

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

LUCAS TEOFILO MACHADO

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE
VARIÁVEL APLICADA A UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE

Joinville

2022

LUCAS TEOFILO MACHADO

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE
VARIÁVEL APLICADA A UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Andrea Piga Carboni.

Joinville

2022

LUCAS TEOFILO MACHADO

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE
VARIÁVEL APLICADA A UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 28 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família, pelo exemplo de perseverança em busca dos objetivos e por todo o suporte durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar estes agradecimentos gratificando a Deus pela oportunidade de ter vivenciado todo o processo da graduação, por ter me concedido saúde e me iluminado durante todos os desafios que enfrentei durante esse caminho.

Ao meu orientador, professor Andrea Piga Carboni, pela sua disponibilidade e receptividade ao me conduzir durante a elaboração desse trabalho, bem como por todo o conhecimento passado em sala de aula. Ao professor Modesto Hurtado Ferrer pelas conversas e conselhos durante o curso, especialmente nas questões ligadas à experiência profissional. E aos professores Marcos Alves Rabelo e Sérgio Junichi Idehara pelas magníficas aulas que tive no decorrer desse curso. Tenho grande admiração por todos vocês.

À equipe Fórmula CEM por ter me oportunizado a participar de um projeto de extensão, pois foi onde pude aprender ainda mais e aplicar os conhecimentos obtidos em sala de aula. Meus agradecimentos aos atuais membros Kevin Bordin de Lima e Eron Moraes Espindola por terem me auxiliado com a aquisição de dados cruciais para este trabalho e também ao antigo membro Gabriel Romanoski pela ajuda prestada em vários momentos.

Aos colegas e amigos com quem dividi inúmeras horas de estudo durante essa graduação, pelas conversas e momentos de descontração que tornaram a caminhada mais leve e prazerosa. De modo especial ao meu amigo Luan Henrique Lourenção, pela amizade que criamos durante o curso.

Por fim, fica minha imensa gratidão pela minha família. Aos meus pais, Adelino e Linete, que foram meus conselheiros e apoiadores em todos os momentos, me ajudando a acreditar e superar meus desafios. Ao meu irmão Gustavo por todo o apoio nos momentos que precisei. Finalmente, à minha namorada Ana Beatriz, que dividiu grande parte da caminhada universitária comigo, sempre me incentivando a lutar pelos meus objetivos. Vocês são as pessoas mais importantes da minha vida e amo muito todos vocês!

“Nada importa além da sua vontade de ser bem sucedido. Não importa sua raça, história, formação acadêmica ou status social. Se você deseja mudar o mundo, meça as pessoas pelo tamanho do coração delas. ”

William Harry McRaven

RESUMO

Um dos projetos existentes na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) é a equipe Fórmula CEM, em que um grupo de alunos trabalham com o intuito de projetar e fabricar um veículo fórmula, a fim de participar da competição nacional, Fórmula SAE, organizada pela SAE Brasil. Para a participação na competição cada sistema do veículo possui uma influência grande nos resultados das provas estáticas e dinâmicas. Assim, no presente trabalho foi proposto o desenvolvimento de um estudo comparativo entre um sistema de transmissão continuamente variável (CVT) e uma transmissão sequencial, sendo a última utilizada atualmente pela equipe. Para isso, foi realizada a simulação do veículo com ambos os sistemas mencionados, com o intuito de saber as vantagens em relação ao tempo nas provas de Aceleração e Autocross, assim como o desempenho em relação a aceleração longitudinal. Com o auxílio dos programas Optimum Lap e Matlab foram executadas as simulações de acordo com os parâmetros necessários para a modelagem de uma transmissão CVT e dessa forma obtidos os resultados desejados. Analisando os resultados, foi possível concluir que a transmissão sequencial teve comportamento inferior em relação a transmissão continuamente variável na aceleração longitudinal e nos tempos de volta em todas as pistas selecionadas.

Palavras-chave: Fórmula SAE. Sistema de transmissão. CVT. Simulação.

ABSTRACT

One of the existing projects at the Federal University of Santa Catarina (UFSC) is the Formula CEM team, in which a group of students work with the purpose of designing and manufacturing a formula vehicle in order to participate in the national competition, Formula SAE, organized by SAE Brazil. To participate in the competition each system of the vehicle has a great influence on the results of the static and dynamic tests. Thus, the present work proposed the development of a comparative study between a continuously variable transmission system (CVT) and a sequential transmission, the latter currently used by the team. To this end, the vehicle was simulated with both systems mentioned, with the purpose of knowing the advantages in relation to time in Acceleration and Autocross races, as well as the performance in relation to longitudinal acceleration. With the aid of the Optimum Lap and Matlab programs, simulations were performed according to the parameters required for modeling a CVT transmission, and the desired results were obtained. Analyzing the results, it was possible to conclude that the sequential transmission behaved inferiorly to the continuously variable transmission in longitudinal acceleration and lap times on all selected tracks.

Keywords: Fórmula SAE. Transmission system. CVT. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos desenvolvidos por Griffith e Pecqueur	19
Figura 2 – Transmissão com 4 velocidades do Fiat Balilla de 1934	20
Figura 3 – Primeiros modelos CVT desenvolvido por Van Doorne.....	21
Figura 4 – Diferentes configurações para transmissão com 4 velocidades ..	22
Figura 5 – Transmissão manual com dois estágios.....	23
Figura 6 – Fluxo do conversor de torque	25
Figura 7 – Representação das engrenagens planetárias	26
Figura 8 – Exemplo da caixa de transmissão automática Audi	27
Figura 9 – Representação toroidal.....	28
Figura 10 – Funcionamento do sistema CVT	28
Figura 11 – Componentes do sistema de transmissão Fórmula SAE.....	29
Figura 12 – Matriz de decisão da equipe Poli Racing.....	31
Figura 13 – Veículo da equipe Fórmula CEFAS.....	31
Figura 14 – Sistema de coordenadas de um veículo	33
Figura 15 – Curvas características de motores de combustão interna	34
Figura 16 – Modelo de bicicleta	35
Figura 17 – Representação da Scatter Shields	37
Figura 18 – Representação das etapas de cálculo do Optimum Lap	41
Figura 19 – Segmentos da pista no Optimum Lap	43
Figura 20 – Diagrama de corpo livre do veículo em situação de frenagem ..	43
Figura 21 – Vetores no movimento circular uniforme	45
Figura 22 – Diagrama de corpo livre do veículo em situação de curva	46
Figura 23 - Diagrama de corpo livre do veículo em situação de aceleração	47
Figura 24 – Definição dos eixos de coordenadas	49
Figura 25 – Parâmetros de geração da pista no OpenLap	50
Figura 26 – Etapas de processamento do Open Drag.....	51
Figura 27 – Powertrain do veículo Fórmula CEM	53
Figura 28 – Execução de teste em dinamômetro	54
Figura 29 – Curva de torque e potência da equipe Fórmula CEM.....	54
Figura 30 – Gráfico de um sistema de transmissão sequencial	56
Figura 31 – Gráfico de um sistema de transmissão CVT	57

Figura 32 – Aplicação de uma transmissão CVT no veículo	57
Figura 33 – Circuito de Autocross da Alemanha	58
Figura 34 – Circuito de Autocross dos Estados Unidos.....	59
Figura 35 – Variação da rotação do motor no Aceleração.....	60
Figura 36 – Comparação da rotação do motor no Autocross Alemanha	61
Figura 37 - Comparação da rotação do motor no Autocross Estados Unidos	61
Figura 38 – Modelagem do veículo CVT no Matlab.....	62
Figura 39 – Pista utilizada para a análise no Matlab	62
Figura 40 – Veículo modelado no Optimum Lap	64
Figura 41 – Veículo modelado no Open Lap	64
Figura 42 – Comparação da aceleração longitudinal.....	65
Figura 43 – Velocidade do veículo para cada sistema de transmissão	66
Figura 44 – Resultado percentual de ganho no tempo de volta	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração de transmissões	18
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da transmissão manual	24
Tabela 3 – Dados de entrada para modelagem de veículo e pista.....	42
Tabela 4 – Dados do veículo	55
Tabela 5 – Relação de transmissão do sistema sequencial	55
Tabela 6 – Resultados na prova de aceleração	59
Tabela 7 – Comparação do tempo de volta no Autocross	60
Tabela 8 – Análise de tempo no código Matlab	62
Tabela 9 – Dados comparativos entre os programas	63
Tabela 10 – Amostra com dados de Aceleração	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

CVT – Transmissão continuamente variável

LTS – *Lap Timer Simulation*

SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

C_d	Coeficiente de arrasto
F_{ext}	Forças externas
F_s	Força motriz do motor
F_t	Força de tração em frenagem
F_{yf}	Força lateral no eixo dianteiro
F_{yr}	Força lateral no eixo traseiro
a_x	Aceleração longitudinal
v_o	Velocidade inicial
μ_x	Coeficiente longitudinal de atrito
μ_y	Coeficiente de atrito
θ	Rotação do veículo em torno do eixo y
ϕ	Rotação do veículo em torno do eixo x
ω	Rotação do veículo em torno do eixo z
A	Área frontal do veículo
F_c	Força centrípeta
F_d	Força de arrasto
L	Distância entre eixos
P_{ot}	Potência do motor
R	Raio da curva
W	Carregamento na roda motriz
a	Aceleração do veículo
b	Distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro
c	Distância do centro de gravidade ao eixo traseiro
m	Massa do veículo
t	Tempo
v	Velocidade do veículo
ρ	Densidade do ar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. SISTEMA DE TRANSMISSÃO	18
2.2 HISTÓRIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	19
2.3 TIPOS DE TRANSMISSÃO	22
2.3.1 Transmissão manual	22
2.3.2 Transmissão manual automatizada	24
2.3.3 Transmissão automática	24
2.3.4 Transmissão continuamente variável	27
2.4 SISTEMA DE TRANSMISSÃO EM VEÍCULOS FÓRMULA	29
2.4.1 Aplicações CVT em veículos Fórmula	30
2.5 DINÂMICA VEICULAR	32
2.5.1 Dinâmica longitudinal	33
2.5.2 Dinâmica lateral	35
2.6 REGULAMENTO	36
3. METODOLOGIA	38
4. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	40
4.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO	40
4.2 APLICAÇÃO DO OPTIMUM LAP	41
4.2.1 Comportamento em frenagem	43
4.2.2 Comportamento em curva	45
4.2.3 Comportamento em aceleração	46
4.3 APLICAÇÃO EM MODELAGEM MATLAB	48
4.3.1 Open Vehicle	48
4.3.2 Open Track	49
4.3.3 Open Drag	50
4.3.4 Open Lap	51
5. RESULTADOS	52

5.1 CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO.....	52
5.2 MODELO CVT.....	56
5.3 ANÁLISE DO TEMPO DE VOLTA	58
5.4 ANÁLISE DA ACELERAÇÃO LONGITUDINAL	65
5.5 COMPARAÇÃO EM TELEMETRIA.....	66
6. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

A busca por melhorias em veículos de competição é primordial para manter a competitividade perante os adversários. Com o avanço da tecnologia e recursos cada vez mais disponíveis, o desafio para os engenheiros se tornou ainda maior, haja vista a necessidade de os componentes automotivos apresentarem eficiência, garantirem a durabilidade e segurança durante o uso.

Com o propósito de aprimorar as habilidades como engenheiros e promover estudantes preparados para o mercado de trabalho, a Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) promove, anualmente, uma competição na qual as equipes universitárias desenvolvem um projeto completo e constroem um carro do tipo Fórmula. Com isso, na competição os protótipos passam por diversas provas estáticas e dinâmicas para garantirem o cumprimento dos requisitos de engenharia.

O principal objetivo nessa competição é fazer com que os estudantes apliquem os conhecimentos obtidos em sala de aula na prática e possam testar as aplicações de maneira segura, promovendo um aprendizado significativo para suas carreiras. Neste cenário, as equipes devem atender as exigências descritas no regulamento disponibilizado pela comissão organizadora, a fim de garantir a segurança dos participantes.

A competição Fórmula SAE Brasil acontece anualmente na cidade de Piracicaba, interior do estado de São Paulo, no Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo, local em que as diversas equipes se encontram para colocarem seus carros nas provas. A equipe Fórmula CEM do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) é uma das participantes da competição.

A equipe Fórmula CEM foi criada no ano de 2011 por um grupo de estudantes do CTJ, com o objetivo de projetar e fabricar um veículo de competição do modelo Fórmula. No decorrer desses anos, diversos alunos passaram pela equipe gerando grande evolução nos aspectos técnicos dos protótipos. Atualmente, a equipe é composta por 30 estudantes dos variados cursos da UFSC Joinville, além disso possui a orientação de um professor e a colaboração de outros dez docentes.

Um dos principais fatores no desenvolvimento dos veículos Fórmula é ter um bom sistema de transmissão, dado que existem algumas provas dinâmicas que

exigem bastante do desempenho veicular. O sistema de transmissão de um veículo possui entre suas finalidades a adaptação da tração disponível no motor com o veículo, à superfície, ao motorista e ao ambiente (NAUNHEIMER et al., 2010).

Este trabalho procura analisar o sistema de transmissão aplicado ao veículo a combustão da equipe Fórmula CEM, sendo que atualmente é utilizado um motor de motocicleta, Yamaha XT660, com uma transmissão sequencial de cinco velocidades. Perante isso, a proposta contempla o desenvolvimento de um estudo comparativo da aplicação de um sistema de transmissão continuamente variável (CVT) com o atual sistema sequencial aplicado.

Assim, com a aplicação de ferramentas computacionais, o foco será em simular o desempenho do veículo e obter resultados que permitam comparar os sistemas de transmissão sequencial e CVT. Para isso, será utilizado um simulador de ponto de massa, conhecido como Optimum Lap, o qual realiza a simulação do comportamento do carro para a pista desejada.

Com o intuito de obter uma maior quantidade de comparações, também se utilizará um simulador de tempo de volta desenvolvido no programa Matlab. Por fim, buscando validar os resultados obtidos nas simulações se fará uma análise em relação a dados verídicos do veículo, sendo esses obtidos por telemetria.

1.1. OBJETIVOS

Para a compreensão do comportamento de uma transmissão continuamente variável em um veículo Fórmula, propõe-se nesse trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar a simulação de um sistema de transmissão CVT aplicado ao veículo à combustão da equipe Fórmula CEM da Universidade Federal de Santa Catarina.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar a simulação do sistema de transmissão sequencial utilizado no veículo;
- Identificar os parâmetros para aplicação de um modelo CVT;

- Fazer a simulação de uma transmissão continuamente variável no veículo;
- Obter dados comparativos quanto ao tempo de volta do sistema de transmissão sequencial com o sistema CVT;
- Adquirir dados comparativos em relação ao desempenho em aceleração do sistema de transmissão sequencial com o sistema CVT;
- Analisar e comparar os resultados alcançados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas as características necessárias para que ocorra o funcionamento do sistema de transmissão de um veículo Fórmula, juntamente com os tópicos relacionados a dinâmica veicular e o regulamento da competição.

2.1. SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O sistema de transmissão do veículo é responsável por transferir a energia produzida no motor para as rodas do carro, permitindo também a regulagem do torque por meio das seleções de marcha. De acordo com Bosch (2005), “[...] a transmissão de um automóvel tem a função de fornecer as forças de tração e impulsão necessárias para induzir o movimento” (p. 736). O sistema pode apresentar diversos tipos de configurações, a depender do posicionamento do motor e do eixo de tração, conforme é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Configuração de transmissões

Tipo de transmissão	Posição do Motor	Eixo de tração
Padrão	Frontal	Eixo traseiro
Tração dianteira	Frontal, longitudinal ou transversal	Eixo dianteiro
Tração total	Frontal, raramente traseira ou central	Eixo dianteiro e traseiro
Tração traseira	Traseira	Eixo traseiro

Fonte: Bosch (2005)

O veículo à combustão da equipe Fórmula CEM contém sistema de transmissão com configuração de tração traseira, possuindo os seguintes componentes: caixa de transmissão, diferencial, semieixo e juntas homocinéticas e deslizantes. O caminho do torque inicia no motor do veículo, sendo transmitido para a caixa de marcha que permite as mudanças de relação de velocidade, para que posteriormente o torque passe pelos demais componente até a chegada nas rodas do veículo.

