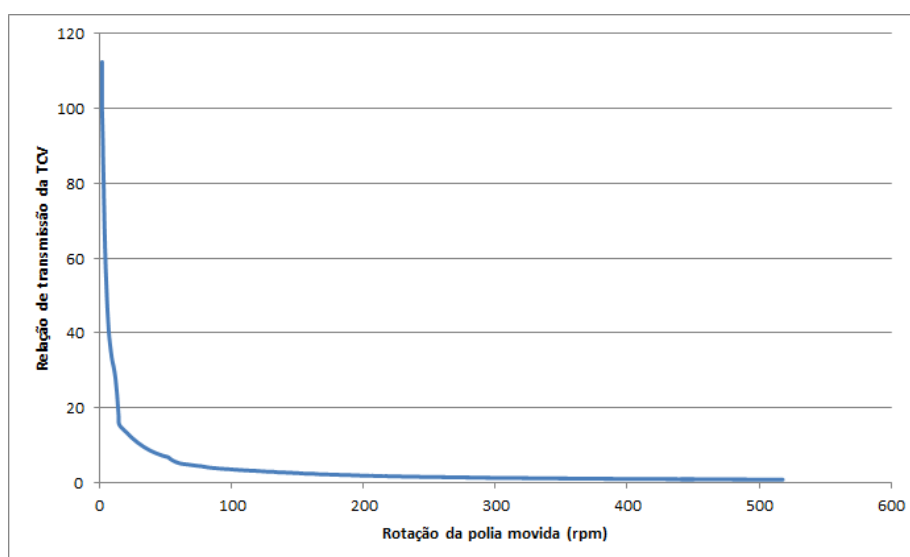


Figura 4.15 - Gráfico da relação de transmissão da TCV em função da rotação da polia movida

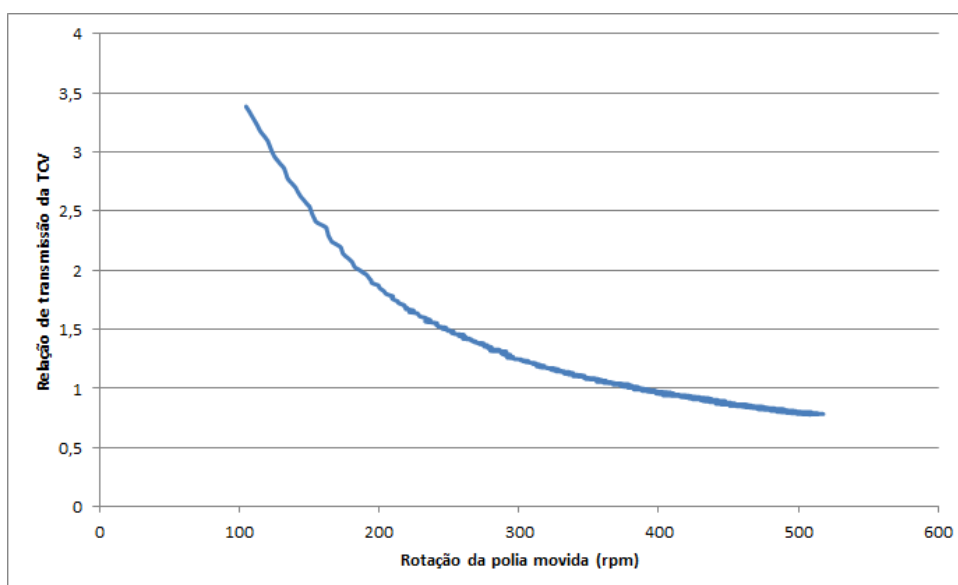


Figura 4.16 - Gráfico filtrado da relação de transmissão da TCV em função da rotação da polia movida

Já a Figura 4.17 ilustra o gráfico da rotação do motor em função da velocidade do veículo. A linha tracejada vermelha indica a velocidade teórica do veículo em função da rotação do motor quando a TCV opera sob a sua maior relação de transmissão, ou seja, 3,38:1. Já a linha tracejada verde indica a velocidade quando a TCV opera sob sua menor relação de transmissão, ou seja, 0,54:1.