O sistema de transmissão de um automóvel possui funções específicas que são primordiais para possibilitar sua utilização. Entre essas, segundo Bosch (2005), cita-se:

- Parar o veículo, mesmo com o motor em funcionamento.
- Permitir o arranque do veículo.
- Converter torque e velocidade.
- Proporcionar movimento para frente e para trás.
- Permitir rotações diferentes das rodas motrizes em curva.
- Possibilitar o motor a operar em sua faixa ideal de consumo.

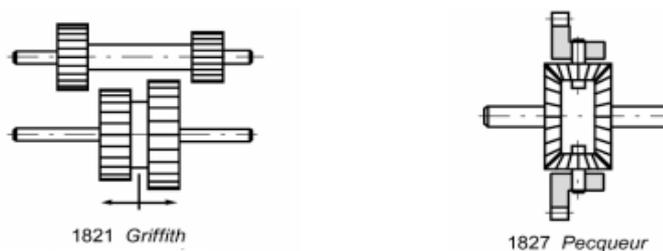
2.2 HISTÓRIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O componente fundamental de um sistema de transmissão são as engrenagens, que tiveram suas primeiras atribuições há mais de 1000 anos para aprimorar serviços que eram executados por animais, sendo utilizadas até hoje para o abastecimento de água em algumas regiões no Egito. (NAUNHEIMER et al., 2010).

Diante do ótimo desempenho das engrenagens, anos depois passaram a ser aplicadas no uso de sistemas automotivos. Estima-se que a ideia de utilizá-las a fim de obter ajustes de torque e velocidade foi criada em torno de 100 anos antes da criação do automóvel, sendo essa estimada em 1886 (NAUNHEIMER et al., 2010).

Com o passar dos anos a evolução continuou acontecendo, especialmente no século XIX. Em 1821, Griffith desenvolveu um sistema com engrenagens deslizantes, sendo amplamente utilizado devido o seu baixo custo. Posteriormente, em 1827 Pecqueur conseguiu projetar o primeiro diferencial, tornando possível a diferença de velocidade das rodas em situações de curva (NAUNHEIMER et al., 2010).

Figura 1 – Modelos desenvolvidos por Griffith e Pecqueur



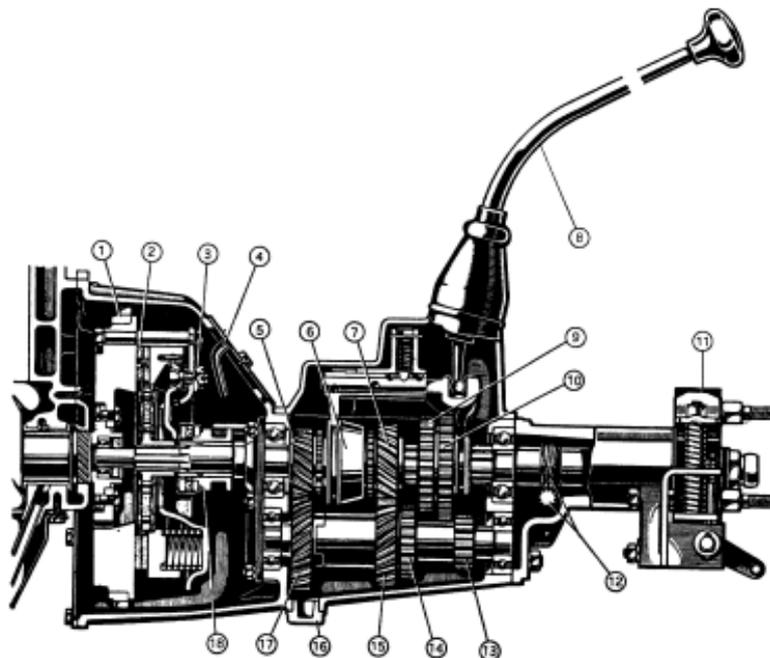
Fonte: Lechner e Naunheimer (1999, p.13)

Seguindo as evoluções, em 1834 Bodmer obteve o primeiro projeto de engrenagens planetárias parcialmente deslocáveis, modelo esse que permitia mudar as relações de transmissão. Mais tarde, em 1879 Selden fez uma patente de um sistema com engrenagens deslizantes, embreagem e marcha ré (NAUNHEIMER et al., 2010).

Por fim, no final do século XIX, Benz criou um modelo, utilizado até hoje, sendo um desenvolvimento de transmissão com eixo contraposto, acionamento direto e quatro relações de marcha. Já no início do século XX, em 1915, ZF Soden aprimorou a forma das seleções de marcha, permitindo o funcionamento com menos esforço (NAUNHEIMER et al., 2010).

No decorrer do século XX diversas melhorias passaram a ser implementadas nos projetos já existentes, principalmente em questões relacionadas ao conforto e diminuição de ruído. Nesse momento a evolução se concentrou no aperfeiçoamento de uma arquitetura com duplo estágio, a qual se tornou universal em todos os carros com motor dianteiro e tração traseira, um exemplo foi o Fiat Balilla de 1933, mostrado na Figura 2 (GENTA; MORELLO, 2009).

Figura 2 – Transmissão com 4 velocidades do Fiat Balilla de 1934

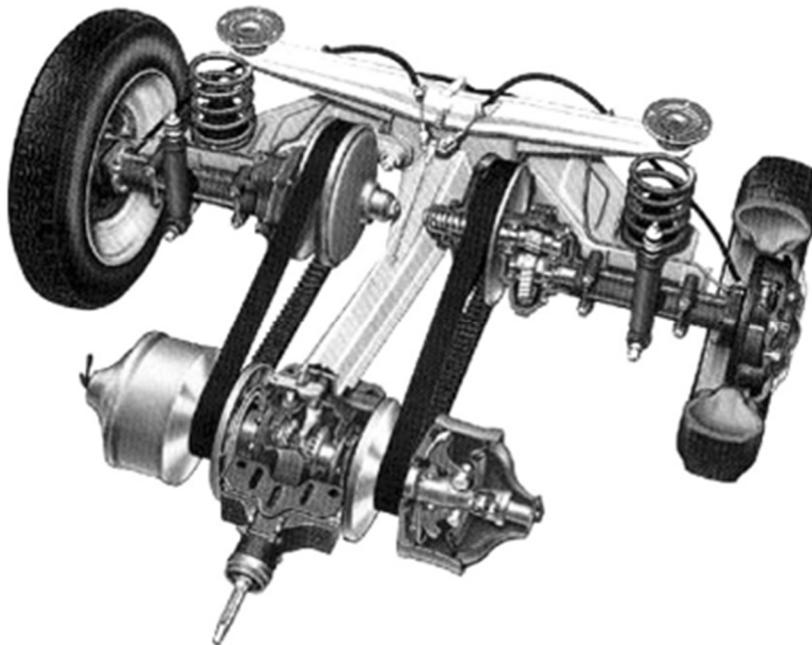


Fonte: Genta e Morello (2009, p.406)

Posteriormente, começaram a aparecer modelos com sincronização automática, sendo que em 1956 a Audi fez um projeto com um controlador eletrônico e embreagem semiautomática. Em seguida, cerca de 11 anos depois, a Volkswagen apresentou seu sistema de transmissão semiautomática com conversor de torque e 3 velocidades. (NAUNHEIMER et al., 2010).

Segundo Naunheimer et al. (2010), os primeiros desenvolvimentos do sistema com transmissão continuamente variável (CVT) aparecerem na virada do século XX, porém, foi nos anos de 1950 em que esse sistema passou a ser empregado em massa nos veículos comerciais, uma modelagem feita por Van Doorne, representada na Figura 3.

Figura 3 – Primeiros modelos CVT desenvolvido por Van Doorne



Fonte: Genta e Morello (2009, p.422)

O desenvolvimento continuou até os dias atuais, principalmente em relação à alguns requisitos, tais como: vida útil, confiabilidade, nível de ruído e facilidade de operação. Os focos atuais têm sido nas evoluções tecnológicas, envolvendo essencialmente as áreas eletrônicas, bem como em redes de sistemas e informação (NAUNHEIMER et al., 2010).

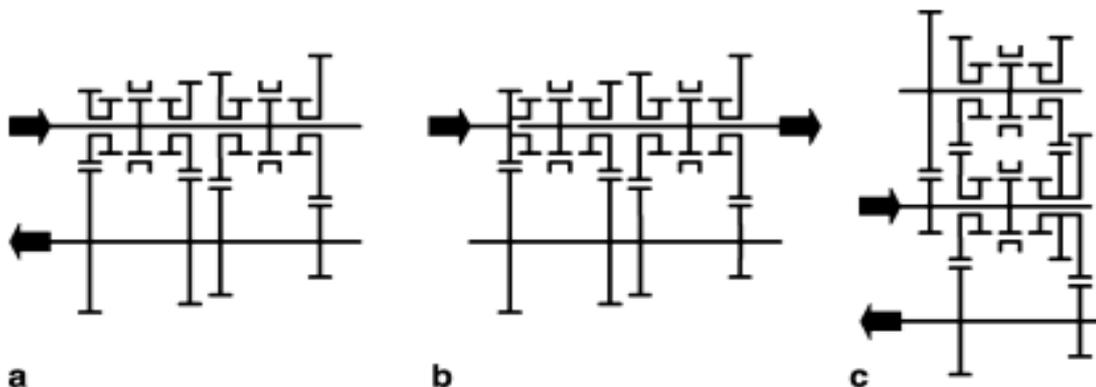
2.3 TIPOS DE TRANSMISSÃO

As transmissões dos veículos podem ser classificadas seguindo alguns critérios de projeto e aspectos construtivos. No decorrer do capítulo serão apresentados os conceitos de alguns sistemas, como: transmissão manual; transmissão manual automatizada; transmissão automática; e transmissão continuamente variável.

2.3.1 Transmissão manual

Esse tipo de transmissão, como o próprio nome sugere, requer que o motorista realize as mudanças entre uma relação e outra, a medida em que o veículo careça da variação de torque e velocidade. Segundo Genta e Morello (2009), as transmissões manuais podem ser subdivididas de acordo com a quantidade de estágios. A Figura 4 apresenta as configurações existentes, sendo: a) único estágio; b) dois estágios; e c) múltiplos estágios.

Figura 4 – Diferentes configurações para transmissão com 4 velocidades



Fonte: Adaptado de Genta e Morello (2009, p.426)

O termo estágio se refere ao número de vezes em que o fluxo de torque passa por alguma relação de transmissão. Isto é, para uma configuração de único estágio o fluxo passa somente uma vez, inicia no eixo superior, passa por uma relação de transmissão e em seguida sai no eixo inferior.

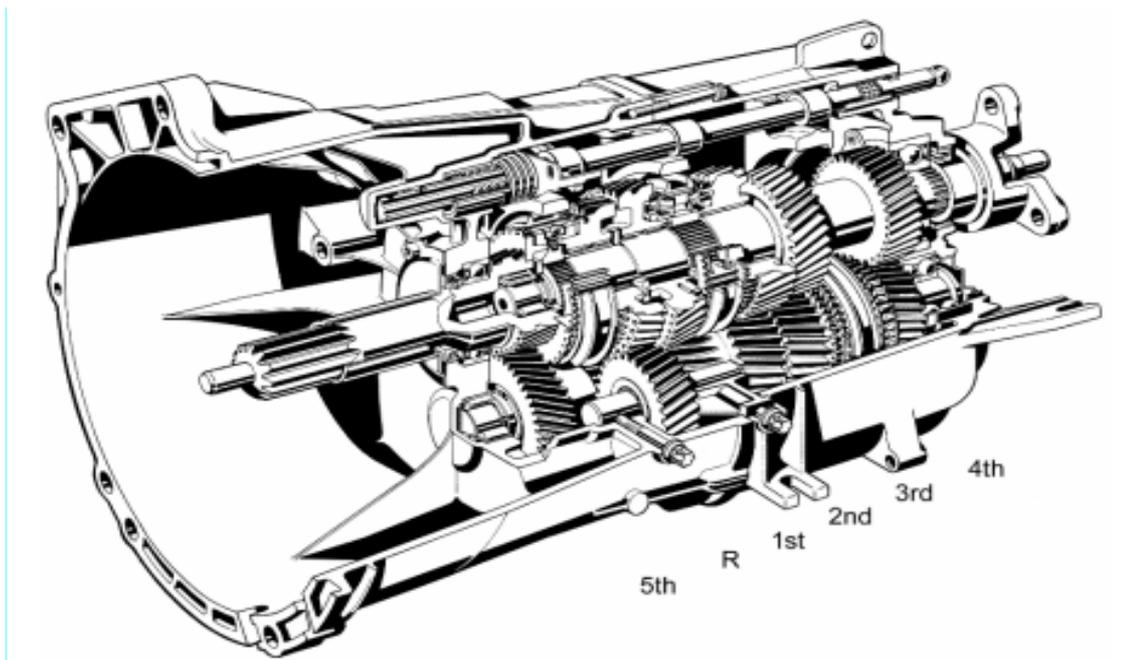
Para a configuração de dois estágios isso ocorre mais de uma vez, como é possível ver na Figura 5.b, nessa situação o fluxo inicia no eixo superior passa para o

eixo inferior e retorna ao eixo acima, ou seja, percorre duas relações de transmissão. Do mesmo modo ocorre para a configuração de múltiplos estágios, nesse caso quando existem três ou mais mudanças de relação.

As configurações de único estágio, segundo Naunheimer et al. (2010), “[...] são comumente utilizadas em automóveis de passageiros em que o motor se encontra próximo ao eixo de transmissão, ou seja, em veículos de tração dianteira com motores dianteiros, ou em veículos com tração traseira com motores traseiros”.

Os modelos com dois estágios costumam ser utilizados para aplicações em que se necessite que os eixos de entrada e saída estejam alinhados. Já a configuração de múltiplos estágios é adotada em veículos de tração dianteira com motor transversal, o que pode encurtar o comprimento da caixa de câmbio (GENTA; MORELLO, 2009).

Figura 5 – Transmissão manual com dois estágios



Fonte: Naunheimer et al. (2010, p.483)

O sistema de transmissão com acionamento manual apresenta vantagens quando comparado aos demais, especialmente em relação a sua eficiência. Porém, algumas desvantagens também existem, conforme é elencado por Crolla (2009) na Tabela 2.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da transmissão manual

Vantagens	Desvantagens
Alta eficiência mecânica	Requer habilidades do motorista
Mais barato de produzir em relação a transmissão automática	O consumo de combustível é influenciado pelo motorista
Mais leve em comparação ao sistema automático	A troca das marchas pode se tornar cansativa
Ocupa menos espaço.	Pode se tornar pesado em veículos maiores

Fonte: Crolla (2009)

2.3.2 Transmissão manual automatizada

Esse tipo de transmissão teve suas primeiras aplicações aproximadamente em 1967, quando a Volkswagen desenvolveu um projeto de uma transmissão manual semiautomática com a combinação de uma embreagem e um conversor de torque. Nesse projeto, o funcionamento da embreagem era automatizado, enquanto as trocas de marchas eram efetuadas manualmente pelo usuário (NAUNHEIMER et al., 2010).

Os projetos de transmissões semiautomáticas não foram muito utilizados, sendo aprimorados em 1990, quando se desenvolveu a transmissão manual automatizada. Esse novo modelo conseguiu que o acionamento da embreagem e as trocas de marcha fossem executados simultaneamente por meio de sinais eletrônicos recebidos da unidade de controle (NAUNHEIMER et al., 2010).

Essa configuração consegue combinar a alta eficiência das transmissões manuais com a facilidade de operação de uma transmissão totalmente automática. Uma das diferenças existentes em comparação com a transmissão automática é a velocidade de resposta ao realizar a troca de marcha, existindo uma maior sensibilidade para os passageiros.

2.3.3 Transmissão automática

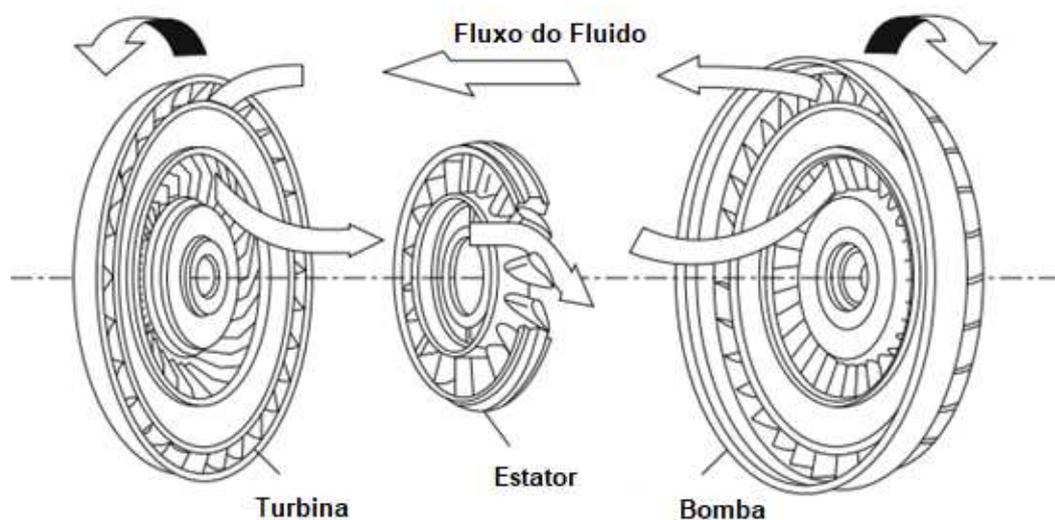
Segundo Naunheimer et al. (2020), inicialmente os sistemas de transmissão automática foram criados com o objetivo de aliviar o esforço físico do motorista de acionar o pedal de embreagem nas trocas de marcha. Para atingir sua finalidade, o sistema combina a utilização de um conversor de torque com um conjunto de engrenagens planetárias.

[...] o sucesso dessa combinação está na simplicidade do conversor de torque como um dispositivo que possui inerentemente características ideais para dar a partida no veículo a partir do repouso, e a oportunidade que o conjunto de engrenagens planetárias fornecem para fazer mudanças fáceis e controláveis entre as relações. (CROLLA, 2009, p.121)

Os motores de combustão interna possuem uma rotação mínima de trabalho, por esse motivo é fundamental que exista algum mecanismo que permita o seu funcionamento quando o veículo está parado, ou seja, quando o sistema de transmissão está desacoplado. Nas transmissões manuais o componente responsável por esse mecanismo é a embreagem, porém em transmissões automáticas utiliza-se o conversor de torque (NAUNHEIMER et al., 2010).

O conversor de torque é composto por três componentes principais: turbina, estator e bomba. Seu funcionamento está diretamente ligado ao conceito da inércia de um fluido hidráulico que circula da bomba para a turbina e posteriormente para o estator, como é representado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxo do conversor de torque



Fonte: Adaptado de Crolla (2009)

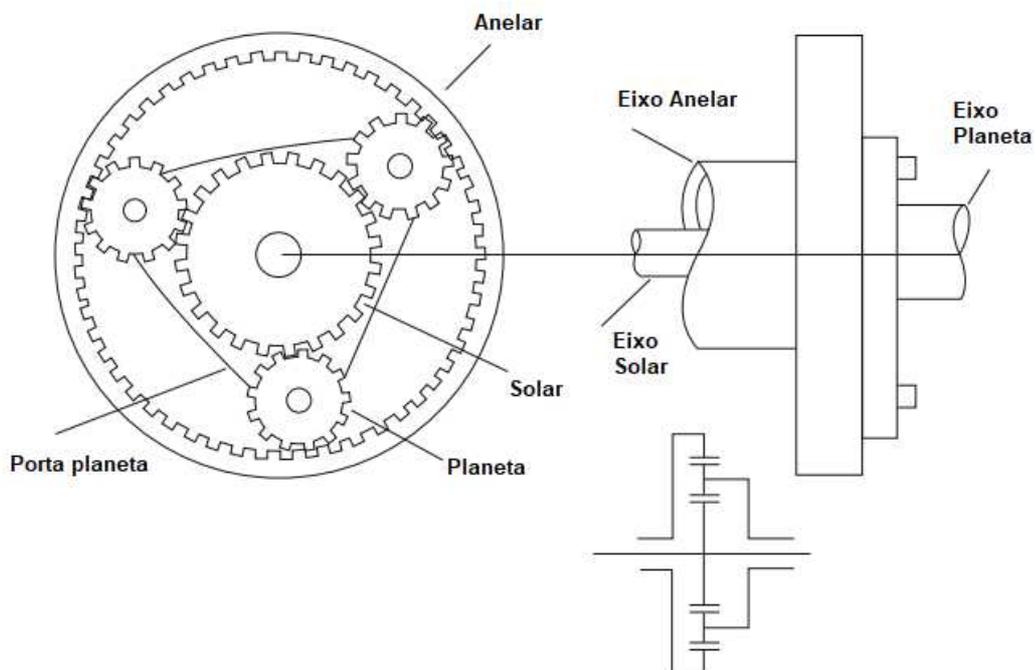
A função da bomba consiste em rotacionar o fluido hidráulico e enviá-lo para a turbina, realizando assim a transferência do fluxo de potência do motor. Em seguida, a turbina recebe esse fluxo e transfere para o sistema de transmissão, uma vez que está conectada ao mesmo eixo desse sistema. Por fim, o estator direciona o fluido proveniente da turbina para a bomba mudando a sua direção, auxiliando na multiplicação de torque do motor (NAUNHEIMER et al., 2010).

O trem de engrenagens planetárias ou epicícloidalis possui a vantagem de obter uma maior quantidade de relações de transmissão de forma mais compacta, permitindo saídas simultâneas e concêntricas. O sistema apresenta dois graus de liberdade, sendo que para haver um movimento restringido são necessárias duas entradas (NORTON, 2013).

O trem de potência é formado por uma engrenagem solar localizada no centro, seguida pelas engrenagens planetárias que possuem o movimento controlado pela porta planeta. Na parte mais externa encontra-se a anelar que possui dentes internos em contato com as planetárias, como é representado na Figura 7 (GENTA; MORELLO, 2009).

A classificação de dois graus de liberdade para esse sistema é dada pelo seu movimento, que requer duas entradas e obtém apenas uma saída. Como exemplo pode-se ter a rotação das engrenagens anelar e solar, mantendo a porta planeta estacionária (NORTON, 2013).

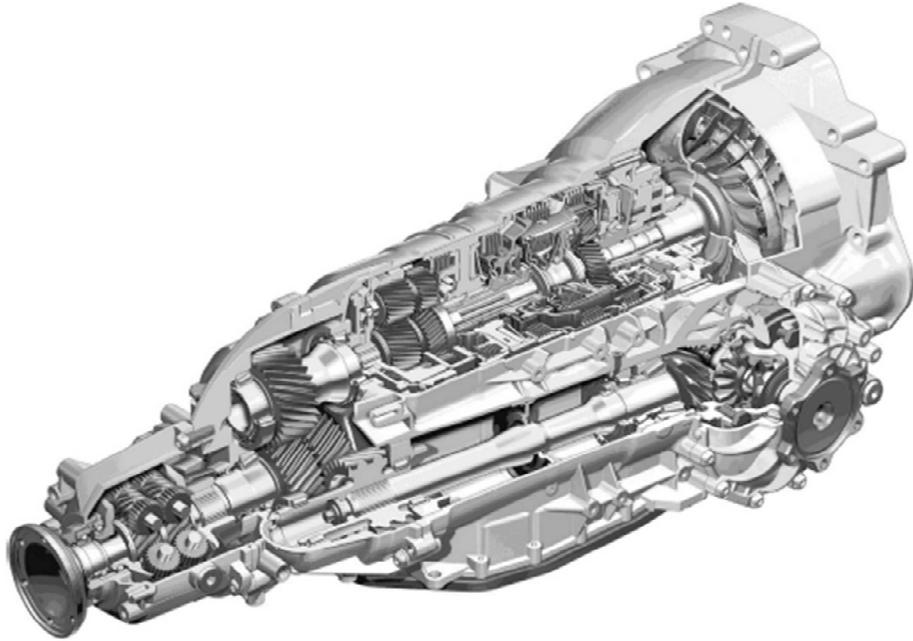
Figura 7 – Representação das engrenagens planetárias



Fonte: Adaptado de Crolla (2009, p.125)

Um exemplo dessa configuração de transmissão automática é utilizado pela Audi em um modelo com seis velocidades, conforma a Figura 8, sendo aplicado o uso do conversor de torque com o trem de engrenagens planetárias.

Figura 8 – Exemplo da caixa de transmissão automática Audi



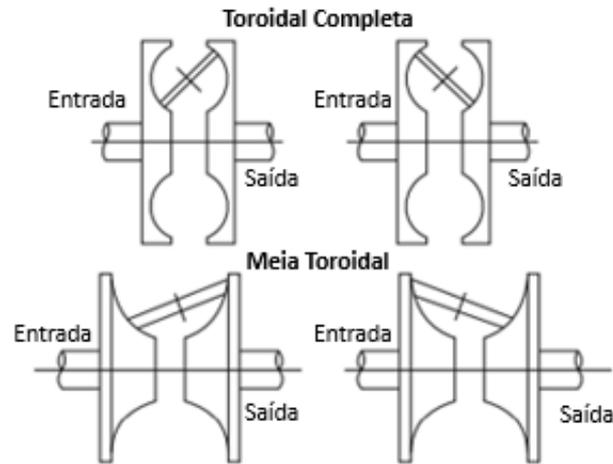
Fonte: Genta e Morello (2009, p.566)

2.3.4 Transmissão continuamente variável

A transmissão continuamente variável é um tipo de transmissão capaz de permitir que o motor trabalhe em seu ponto ideal de operação, entregando boa performance e eficiência (NAUNHEIMER et al., 2010).

A transmissão CVT, como é popularmente chamada, possui duas configurações de trabalho conhecidas como toroidal e por polias. A transmissão toroidal é composta por duas cavidades com roletes em seu interior, sendo que as cavidades podem ser completas (toroidal completa) ou pela metade (meia toroidal), como é melhor representado na Figura 9.

Figura 9 – Representação toroidal

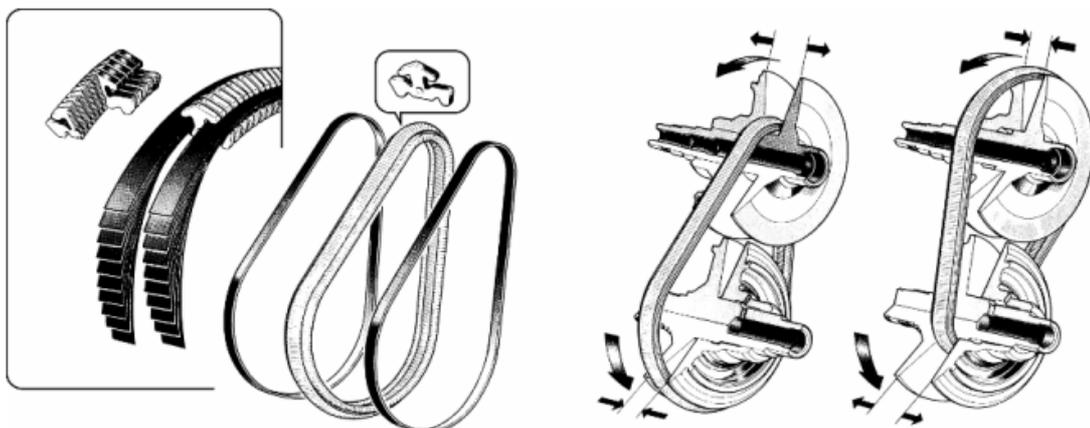


Fonte: Adaptado de Crolla (2009, p.135)

A forma toroidal realiza a transmissão do torque por intermédio do atrito entre o rolete e a cavidade toroidal. Vale ressaltar que as superfícies toroidais são submetidas a revolução em seu eixo de rotação, enquanto os roletes variam a sua posição angular dentro da cavidade. Dessa forma, a relação de transmissão é gerada pela variação angular do rolete, sendo que quando se encontra perpendicular ao eixo de rotação toroidal a relação de transmissão é 1:1 (GENTA; MORELLO, 2009).

A transmissão por polias dispõe de um componente central chamado variador. Esse variador é composto de polias cônicas e uma correia, por onde a energia é transmitida por fricção. Já os discos cônicos possuem ajuste axial, variando assim o diâmetro e assim obtendo infinitas relações de transmissão (NAUNHEIMER et al., 2010).

Figura 10 – Funcionamento do sistema CVT



Fonte: Naunheimer et al. (2010, p.188)

O modelo CVT apresenta benefícios, conforme cita Bosch (2005, p.749), “[...] em relação às caixas de mudança escalonada, oferece vantagem tanto para performance quanto para o consumo de combustível e redução de emissões”.

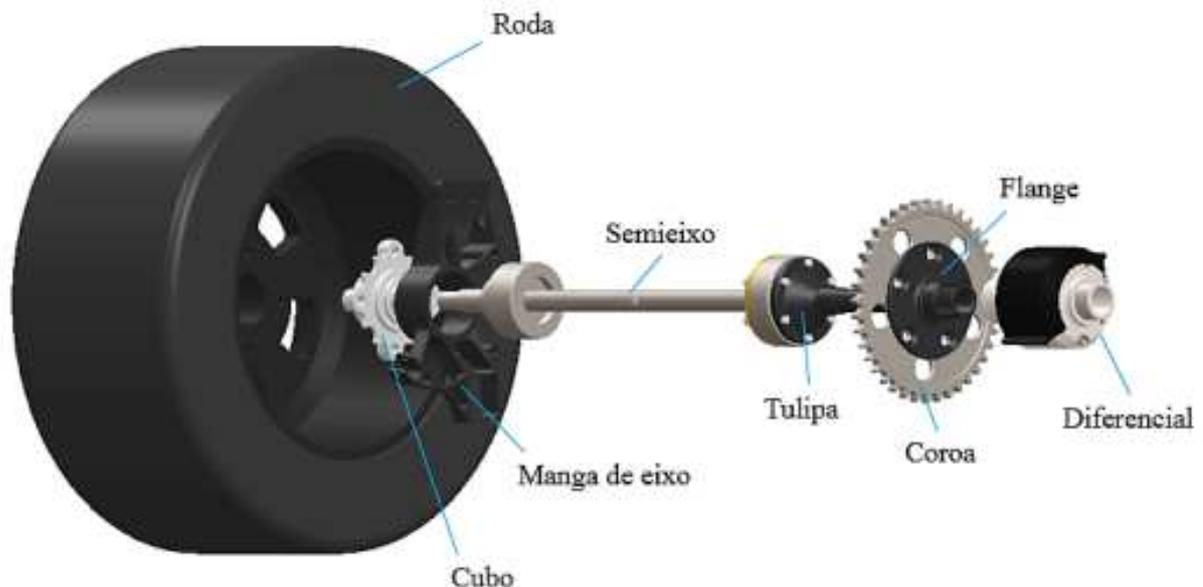
2.4 SISTEMA DE TRANSMISSÃO EM VEÍCULOS FÓRMULA

Os veículos de competição do tipo Fórmula SAE utilizam frequentemente os motores de combustão interna de motocicletas ou quadriciclos, isso devido ao regulamento da Fórmula SAE limitar as cilindradas do motor em 710 cc (SAE, 2021).