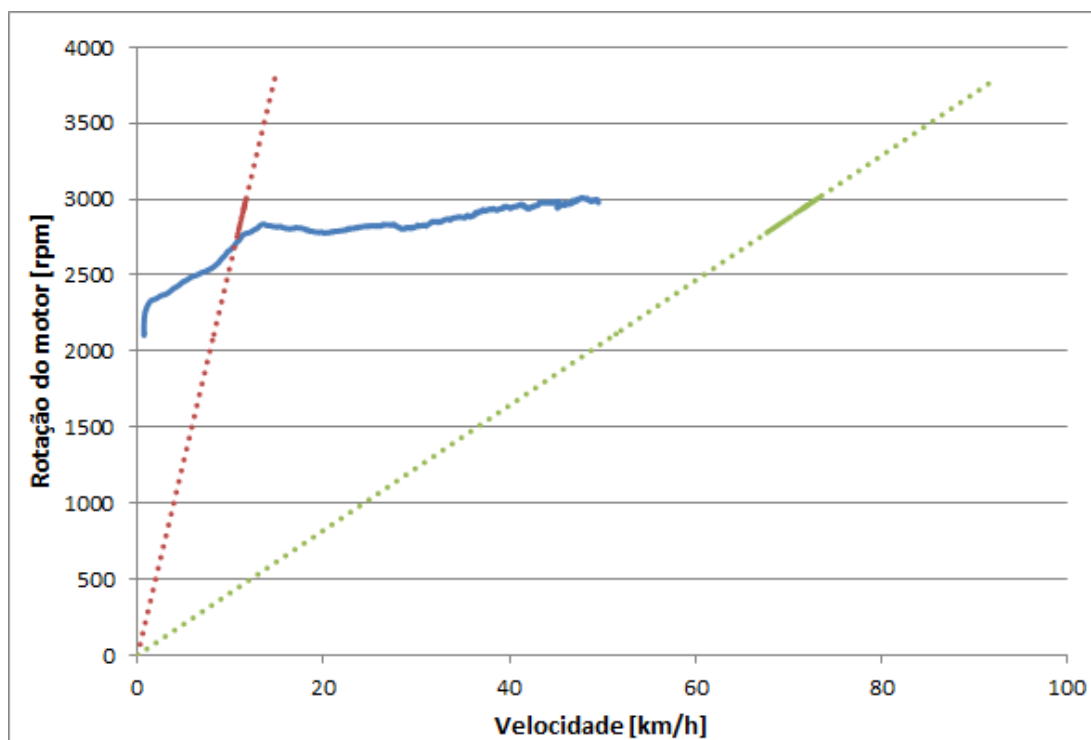


Figura 4.17 - Gráfico da rotação do motor em função da velocidade do veículo

A rotação do motor ideal para que ocorra a mudança na relação de transmissão da TCV é aquela que apresenta a maior potência do motor, pois dessa forma, tem-se o máximo fornecimento de potência. Idealmente, essa rotação se manteria constante enquanto a relação de transmissão da TCV estivesse variando. No teste analisado, porém, a rotação do motor variou entre 2700 e 3000 *rpm*. É sabido através da observação da Figura 3.12, que a rotação na qual o motor apresenta a máxima potência é de 3500 *rpm*.

Conclui-se, portanto, que o veículo deve apresentar um comportamento mais próximo do ideal se a rotação do motor que aciona o funcionamento da TCV se der por volta de 3500 *rpm*, se mantendo constante durante a aceleração do veículo. Também é importante salientar que o acionamento da TCV deve-se dar o mais rapidamente possível a fim de que a menor relação de transmissão da TCV seja atingida antes do veículo completar os 100 metros. Essa análise foi realizada sem levar em consideração a resistência ao movimento imposta ao veículo (resistência ao rolamento, resistência aerodinâmica, e resistência ao atrie), de maneira que não é possível determinar se a menor relação de transmissão da TCV é possível de ser alcançada.

5. CONCLUSÃO

5.1. Delineamento de Experimentos aplicado à TCV de um veículo Baja SAE Modelagem da TCV

Através da utilização do método de Delineamento de Experimentos foi possível otimizar o desempenho do protótipo Poli Titan, da Equipe Poli de Baja, diminuindo-se o tempo para percorrer os primeiros 30 metros de uma pista de 100 metros de comprimento em 4,5% e aumentando-se a velocidade final do veículo em 5% em comparação à configuração de montagem da TCV anteriormente utilizada.

Esse primeiro estudo de Delineamento de Experimentos aplicado à TCV de um veículo Baja SAE indica que outros sistemas que compõem os protótipos da Equipe também podem vir a ser objeto de investigação através das técnicas empregadas neste trabalho como, por exemplo, a otimização das relações de transmissão do estágio fixo e, sua interação com outras TCVs existentes no mercado e que, eventualmente, venham a ser adaptadas aos ditos veículos.