O uso desses motores acaba influenciando as equipes de competição a utilizarem as caixas de transmissão originais. Porém, em alguns casos, a melhoria do comportamento em relação ao torque e velocidade do veículo é realizada por meio de mudanças nas relações de transmissão do sistema (MALACO FILHO, 2009).

De modo geral esses veículos costumam apresentar um aspecto construtivo similar, sendo que de acordo com Amaral (2020), “[...] é composto, geralmente por: embreagem, caixa de transmissão, relação final composta por pinhão, coroa e corrente de rolos, flange de acoplamento da coroa, diferencial, suporte do diferencial, tulipas, semieixos, homocinéticas, cubos de rodas, rodas e pneus”.

Figura 11 – Componentes do sistema de transmissão Fórmula SAE



Fonte: Amaral (2020)

2.4.1 Aplicações CVT em veículos Fórmula

Após o retorno das competições é bastante comum que os membros da equipe tragam alguns aprendizados sobre os aspectos de melhorias no veículo, tendo em vista o desempenho na competição.

A equipe Poli Racing da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo se deparou exatamente com essa situação na competição de 2009, em que segundo Malaco Filho (2009), desenvolveu um projeto para uma nova caixa de câmbio para a utilização na competição do ano seguinte.

O projeto da equipe Poli Racing levou em consideração alguns parâmetros importantes, como: potência a ser transmitida, faixa de rotação do motor, automatização do sistema de troca de marchas, redução de massa e inércia rotacional, entre outras (MALACO FILHO, 2009).

O estudo desenvolvido por Malaco Filho (2009) leva em consideração o desenvolvimento de um novo sistema de transmissão da equipe, dessa forma foram levados em consideração alguns tipos, sendo eles: transmissão automática convencional, transmissão de dupla embreagem, transmissão manual automatizada e transmissão continuamente variável. Dessa forma, levando em consideração o projeto que a equipe já possuía, o autor do trabalho elaborou cinco alternativas de solução:

1. Manutenção da caixa original, utilizando uma CVT como redução final.
2. CVT do mesmo tipo, mas com substituição da caixa original.
3. Automatização (externa) da caixa manual.
4. Transmissão de dupla embreagem.
5. Caixa de câmbio manual original.

Diante das possibilidades a escolha foi efetuada por meio de uma matriz de decisão, levando em conta os parâmetros definidos. A matriz de decisão é um método que atribui pesos para classificar o nível de relevância de um determinado parâmetro, tornando assim a decisão mais assertiva. A Figura 12 representa a matriz desenvolvida por Malaco Filho (2009) em seu estudo.

Figura 12 – Matriz de decisão da equipe Poli Racing

Peso	Critério	Alt. I	Alt. II	Alt. III	Alt. IV	Alt. V
1.0	Intervalo sem transmissão de torque	10.0	10.0	5.0	8.0	0.0
0.6	Dificuldade para a troca de relação de transmissão	10.0	10.0	10.0	8.0	0.0
0.3	Adição de massa	2.0	5.0	0.0	0.0	10.0
0.3	Adição de inércia rotacional	0.0	0.0	10.0	2.0	10.0
0.1	Custo	6.0	6.0	2.0	0.0	10.0
0.9	Necessidade e extensão de alteração da caixa de câmbio original	9.8	0.0	8.0	0.0	10.0
0.5	Dificuldade para calibração da estratégia de controle	3.0	3.0	0.0	0.0	10.0
	Média aritmética	5.83	4.86	5.00	2.57	7.14
	Média ponderada	7.62	5.38	5.81	3.69	5.56
	Adequação	100%	71%	76%	49%	73%

Fonte: Malaco Filho (2009)

Outra equipe que desenvolveu um estudo sobre a aplicação de um sistema de transmissão continuamente variável pertence ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) na aplicação da equipe Fórmula CEFAST. A equipe em questão realizou um estudo de comportamento do uso ou não de um sistema CVT por meio de uma modelagem no programa Simulink (COSTA et al., 2015).

Figura 13 – Veículo da equipe Fórmula CEFAST



Fonte: Costa et al. (2015)

A modelagem adotada pela equipe foi realizada tomando como base inicial a curva de torque do motor com o auxílio de um dinamômetro, sendo levado em consideração o desempenho da embreagem e das trocas de marcha no sistema manual por meio de aquisição de dados de teste (COSTA et al., 2015).

O sistema CVT, segundo Costa et al. (2015), “[...] faz com que o motor funcione em sua melhor velocidade, desta forma, buscando desempenho. No entanto, deve ser projetado também procurando não ultrapassar os limites de tração do pneu”. Com isso foi considerada a razão de escorregamento do pneu, para que não houvesse extrapolação dos seus limites de tração.

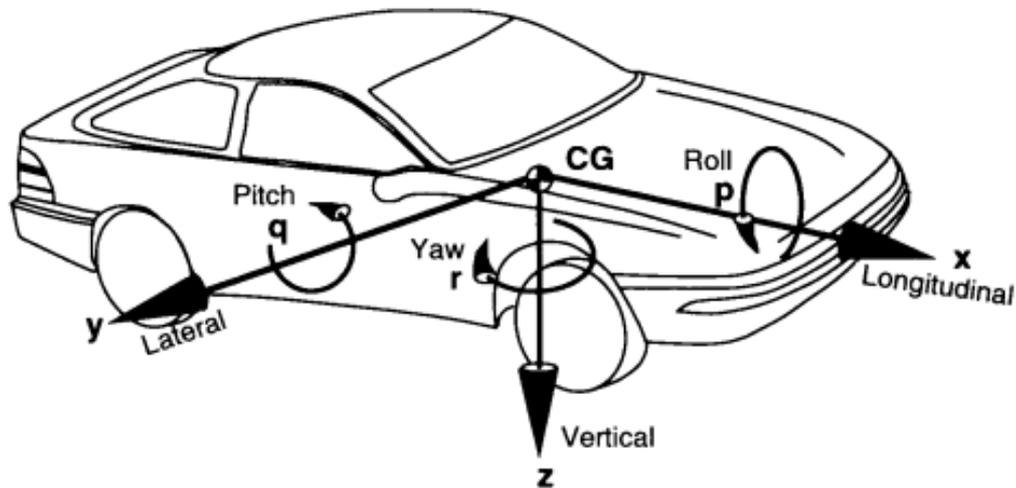
Dessa forma, foi realizado a simulação do comportamento do veículo em aceleração, sendo consideradas também algumas forças de resistência, principalmente a resistência ao rolamento. Os resultados obtidos pela equipe representaram uma diferença bastante significativa, na qual o tempo em aceleração no modelo sem CVT ficou em 4,536 segundos e utilizando o CVT em 4,119. Como comparativo, essa diferença de tempo faria com que a equipe obtivesse a 3ª posição na prova em comparação à 11ª posição obtida (COSTA et al., 2015).

2.5 DINÂMICA VEICULAR

A dinâmica veicular promove o estudo do movimento dos veículos em uma estrada, tendo interesse nas situações de aceleração, frenagem e curva. Essa dinâmica é influenciada pelas forças aplicadas ao veículo por meio do pneu, gravidade e aerodinâmica, tornando possível a determinação do comportamento do veículo (GILLESPIE, 1992).

Segundo Gillespie (1992), a dinâmica veicular é dividida em três áreas: longitudinal, lateral e vertical. Na Figura 14 pode-se visualizar o sentido de cada um dos eixos.

Figura 14 – Sistema de coordenadas de um veículo



Fonte: Gillespie (1992, p.8)

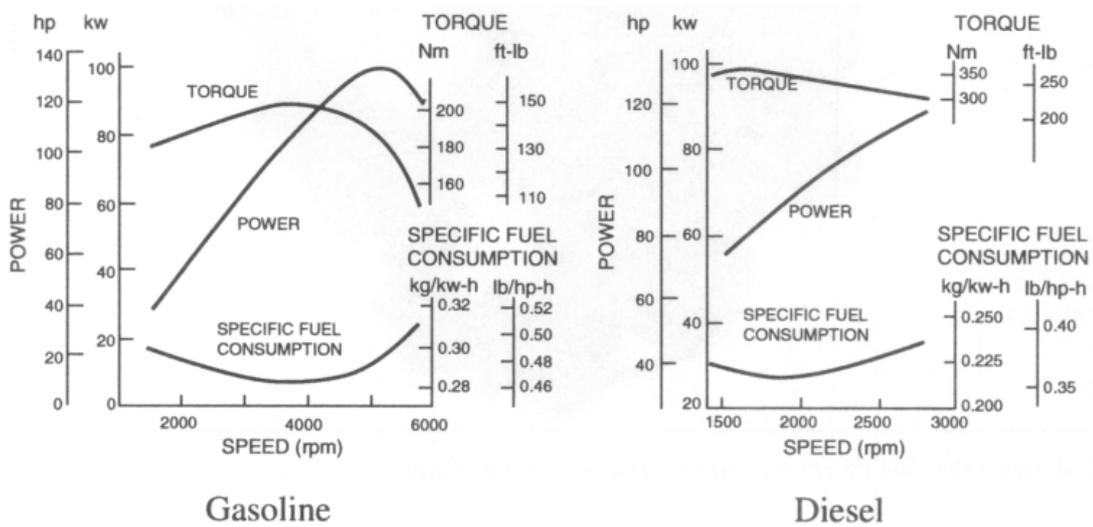
A dinâmica longitudinal está relacionada com o movimento no eixo (x) e as rotações no eixo (y), chamadas de *pitch*, sendo que essa área é diretamente influenciada pelos torques recebidos pelo carro. As mudanças de direção feitas pelo volante impactam a dinâmica lateral, que está ligada ao movimento do eixo (y), bem como as rotações dos eixos (x) e (z) com os movimentos de *roll* e *pitch*. Por fim, a dinâmica vertical relaciona o movimento do eixo (z) e as rotações *roll*, *pitch* e *yaw*, tendo impacto pelas oscilações da suspensão (GILLESPIE, 1992).

2.5.1 Dinâmica longitudinal

A dinâmica longitudinal é a área responsável pelo estudo do comportamento do veículo em aceleração. O máximo desempenho em aceleração de um automóvel é limitado pela potência do motor ou pelos limites de tração nas rodas, sendo comum que o motor seja o limitante para altas velocidades (GILLESPIE, 1992).

A contenção pela potência do motor está diretamente relacionada às suas curvas características de torque e potência. Os motores de combustão interna à gasolina possuem o pico de torque próximo a metade da sua faixa de rotação, enquanto que os motores diesel conseguem obter menos oscilações, como pode-se visualizar na Figura 15 (GILLESPIE, 1992).

Figura 15 – Curvas características de motores de combustão interna



Fonte: Gillespie (1992, p.22)

A relação da potência com o peso do veículo é importante na determinação da performance longitudinal. Essa relação pode ser obtida utilizando os princípios da Segunda Lei de Newton, conforme a equação (1).

$$F_x = m \cdot a_x \quad (1)$$

Nessa circunstância, F_x é equivalente a força de tração nas rodas, m representa a massa do veículo e a aceleração longitudinal é dada por a_x . Segundo Gillespie (1992), a potência de um veículo é influenciada pelo torque e a velocidade, desse modo realizando algumas manipulações matemáticas a aceleração longitudinal de um automóvel é dada pela equação (2).

$$a_x = \frac{Pot}{v \cdot m} \quad (2)$$

Sendo, Pot a potência do motor e v a velocidade longitudinal.

A limitação pela tração ocorre pelo coeficiente de atrito existente no contato entre o pneu e a pista. Essa restrição está totalmente relacionada à transferência de carga que possa existir no veículo, assim como a carga estática e dinâmica existente sobre a roda motriz (GILLESPIE, 1992). A equação (3) define a limitação pela tração.

$$F_x = \mu \cdot W \quad (3)$$

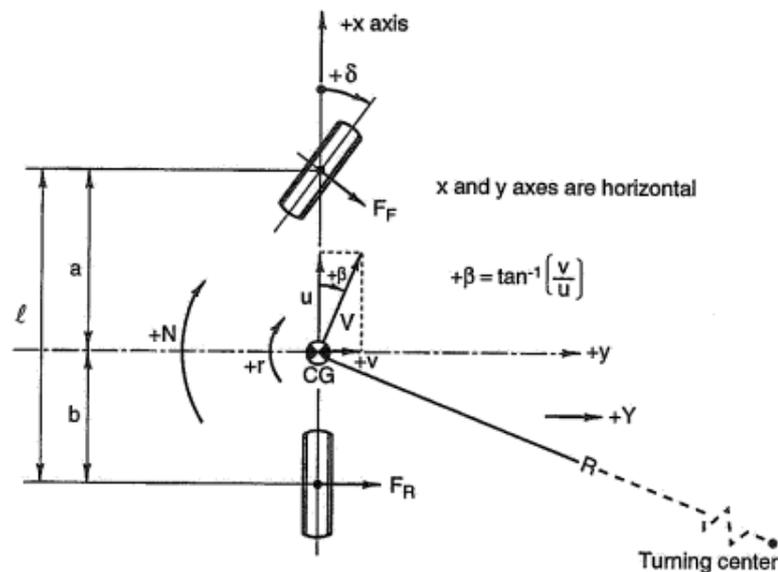
Onde, μ é coeficiente de atrito e W o carregamento na roda motriz.

2.5.2 Dinâmica lateral

A dinâmica lateral é a responsável por determinar o comportamento na condição de esterçamento. Esse estudo aborda os aspectos de dirigibilidade, controle e estabilidade lateral do veículo e é fundamental para a realização do projeto de um automóvel.

Para compreender esse comportamento é habitual realizar-se uma abordagem simplificada do veículo, conhecida como modelo de bicicleta, sendo assumido que para grandes velocidades a variação do ângulo de esterçamento das rodas dianteiras internas e externas à curva é mínima. Dessa forma, as duas rodas são simplificadas em apenas uma, conforme a Figura 16 (GILLESPIE, 1992).

Figura 16 – Modelo de bicicleta



Fonte: Milliken et al. (1995, p.127)

Segundo Gillespie (1992), quando um veículo percorre uma trajetória, o somatório de suas forças laterais nos pneus está diretamente ligada a aceleração centrípeta. Aplicada a Segunda Lei de Newton nessa circunstância resulta-se na seguinte equação.

$$F_{yf} + F_{yr} = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (4)$$

Sendo, F_{yf} e F_{yr} as forças laterais no eixo dianteiro e traseiro, respectivamente. Já R representa o raio de curvatura.

Com o objetivo de encontrar as forças aplicadas em cada eixo, considera-se que o veículo se encontra em regime permanente, ou seja, em equilíbrio de momentos. Desse modo, manipulando as equações de momento com a equação (4), adquire-se como resultado as seguintes equações (GILLESPIE, 1992).

$$F_{yf} = F_{yr} \cdot \frac{c}{b} \quad (5)$$

$$F_{yr} = m \cdot \frac{b}{L} \cdot \left(\frac{v^2}{R} \right) \quad (6)$$

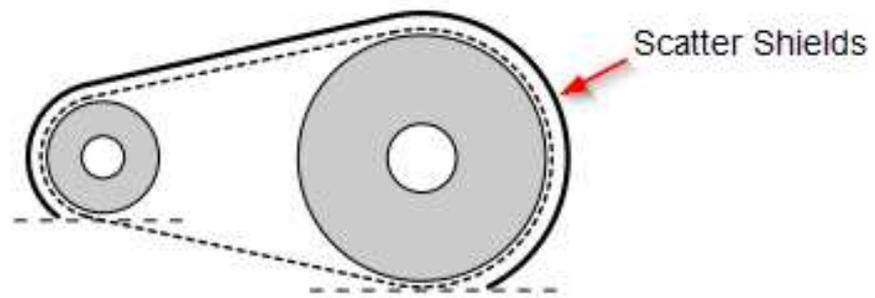
Nesse caso, c é a distância do centro de gravidade ao eixo traseiro, b até o eixo dianteiro, enquanto que L é a distância entre os eixos dianteiro e traseiro.

2.6 REGULAMENTO

O principal objetivo de uma equipe de competição Fórmula SAE é deixar seus carros adequados para participar das provas na competição anual entre equipes. Por isso, é fundamental a compreensão de todos os requisitos que impactam no protótipo, de forma a tornar possível a sua participação.

Com relação ao sistema de transmissão, de acordo com a SAE (2021, p.64), qualquer tipo de transmissão pode ser utilizado, sendo apenas obrigatória a implementação de dispositivos de segurança, chamada de *Scatter Shields* que são proteções metálicas com objetivo de proteger os competidores no caso de falhas em algum componente da transmissão, como é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Representação da Scatter Shields



Fonte: SAE (2021, p.64)

3. METODOLOGIA

A utilização de uma metodologia para simular o desempenho de um veículo é primordial para que se obtenham os resultados desejados. A metodologia consiste na abordagem em que será solucionado o problema, podendo essa ser dividida em algumas etapas.

No estudo da simulação comparativa entre os sistemas de transmissão CVT e sequencial aplicados a um veículo Fórmula SAE, ressalta-se que as simulações são classificadas em alguns modelos, os quais serão apresentados na seção 4.1. É fundamental o conhecimento das modelagens, para que se compreenda o modo de processamento de cada programa.

Primeiramente, se adotará como estratégia a utilização do programa Optimum Lap, um simulador de ponto de massa em regime quase estático. Com esse será possível realizar a configuração do veículo de maneira mais simplificada, porém com grande velocidade na obtenção dos resultados.

No Optimum Lap realizar-se-á a simulação de dois veículos, sendo que a diferença será o sistema de transmissão de cada um. Os dados do veículo serão obtidos com o auxílio da equipe Fórmula CEM, a qual detém alguns dados em seus relatórios.

As simulações se concentrarão em duas provas estáticas a prova de Aceleração e o Autocross. Ambas foram selecionadas com o intuito de compreender o comportamento veicular, quando submetido a uma pista reta ou a uma pista com curvas, permitindo a análise da dinâmica veicular do veículo em ambos os circuitos.

O foco dos resultados será adquirir os tempos de volta despendidos por cada sistema de transmissão, no intuito de verificar qual apresenta maiores vantagens. Também serão obtidos resultados da aceleração e velocidade do veículo em cada região da pista.

Um segundo programa, denominado Open Lap, será utilizado para confrontar os resultados adquiridos pelo Optimum Lap. O Open Lap também realiza a simulação do veículo como um ponto de massa, operando em regime permanente. A simulação nesse caso se dará somente para a prova de Aceleração, uma vez busca-se apenas verificar se os resultados anteriores se mostram coerentes.

Uma etapa importante em uma simulação de comportamento veicular é a validação por telemetria, o que torna possível a comparação entre a simulação numérica e o veículo. Essa será a última etapa do presente trabalho, a qual serão comparados dados de telemetria realizados em testes do veículo com os resultados dos simuladores.

Por fim, mediante as análises mencionadas, busca-se cumprir todos os objetivos elencados para esse trabalho, permitindo assim averiguar qual sistema de transmissão apresenta melhores resultados para os critérios selecionados.

4. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Após serem apresentados os conceitos gerais dos sistemas de transmissão, bem como os estudos previamente já realizados por outras equipes, o foco nesse capítulo se concentrará em expor os modelos de simulação e as ferramentas empregadas no estudo comparativo da transmissão sequencial com a transmissão continuamente variável, aplicada ao veículo da equipe Fórmula CEM.

4.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO

Realizar a simulação de um veículo de competição em uma pista é uma tarefa bastante importante para obtenção de dados para tomada de decisão nos projetos. Segundo Siegler et al. (2000), o uso de simuladores de tempo de volta permite que as equipes coloquem seus veículos em circuitos, que nunca tenham visitado, em diferentes configurações e com a possibilidade de otimizar seu desempenho.

Para a compreensão do comportamento do veículo em um circuito é comum realizar a divisão da pista em alguns segmentos, realizando assim a análise em cada ponto com base nas forças externas atuantes sobre o carro. Existem algumas modelagens de veículo utilizadas com foco em simulação, sendo que três estratégias são as mais empregadas no estudo de carros de corrida: regime permanente; regime transiente; e modelagem quase estática (SIEGLER et al., 2000).

O modelo em regime permanente assume o veículo em velocidade constante quando percorre uma curva, isso significa dizer que, apenas a aceleração lateral é considerada nessa situação. A decorrência é pelo fato de haver uma divisão entre o comportamento longitudinal e lateral do automóvel nesse regime. Ressalta-se que esse modelo assume que o sistema está em equilíbrio, não havendo dependência temporal para obtenção de seus resultados (SIEGLER et al., 2000).

O modelo quase estático segue uma estratégia bem próxima do regime permanente, porém nesse caso as curvas são divididas em segmentos com raio constante, tornando a simulação mais precisa. Os programas disponíveis para *Lap Timer Simulation* (LTS) utilizam em geral soluções em modelagem quase estática, dado que entregam simulações rápidas e eficientes (SIEGLER et al., 2000).

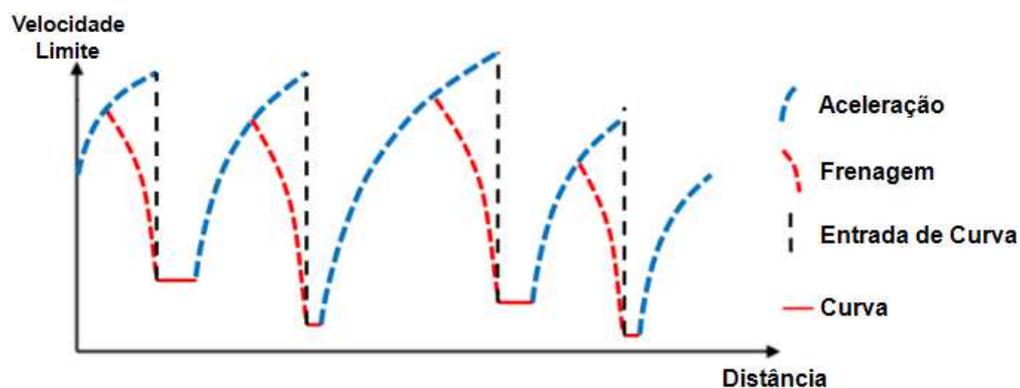
Por fim, o modelo de simulação em regime transiente considera que o veículo é submetido a acelerações lineares e rotacionais não constantes, pois na realidade quando um veículo realiza uma curva, o mesmo nunca se encontra em regime permanente, pois sempre há uma combinação de acelerações lineares, longitudinais e normais. Também são levados em consideração o tempo de resposta do veículo na mudança de direção e adicionado os efeitos da transferência de carga lateral e longitudinal (SIEGLER et al., 2000).

4.2 APLICAÇÃO DO OPTIMUM LAP

Um exemplo de programa que utiliza a abordagem quase estática é o Optimum Lap, desenvolvido pela empresa americana OptimumG. O programa realiza suas simulações considerando o veículo como um ponto de massa em regime quase estático e segundo a OptimumG (2022), o processo é realizado em três etapas principais:

1. Cálculo da velocidade na curva;
2. Cálculo da velocidade após a curva;
3. Cálculo da distância necessária para desacelerar o carro para as curvas.

Figura 18 – Representação das etapas de cálculo do Optimum Lap



Fonte: OptimumG (2022, p.5)

A Figura 18 ilustra como são processados os dados do veículo em uma pista pelo Optimum Lap. Percebe-se que as linhas tracejadas ascendentes (em azul) representam a fase de aceleração do veículo e ao se aproximar de uma curva inicia-

se o processo de frenagem, esse representado pelas linhas tracejadas descendentes (em vermelho). O veículo desacelera até a velocidade limite de entrada na curva, representada pela linha contínua horizontal (em vermelho), quando então a percorre em velocidade constante.

Esse modelo apresenta algumas simplificações, principalmente em relação a transferência de carga, modelagem de pneus, parâmetros de pista e capacidade de subesterçamento e sobreesterçamento.

Para realizar a simulação no Optimum Lap é necessário ter informações a respeito do veículo e da pista. A criação de um veículo é possível com a entrada de alguns parâmetros que servem para adquirir as informações que permitirão simular o seu desempenho em determinada pista.

De modo similar, a geração de uma pista necessita de dados de entrada para a definição de sua geometria, possibilitando a simulação no percurso desejado. Os dados de entrada para modelagem do veículo e da pista são descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de entrada para modelagem de veículo e pista.

Veículo	Pista
Tipo do veículo	Tipo de pista
Massa	Nome da pista
Tipo do powertrain	Localização
Coefficiente de arrasto	Direção da pista
Coefficiente de downforce	Configuração (Aberta ou Fechada)
Área frontal	Dados de entrada das retas
Densidade do ar	Dados de entrada da curvas
Raio do pneu	Definição dos setores
Resistência ao rolamento do pneu	
Coefficiente de fricção longitudinal do pneu	
Coefficiente de fricção lateral do pneu	
Curva de torque do motor	
Relações de transmissão	

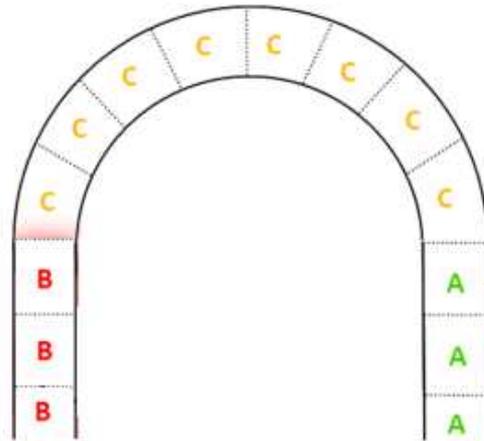
Fonte: Autor (2022)

Com o veículo e a pista definidos é possível iniciar a etapa de simulação, tornando necessário a importação dados para o início do processo. É nessa fase que são utilizadas as equações da dinâmica veicular presente no programa, que permitem a obtenção dos resultados desejados pelo usuário.

Essa modelagem divide a pista em segmentos de frenagem, curva e aceleração. Essa divisão pode ser melhor visualizada na Figura 19, valendo ressaltar

que para cada um desses segmentos existem equações que modelam o comportamento veicular para cada ponto em que o veículo estiver presente, como será apresentado nas seções subsequentes.

Figura 19 – Segmentos da pista no Optimum Lap

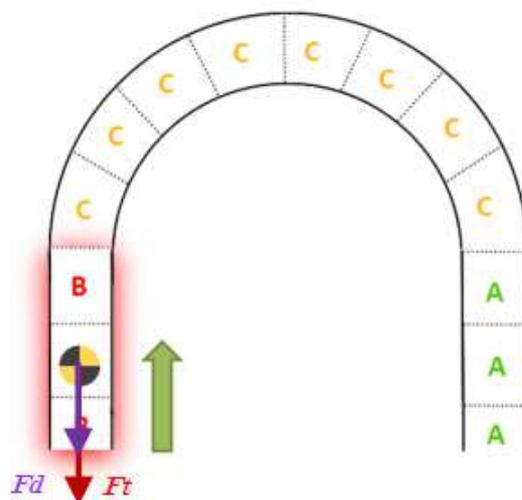


Fonte: Adaptado de OptimumG (2022)

4.2.1 Comportamento em frenagem

O comportamento no segmento de frenagem é determinado pela força de frenagem (F_t) e a resistência aerodinâmica (F_d). Ambas atuam contra o movimento e são representadas na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama de corpo livre do veículo em situação de frenagem



Fonte: OptimumG (2022, p.63)

Nessa situação se obtém a presença de duas forças externas, sendo a força de tração na frenagem e a resistência aerodinâmica. A equação (7) descreve a força de tração na frenagem.

$$F_t = \text{Carregamento normal} \cdot \mu_x \quad (7)$$

Onde, o carregamento normal utiliza como base 100% da massa do veículo e μ_x é o coeficiente longitudinal de atrito, gerado pelo contato entre o pneu e a pista.

Para o cálculo da resistência aerodinâmica se utiliza a equação (8).

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (8)$$

Sendo, ρ correspondente a densidade do ar e C_d o coeficiente de arrasto. Por sua vez, A define a área frontal e v é a velocidade do veículo.

Para conhecer a desaceleração do veículo pode se utilizar a 2ª Lei de Newton.

$$\sum F_{ext} = m \cdot a \quad (9)$$

O somatório das F_{ext} consiste da soma da força de tração de frenagem e da força de arrasto. Já m e a representam a massa e aceleração do veículo, respectivamente. Isolando o parâmetro de massa chega-se a equação (10).

$$a = \frac{F_t + F_d}{m} \quad (10)$$

A obtenção dos dados de velocidade no caso de movimento uniformemente variado é descrita pela cinemática pela seguinte equação.

$$v = v_0 - a \cdot t \quad (11)$$

Sendo v_0 e t , a velocidade inicial e o tempo, respectivamente.

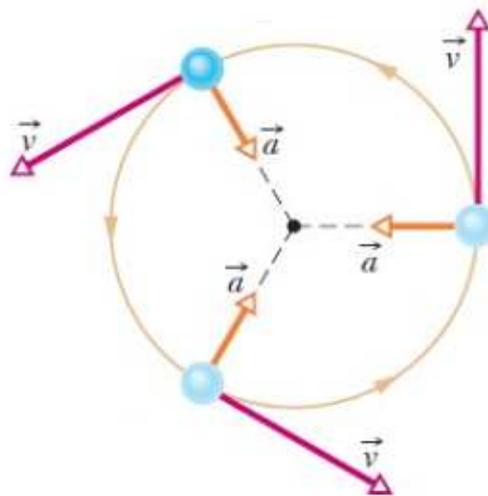
Substituindo a equação (10) na equação (11) chega-se na equação que descreve o comportamento do veículo no segmento de frenagem.

$$v = v_o - \left(\frac{F_t + F_d}{m} \right) \cdot t \quad (12)$$

4.2.2 Comportamento em curva

Quando um veículo realiza uma curva, ele se encontra em movimento circular uniforme, pois o módulo dos vetores de velocidade e aceleração permanecem constante em toda trajetória, por sua vez a orientação varia continuamente. Segundo Halliday et al. (2009), “a velocidade está sempre na direção tangente à circunferência e tem o mesmo sentido que o movimento. A aceleração está sempre na direção radial e aponta para o centro do círculo” (p. 77).

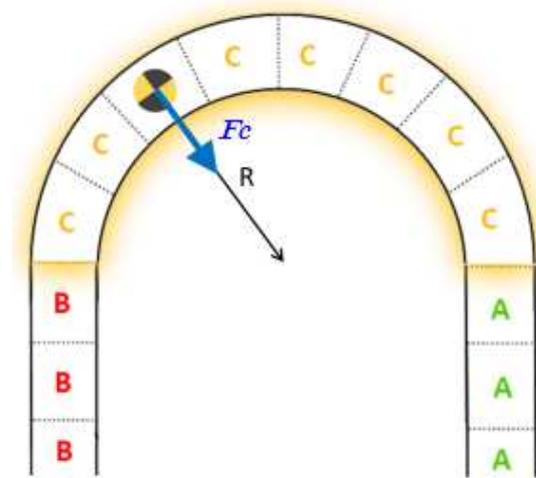
Figura 21 – Vetores no movimento circular uniforme



Fonte: Halliday et al. (2009, p. 77)

Desse modo, a força atuante sobre o veículo nessa situação é chamada de força centrípeta, que corresponde à força de atrito exercida pela estrada sobre os pneus, possibilitando ao carro a realização da curva (HALLIDAY et al., 2016). A Figura 22 mostra o diagrama de corpo livre do veículo para o segmento mencionado.