5.2. Modelagem da TCV

Através da modelagem realizada e apresentada no Capítulo 3 será possível realizar simulações do funcionamento da polia motora da TCV, tendo como entrada uma curva que forneça a função de variação temporal do motor em uma dada operação. Essa curva pode ser obtida através de ensaios com o veículo devidamente equipado com sensores de rotação e sistemas de aquisição de dados trafegando em percurso conhecido e julgado como relevante para o estudo do seu comportamento dinâmico, tal como em uma pista de 100 metros. Essa modelagem permite, portanto, avaliar a polia motora quando sob diversas operações distintas, desde que se tenha posse das curvas de rotação do motor em função do tempo.

Com a inclusão da modelagem da polia movida da TCV e das forças resistentes ao deslocamento do veículo à modelagem já realizada da polia motora da TCV seria, teoricamente, possível simular o comportamento do veículo Baja SAE como um todo sem a necessidade de realizar testes com o veículo em pista. A modelagem completa do veículo também permitiria a personalização de alguns componentes, dado que suas características (como rigidez de mola, por exemplo) poderiam ser mudadas antes de cada simulação e sendo o resultado satisfatório, a fabricação de tal componente estaria justificada.

Para a realização da modelagem do sistema como um todo, a força de compressão que a correia exerce sobre a polia motora (N) em vez de estimada, seria uma função da posição ocupada pela correia sobre as polias (tanto na motora, quanto na movida). Dessa forma, seria possível obter a curva característica da TCV, o que permitiria realizar comparações entre o modelo matemático e a curva característica obtida através de ensaios, cujo método está descrito no capítulo 4.

5.3. Obtenção da curva da relação de transmissão da TCV

O estudo dos métodos de obtenção da curva da relação de transmissão da TCV, assim como, a escolha do aparato experimental possibilitaram a realização de testes que resultaram na obtenção da curva característica da TCV.

De posse dessa curva e de outras de interesse para o projeto do trem de força do veículo Baja SAE, foi possível analisar qualitativa e quantitativamente o funcionamento do trem de força do protótipo com o objetivo de otimizar o seu desempenho, de modo a permitir sua operação majoritariamente na condição de máxima potência do motor.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAEN, O. **Clutch Tuning Handbook**. Aaens Performance. 2007

ALBUQUERQUE, A. **Caracterização da Resposta Dinâmica de uma CVT por Polias Expansivas**. 2003. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

ALLEN, M.; LEMASTER, R. **A Hybrid Transmission for SAE Mini Baja Vehicles**. SAE International, 2003.

AUTOMOTIVE WORLD. **The light vehicle transmission report**. 2ª edição. 2009.

COMET INDUSTRIES. **Catálogo – CVT Model 790 Automatic Torque Converter**. Outubro de 2008.

CHEN, T.F.; LEE, D.W.; SUNG, C.K. **An Experimental Study on Transmission Efficiency of a Rubber V-Belt CVT**. Mechanism and Machine Theory.1996.

GALDÁMEZ, E. **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos**. 2002. Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. 2ª edição. EdUSP (Editora da Universidade de São Paulo), São Paulo, 2005.

LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H.; BERTSCHE, B. **Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion**. 2ª edição. Springer. Berlin, 2007.

MARTINEZ, J.; CORONA, D.; DIAZ, S.; BOCCARDO, R., **Characterization of an Adjustable Centrifugal Continuously Variable Transmission for a Baja SAE Prototype**, SAE International, Dezembro de 2010.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. 6ª edição. John Wiley & Sons Inc. New York, 2004.

NÓBREGA, M.; XAVIER, L.; AGUIAR, R.; RANGEL, A.; BASTO, R.; SILVA, F. **Modeling and Simulation of the Transmission System Dynamics of a System equipped with a CVT for Mini-Baja Vehicle**. Congresso 2004 SAE Brasil.

RACE TECHNOLOGY – KNOWLEDGE BASE, disponível em: <http://www.race-technology.com/wiki/?pcat=8&cat=7447&lang=2&sid=cabn84avvmhj13fmf14slvoa70>. Acesso em 20 de junho de 2011.

SHIGLEY, J.; MISCHKE, C.; BUDYNAS, R. **Mechanical Engineering Design**. 7ª edição. The McGraw-Hill. New York, 2004.

TRZESNIEWSKI, M. **Rennwagenteknik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme**. 2ª edição. Vieweg Teubner. Berlin, 2010.

WELLS, D.A. **Lagrangian Dynamics**. 1ª edição. McGraw-Hill. New York, 1967.

WU, C.; HAMADA, M. **Experiments: Planning, Analysis and Parameter Design Optimization**. 1ª edição. John Wiley & Sons Inc. New York, 2000.