Figura 22 – Diagrama de corpo livre do veículo em situação de curva



Fonte: Optimum G (2022, p.64)

A equação (13) descreve a força centrípeta (F_c) determinada por Halliday et al. (2009).

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (13)$$

Onde, m , v e R correspondem a massa, velocidade da partícula e o raio da circunferência, respectivamente.

Manipulando a equação (13) se torna possível encontrar a velocidade do veículo durante uma curva.

$$v = \sqrt{\frac{F_c \cdot R}{m}} \quad (14)$$

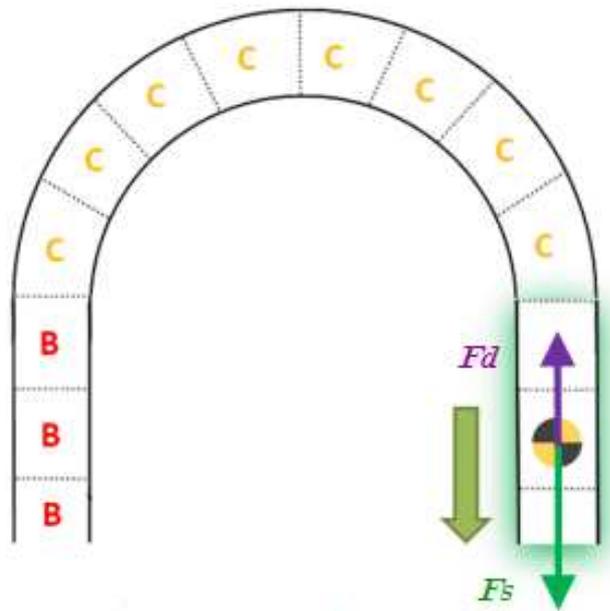
4.2.3 Comportamento em aceleração

A aceleração é uma etapa relevante para o desempenho do veículo. Nessa situação as forças existentes são similares ao comportamento em frenagem, havendo a mudança de sentido de algumas forças. A força de tração (F_s) e a resistência aerodinâmica (F_d) são as componentes externas existentes nesse segmento.

A força de tração é influenciada pela configuração do sistema de transmissão existente no carro, se o mesmo apresenta tração integral ou tração em somente um

dos eixos. Essa força é dependente do coeficiente longitudinal de atrito e do carregamento normal, porém diferentemente da situação em frenagem, o carregamento normal é dado por 100% da massa do veículo na tração integral e 50% da massa em tração em único eixo. A Figura 23 mostra as forças atuantes no segmento de aceleração.

Figura 23 - Diagrama de corpo livre do veículo em situação de aceleração



Fonte: OptimumG (2022, p.65)

A equação que modela a resistência aerodinâmica é a mesma do segmento em frenagem, mostrada na equação (8). Já a equação que modela a força de tração é apresentada na equação (15).

$$F_s = \text{Carregamento normal} \cdot \mu_x \quad (15)$$

Combinando as equações desenvolvidas e aplicando-as na 2ª Lei de Newton, se chega na equação (16) que descreve o movimento em aceleração.

$$v = v_o + \left(\frac{F_s - F_d}{m} \right) \cdot t \quad (16)$$

4.3 APLICAÇÃO EM MODELAGEM MATLAB

Com objetivo de comparar os resultados obtidos com o programa Optimum Lap, realizou-se a simulação do comportamento do veículo com o auxílio de um código de programação no programa Matlab, em que o objetivo é a realização de cálculos numéricos.

O código utilizado nesse estudo chama-se OpenLap, que consiste em um *Laptime Simulation* codificado no Matlab. Esse código foi desenvolvido pelo engenheiro mecânico, Michael Chalkiopoulos, especialista em desenvolvimento de simuladores para Fórmula 1, a maior categoria de automobilismo do mundo.

O código utiliza a metodologia em regime permanente e também simula o veículo como um ponto de massa, sendo dividido em quatro etapas de funcionamento:

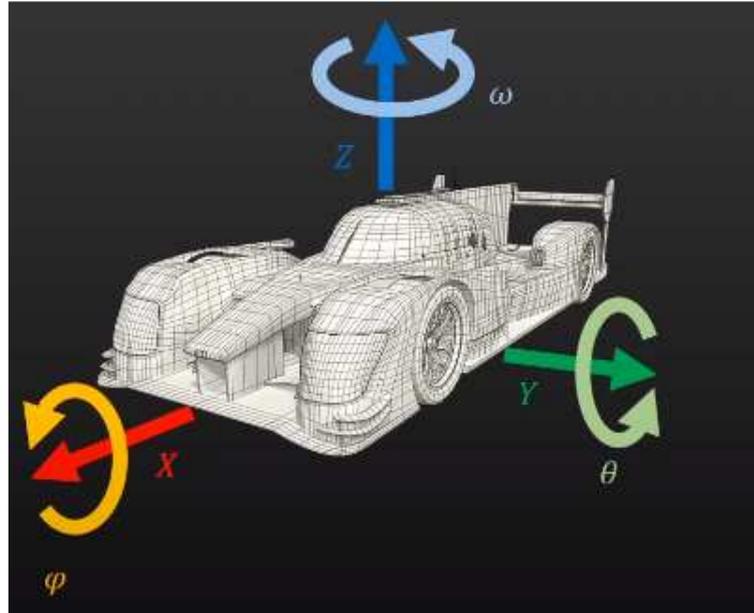
- Open Vehicle
- Open Track
- Open Drag
- Open Lap

4.3.1 Open Vehicle

A modelagem do veículo no OpenLap inicia com o fornecimento dos dados do carro em uma planilha no programa Excel. Nessa planilha são solicitadas informações sobre o tipo de veículo, aerodinâmica, freios, pneus, motor e sistema de transmissão e com isso o veículo pode ser modelado no código elaborado.

Um ponto relevante na modelagem é a convenção dos eixos do carro, pois esses serão responsáveis para uma boa compreensão dos resultados obtidos. O sistema de coordenadas utilizados nesse caso é descrito na Figura 24.

Figura 24 – Definição dos eixos de coordenadas



Fonte: Chalkiopoulos (2020)

A definição dos eixos se baseia na convenção da regra da mão direita, onde os parâmetros mostrados na Figura 24 são:

- X = Para frente
- Y = Para esquerda
- Z = Para cima
- ω = Rotação no eixo Z
- ϕ = Rotação no eixo X
- θ = Rotação no eixo Y

A modelagem do veículo segue as equações fundamentais da dinâmica veicular, seguindo rigorosamente as equações que descrevem a modelagem de um automóvel. O código desta seção pode ser encontrado nas referências bibliográficas desse trabalho.

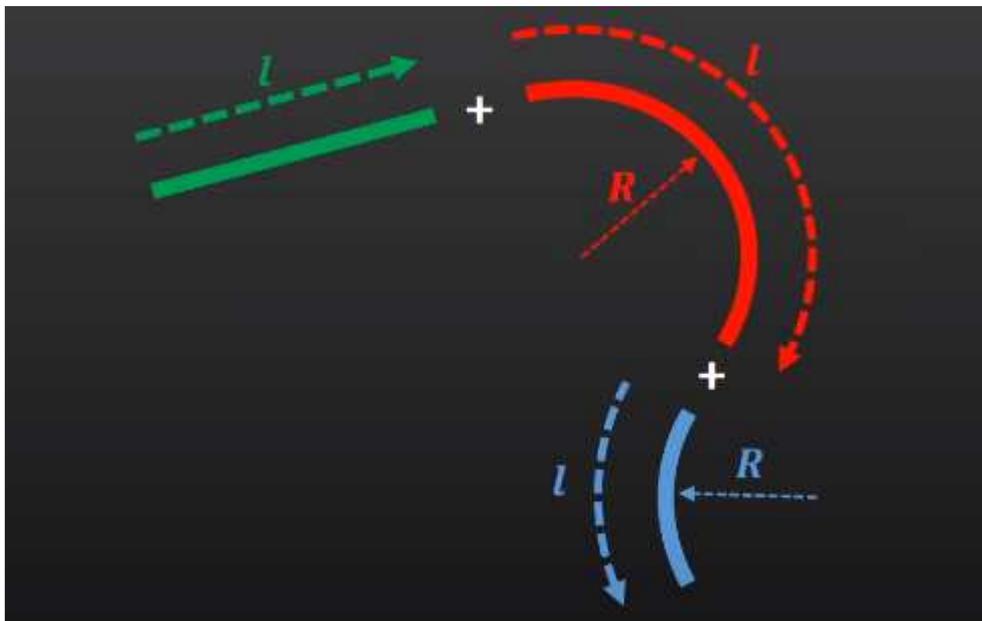
4.3.2 Open Track

A criação de um circuito para simulação no OpenLap ocorre na parte do código chamada Open Track, a qual da mesma maneira que na modelagem do veículo

recebe a entrada dos dados por meio de uma planilha. Essa planilha realiza a descrição de cada segmento da pista, sendo divididos em retas, curvas à direita e curvas à esquerda.

Para cada segmento cabe ao usuário informar o comprimento e o raio do mesmo. Vale ressaltar, de acordo com Chalkiopoulos (2020), que o raio é o valor exato no centro da curva e é interpolado suavemente para geração da curva. Já para os segmentos de reta a sua magnitude é nula.

Figura 25 – Parâmetros de geração da pista no OpenLap



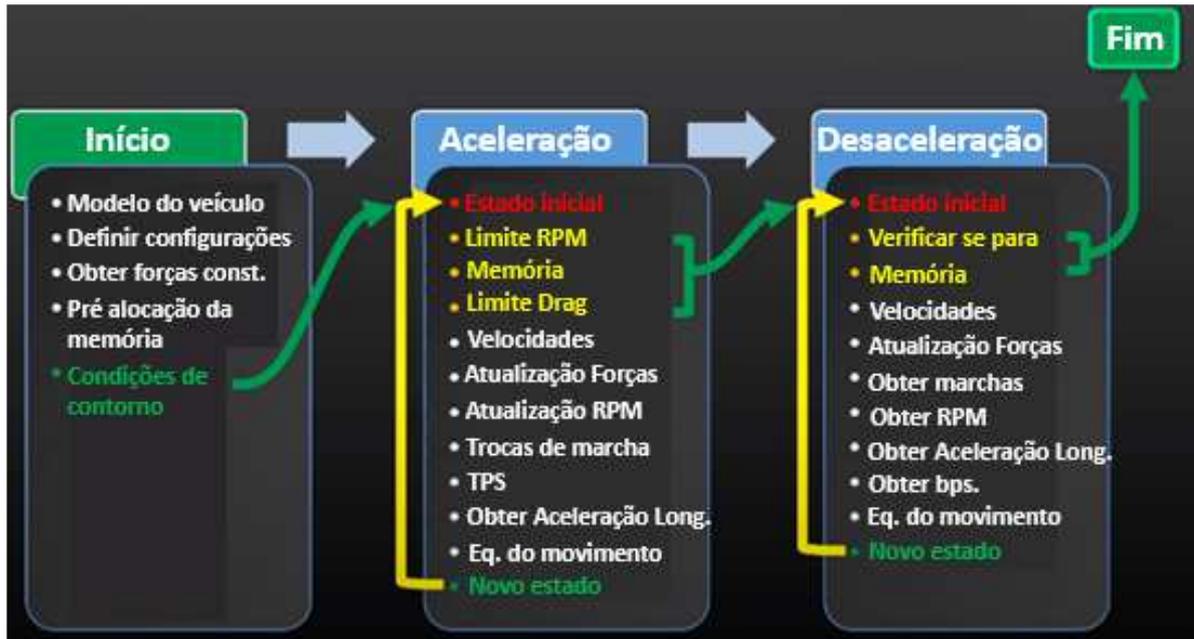
Fonte: Chalkiopoulos (2020)

4.3.3 Open Drag

Segundo Chalkiopoulos (2020), “Open Drag simula o veículo em uma linha reta para estimar a sua performance em aceleração e frenagem”, tornando possível a análise do comportamento do veículo de maneira rápida e prática. Esse processo inicia com velocidade do veículo igual a zero e segue até que a velocidade máxima seja atingida, iniciando em seguida a frenagem.

Para esses cálculos são assumidas algumas hipóteses, como a inexistência de transferência de carga e embreagem. As etapas de processamento desse módulo do código estão descritas com maiores detalhes na Figura 26.

Figura 26 – Etapas de processamento do Open Drag



Fonte: Adaptado de Chalkiopoulos (2020)

4.3.4 Open Lap

O Open Lap, também chamado de *Laptime Simulation*, é o responsável pela realização do comportamento do veículo em uma pista. Para o seu funcionamento são necessárias duas informações imprescindíveis: a geração do carro no Open Vehicle e a geração da pista no Open Track.

Com as informações recebidas o código realiza as simulações utilizando equações da dinâmica veicular e obtém resultados sobre tempo, velocidade, aceleração e entre outras variáveis. Também é fornecido como resultado um mapa da pista com as velocidades percorridas pelo automóvel em cada ponto da mesma.

5. RESULTADOS

A análise de alguns modelos que serão aplicadas neste trabalho será mostrada no capítulo atual, o qual apresentará os resultados das modelagens mostradas nas seções 4.2 e 4.3. Diante do objetivo de comparar o projeto atual da equipe com sistema de transmissão sequencial, confrontando com um novo sistema de transmissão do tipo CVT, serão mostradas análises em ambos os modelos.

Os primeiros resultados da simulação foram obtidos pelo programa Optimum Lap, devido a sua agilidade na obtenção dos resultados. Além disso, a fim de atestar a veracidade das informações obtidas, também foi aplicada a modelagem pelo programa Matlab.

As simulações focaram nas provas de Aceleração e Autocross com o intuito de obter o tempo de volta. Essas escolhas se deram pela representatividade que uma alteração de um sistema de transmissão pode ocasionar em ambas, uma vez que são provas que exigem um bom comportamento da aceleração longitudinal.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO

O entendimento das deduções e equações antes de uma etapa de simulação são fundamentais para uma melhor compreensão dos resultados obtidos. A partir dessa compreensão é imprescindível que se colete os dados de entrada veículo que deseja-se simular, nesse caso o veículo Fórmula SAE.

A simulação de um sistema de transmissão depende principalmente dos dados do motor, haja vista que o fluxo de potência é passado para a transmissão. A equipe Fórmula CEM utiliza atualmente um motor da motocicleta Yamaha XT660 e um sistema de transmissão sequencial com 5 marchas.

Figura 27 – Powertrain do veículo Fórmula CEM



Fonte: Formula CEM (2022)

Os primeiros dados necessários para a simulação de um veículo são relacionados a parte do motor, uma vez que é por meio dele que inicia o fluxo de potência do automóvel. Entre os dados do motor destaca-se a curva de torque e potência que demonstra o comportamento do motor em cada faixa de rotação, como foi apresentado na Figura 15.

Os dados de um motor podem ser obtidos por meio de fornecimento do próprio fabricante ou mediante a testes executados em dinamômetro. O dinamômetro é um equipamento capaz de executar testes do motor, sendo que existem os dinamômetros de inércia e os freios dinamométricos (MARTINS, 2007).

Para obtenção dos dados da equipe Fórmula CEM foram executados testes em um dinamômetro inercial que consiste em cilindros que são forçados a rodar pelo motor. Segundo Martins (2007), “O motor pode estar diretamente acoplado ao dinamômetro ou o veículo pode colocar as rodas motrizes diretamente sobre os cilindros de inércia. Neste caso estamos a medir a inércia não só dos cilindros mas também do sistema de transmissão e das rodas”

Os testes executados pela equipe foram obtidos em 2018 e realizou-se uma amostragem com 12 medições, adquirindo os seguintes dados: torque; potência; velocidade; e tempo. Para a obtenção desses dados os testes foram efetuados com a variação da rotação do motor em uma faixa de 0 à 6200 rotações por minuto.

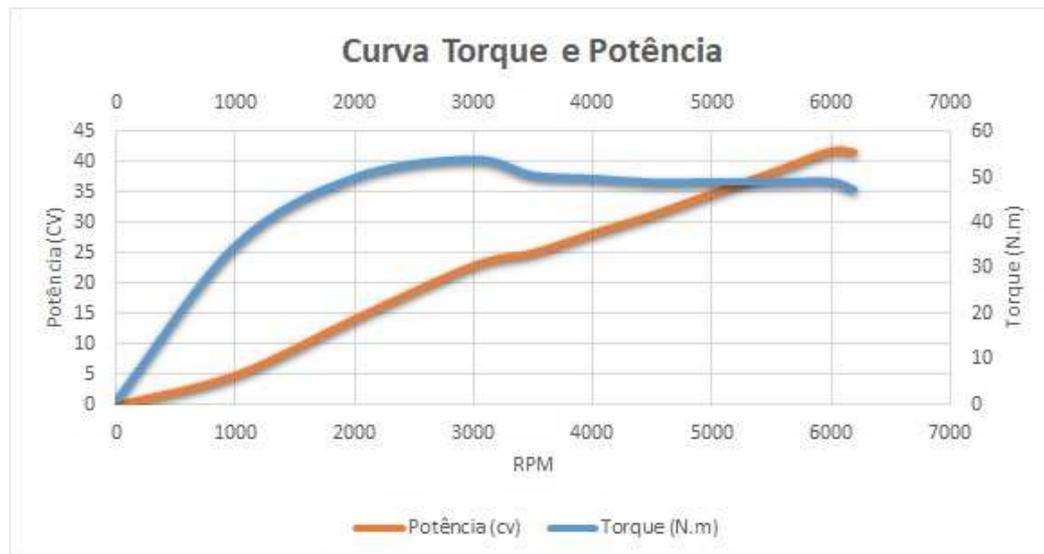
Figura 28 – Execução de teste em dinamômetro



Fonte: Fórmula CEM¹ (2022)

Com isso, puderam ser encontrados os resultados da curva de torque e potência do motor, a qual é mostrada na Figura 29.

Figura 29 – Curva de torque e potência da equipe Fórmula CEM



Fonte: Adaptado de Equipe Fórmula CEM² (2022)

¹ Fotografia coletada pela equipe Fórmula CEM no ano de 2018

² Dados adquiridos com a equipe Fórmula CEM

Além dos dados relacionados ao motor, para realizar uma simulação de um veículo são necessários outros dados para a modelagem completa do mesmo. Nas abordagens escolhidas para esse estudo as principais informações necessárias foram descritas na Tabela 3. Esses dados foram obtidos com auxílio de estudos previamente realizados pela equipe e são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do veículo

Dados	Valor
Tipo do veículo	Formula SAE
Massa	376,0 kg
Tipo do powertrain	2WD
Coefficiente de arrasto	0,74
Coefficiente de downforce	-0,12
Área frontal	1,216 m ²
Densidade do ar	1,13 km/m ³
Raio do pneu	0,255 m
Resistência ao rolamento do pneu	0,015
Coefficiente de fricção longitudinal do pneu	1,15
Coefficiente de fricção lateral do pneu	1,15

Fonte: Formula CEM³ (2022)

Os dados de entrada necessários para realizar a modelagem do veículos foram apresentados na Tabela 4, já os dados relacionados a transmissão atual, são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 5 – Relação de transmissão do sistema sequencial

Marcha	Relação de transmissão
Primeira	2,50
Segunda	1,625
Terceira	1,15
Quarta	0,9090
Quinta	0,7690
Relação Final	6,249

Fonte: Fórmula CEM⁴ (2022)

Com os dados apresentados, torna-se possível comparar o desempenho anterior com a proposta em estudo. Para o modelo CVT, devido às restrições dos programas utilizados será necessário trabalhar com algumas hipóteses a fim de

³ Dados adquiridos com a equipe Fórmula CEM

⁴ Dados adquiridos com a equipe Fórmula CEM

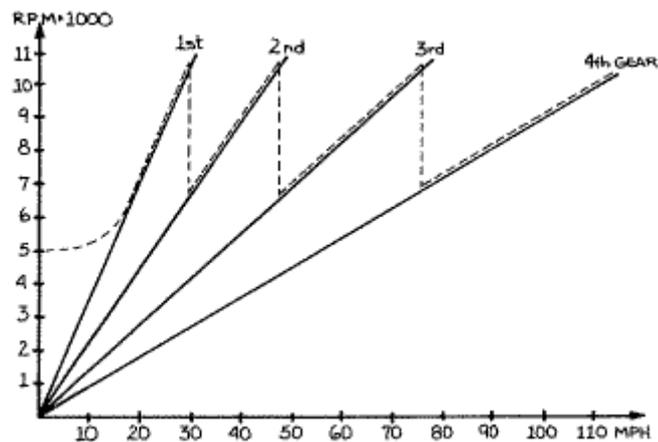
conseguir encontrar o comportamento do veículo nessa situação, sendo essas mostrada na seção a seguir.

5.2 MODELO CVT

Conforme dito, os programas utilizados possuem limitações quanto à configuração de uma transmissão CVT. Ambos os programas não permitem configurar uma transmissão continuamente variável por não terem essa função implementada, sendo necessária a adoção de algumas hipóteses que serão apresentadas nessa seção.

Segundo Aeens (1986), “quando você gostaria de saber em qual marcha um veículo está, deve-se comparar a velocidade do motor (RPM) e a velocidade do veículo (MPH)”. O gráfico gerado por essas duas variáveis de um veículo é conhecido como gráfico dente de serra, dado que no sistema de transmissão sequencial costuma se apresentar dessa forma.

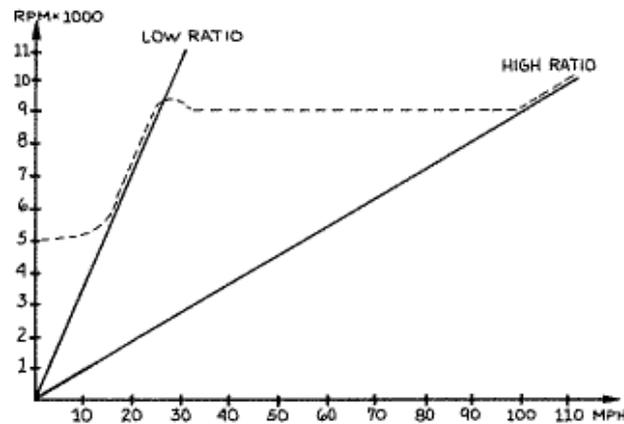
Figura 30 – Gráfico de um sistema de transmissão sequencial



Fonte: Aeens (1986, p. 9)

Para a transmissão continuamente variável essa representação apresenta um comportamento diferente, pois nesse caso o sistema passa a ter infinitas relações. Com isso, a rotação de trabalho do motor não sofre oscilações sendo mantida no ponto de máxima potência do mesmo, conforme é mostrado na Figura 31 (AAENS, 1986).

Figura 31 – Gráfico de um sistema de transmissão CVT

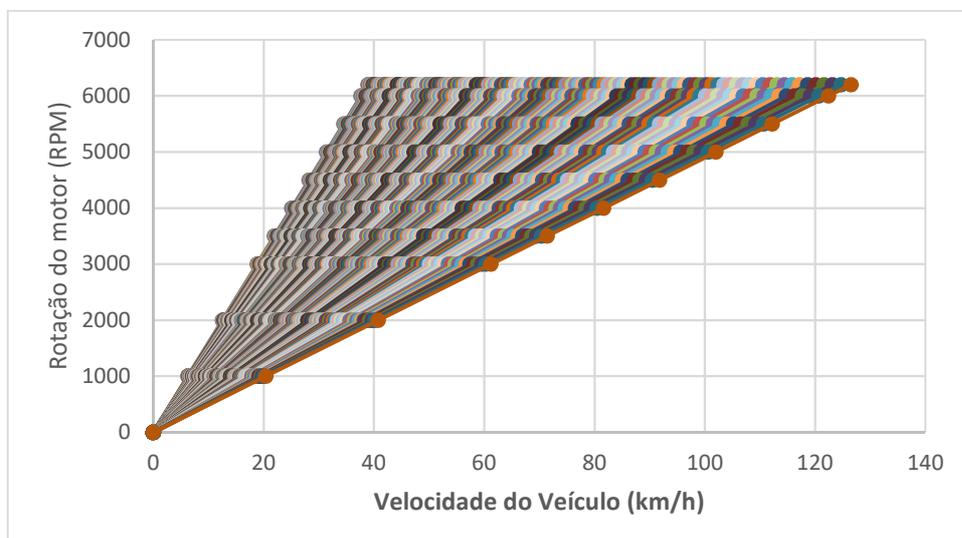


Fonte: Aeens (1986, p. 9)

Em ambos os programas utilizados nesse trabalho a hipótese abordada para a geração de uma transmissão CVT foi por meio de uma transmissão sequencial com múltiplas marchas. A hipótese adotada foi a de criar uma grande quantidade de relações de transmissões com o intuito de reduzir ao máximo as variações de rotação do motor, conforme foi exemplificado na figura anterior.

No caso do Optimum Lap se fez a geração com a adição de 174 relações de transmissão em um sistema sequencial. Dessa forma, as relações foram divididas em incrementos de um centésimo, sendo variadas entre 2,5 e 0,769, sendo assim possível realizar uma simulação de acordo com a definição de uma transmissão continuamente variável.

Figura 32 – Aplicação de uma transmissão CVT no veículo



Fonte: Autor (2022)

Pela Figura 32 é possível visualizar que a abordagem utilizada faz com que se tenha um sistema de transmissão com características bem próximas de uma transmissão continuamente variável, ou seja, neste caso o motor trabalhará no seu ponto de máxima potência, conforme explicado na Figura 31.

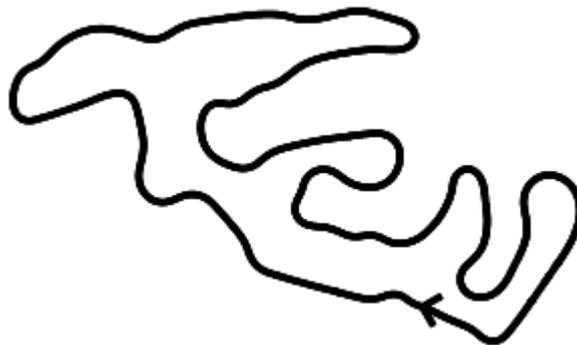
5.3 ANÁLISE DO TEMPO DE VOLTA

O primeiro estudo realizado com a simulação foi concentrado em encontrar as diferenças em relação tempo de volta em diferentes tipos de circuito. Como os programas utilizados no estudo não dispunham da pista utilizada na competição do Brasil, optou-se por realizar a simulação em pistas existentes no continente europeu, dado que outras pistas também conseguem mostrar as vantagens de cada configuração.

A primeira análise foi concentrada na prova do Aceleração, pois essa segue as mesmas configurações da competição brasileira. Já para o Autocross, optou-se pelas provas da Alemanha, no circuito de Hockenheim, e Estados Unidos. Esses circuitos apresentam aspectos diferentes, uma vez que o circuito alemão é fechado e o americano é aberto, permitindo que análise abranja ambas as configurações.

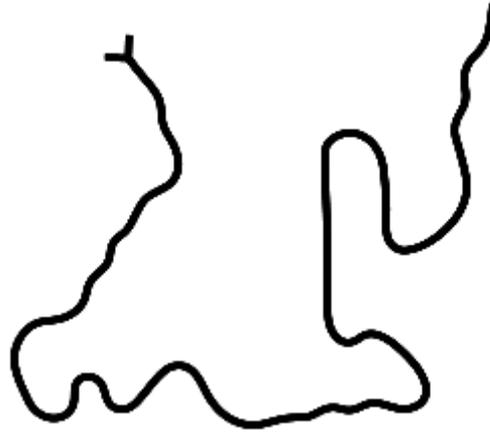
Os circuitos citados estão representados na Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 – Circuito de Autocross da Alemanha



Fonte: Autor (2022)

Figura 34 – Circuito de Autocross dos Estados Unidos



Fonte: Autor (2022)

A prova de Aceleração por se tratar de uma pista curta (75 metros) possui grande influência do sistema de transmissão. Nesse caso, se teve uma redução de 1 décimo e 7 centésimos no tempo da prova, quando utilizado o sistema de transmissão CVT. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.

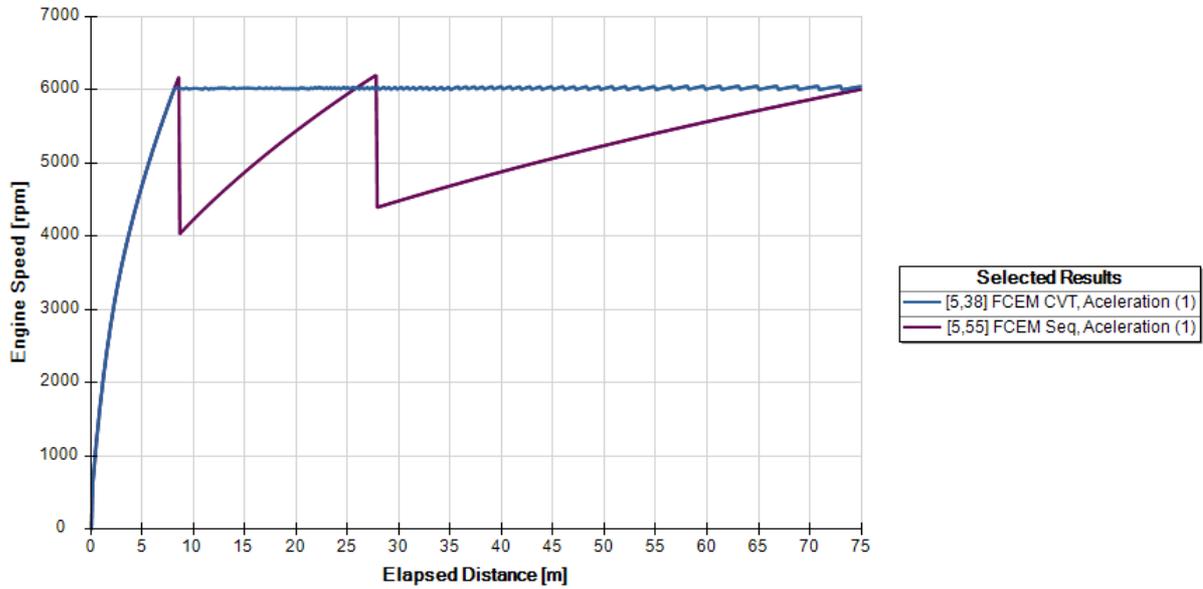
Tabela 6 – Resultados na prova de aceleração

Carro	Aceleração
Fórmula SAE Sequencial	5,55 s
Fórmula SAE CVT	5,38 s

Fonte: Autor (2022)

Essa diminuição está diretamente ligada ao fato de a transmissão CVT conseguir manter o trabalho do motor em seu pico de potência, algo que não ocorre na transmissão sequencial. Para exemplificar melhor esse comportamento, a Figura 35 mostra a variação da velocidade do motor nesses 75 metros da prova.

Figura 35 – Variação da rotação do motor no Aceleração



Fonte: Autor (2022)

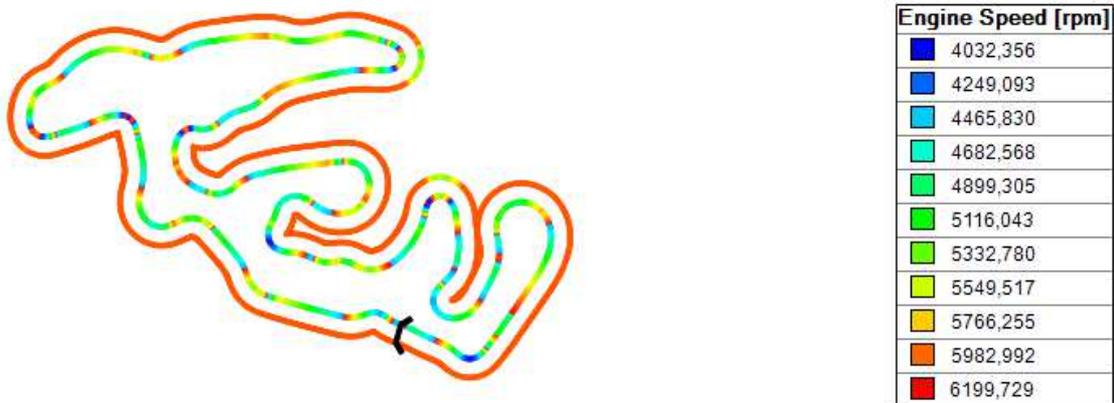
Na prova do Autocross os resultados adquiridos também foram satisfatórios para a transmissão continuamente variável, havendo redução de tempo em ambas as pistas selecionadas. Os tempos alcançados em ambas estão demonstrados na tabela a seguir, bem como é possível visualizar as variações de rotação do motor existentes na Figura 36 e Figura 37.

Tabela 7 – Comparação do tempo de volta no Autocross

Carro	Autocross Alemanha	Autocross Estados Unidos
Fórmula SAE Sequencial	81,88 s	57,02 s
Fórmula SAE CVT	80,93 s	56,43 s

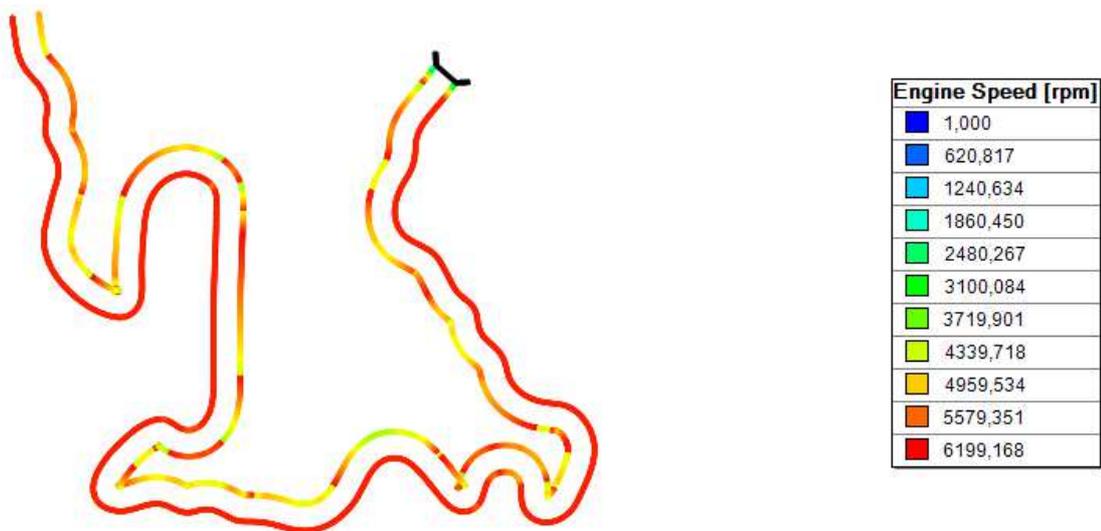
Fonte: Autor (2022)

Figura 36 – Comparação da rotação do motor no Autocross Alemanha



Fonte: Autor (2022)

Figura 37 - Comparação da rotação do motor no Autocross Estados Unidos

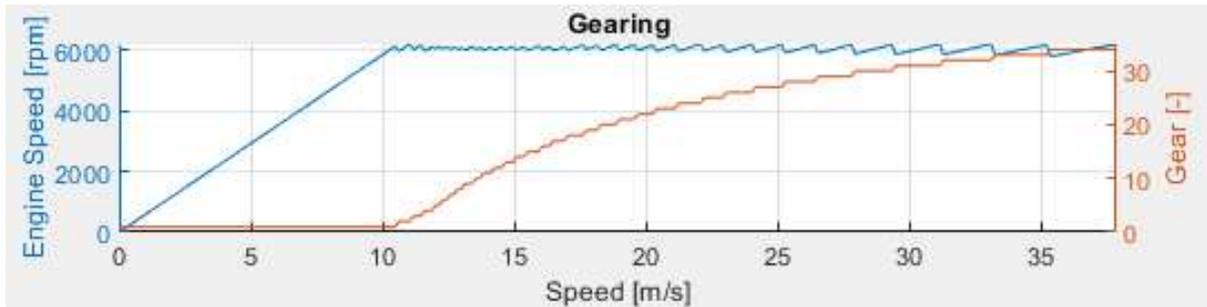


Fonte: Autor (2022)

A segunda etapa para analisar os resultados de tempo de volta adquiridos foi confrontá-los com a abordagem do Matlab, com isso no outro programa a simulação foi concentrada apenas na prova de Aceleração. Para realizar essa simulação, devido ao código apresentar algumas restrições na utilização de uma pista reta com 75 metros, realizou-se a divisão em setores, a fim de encontrar os dados desejados.

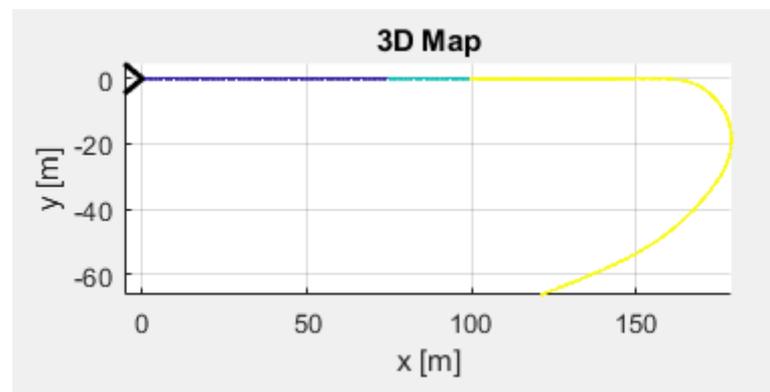
Para a criação do modelo CVT foi necessário reduzir a quantidade de relações de transmissão para trinta e cinco, aumentando assim as oscilações de rotação do motor, como é visto na Figura 38. Para a divisão da pista concentrou-se o primeiro setor em uma reta de 75 metros, simulando assim a pista de Aceleração.

Figura 38 – Modelagem do veículo CVT no Matlab



Fonte: Autor (2022)

Figura 39 – Pista utilizada para a análise no Matlab



Fonte: Autor (2022)

Desse modo, a simulação de interesse foi apenas no primeiro setor da pista, para que fosse possível dispor do tempo nesse local. Vale ressaltar que a descrição do veículo no Matlab é mais completa do que no Optimum G, pois nesse modo são necessárias informações do sistema de freio e direção, os quais foram obtidos por meio de dados da equipe.

Com esses parâmetros selecionados a simulação foi realizada tendo como resultado os valores descritos na tabela a seguir.

Tabela 8 – Análise de tempo no código Matlab

Veículo	Tempo (s)
Fórmula SAE Sequencial	6,531
Fórmula SAE CVT	6,368

Fonte: Autor (2022)

Com esses resultados é evidente que em ambas as abordagens o sistema de transmissão CVT apresenta redução no tempo de volta. É perceptível também que a

modelagem do Optimum Lap apresenta tempos menores em relação ao Matlab, sendo que essa análise foi executada entre os programas.

O motivo da diferença de tempo existente entre os programas não pode ser concluído nesse trabalho, porém todos os valores dos dados de entrada em ambos foram verificados. Para analisar essa diferença realizou-se um estudo entre a distância e o tempo percorrido pelo veículo em uma reta, sendo confrontadas as diferenças dos dois programas, conforme Tabela 9.

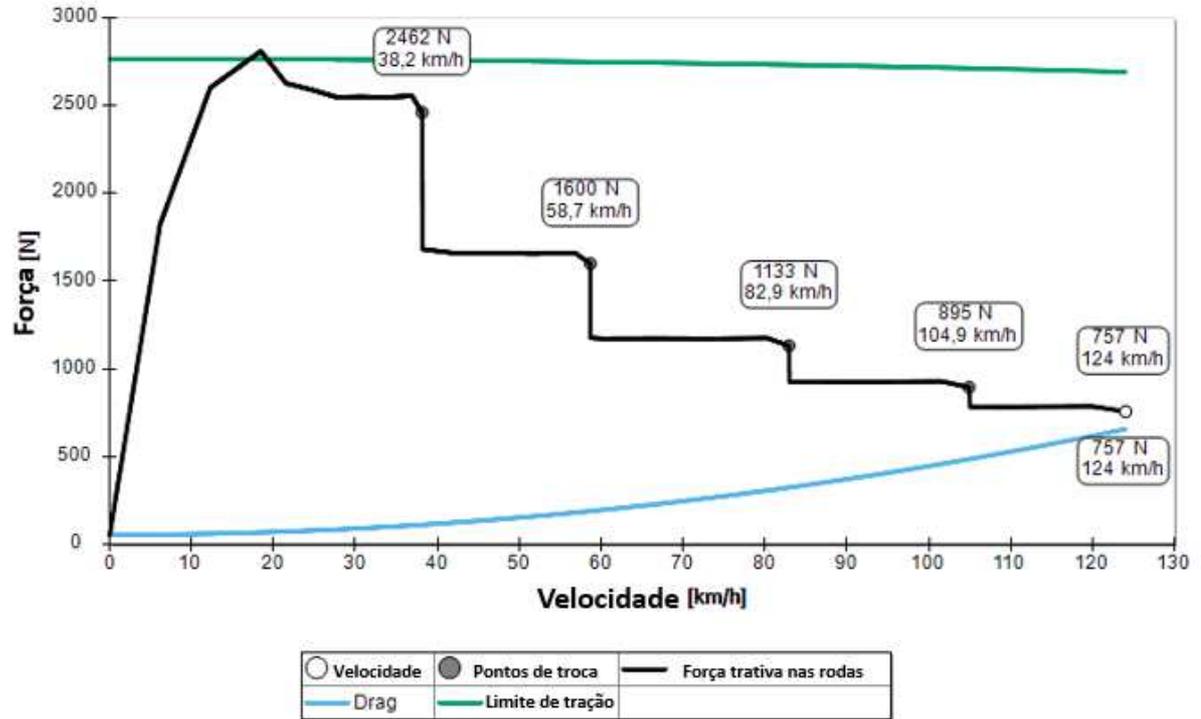
Tabela 9 – Dados comparativos entre os programas

Programa	Velocidade (km/h)	Distância percorrida (m)	Tempo (s)
Optimum Lap	20	2,54	0,93
Open Lap	20	2,71	1,94
Optimum Lap	60	29,92	3,25
Open Lap	60	29,84	4,22
Optimum Lap	100	167,09	9,20
Open Lap	100	156,20	9,72

Fonte: Autor (2022)

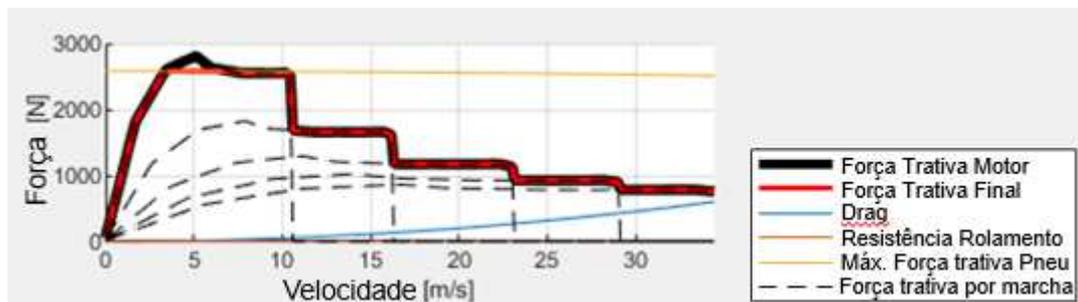
Perante os dados coletados, fica evidente a discrepância existente entre os programas, sendo que os cálculos executados pelo Optimum Lap fazem com que o veículo percorra uma maior distância em menor tempo. Ressalta-se que os dados de modelagem de cada protótipo foram conferidos em cada programa, como ilustram as Figura 40 e Figura 41.

Figura 40 – Veículo modelado no Optimum Lap



Fonte: Autor (2022)

Figura 41 – Veículo modelado no Open Lap



Fonte: Autor (2022)

Diante dos resultados encontrados sugere-se para trabalhos futuros uma análise mais aprofundada dos motivos que podem gerar as variações entre os programas. Por fim, acrescenta-se que as simulações serão comparadas nas seções a seguir com dados de telemetria do veículo original, permitindo melhores conclusões.

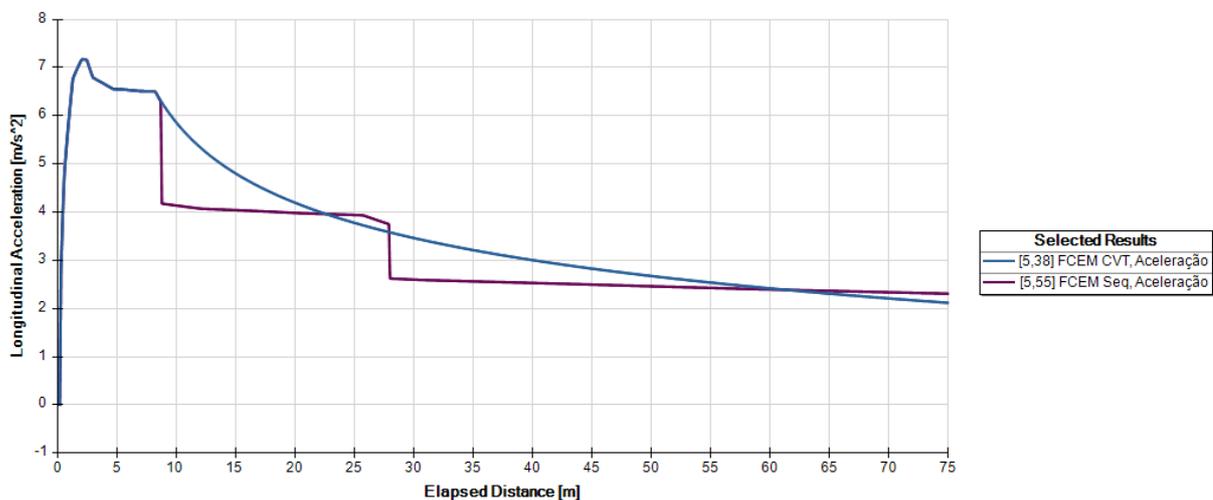
5.4 ANÁLISE DA ACELERAÇÃO LONGITUDINAL

A aceleração longitudinal é um parâmetro importante utilizado para descrever a cinemática de um veículo, sendo definida como a taxa de variação da velocidade na direção longitudinal. Esse estudo é bastante importante para o entendimento do comportamento do automóvel em questões de estabilidade, conforto e segurança (XU et al., 2019).

Dessa forma, o objetivo dessa análise foi analisar as variações existentes da aceleração longitudinal nos dois sistemas de transmissão adotados. A Aceleração longitudinal está diretamente ligada com a taxa de variação da velocidade, permitindo a visualização do comportamento do veículo.

Para uma melhor visualização, concentrou-se o estudo inicial na pista do Aceleração, devido a sua forma linear que exige um bom comportamento da aceleração. Assim, traçou-se as curvas de aceleração longitudinal pela distância da prova em ambos os modelos.

Figura 42 – Comparação da aceleração longitudinal



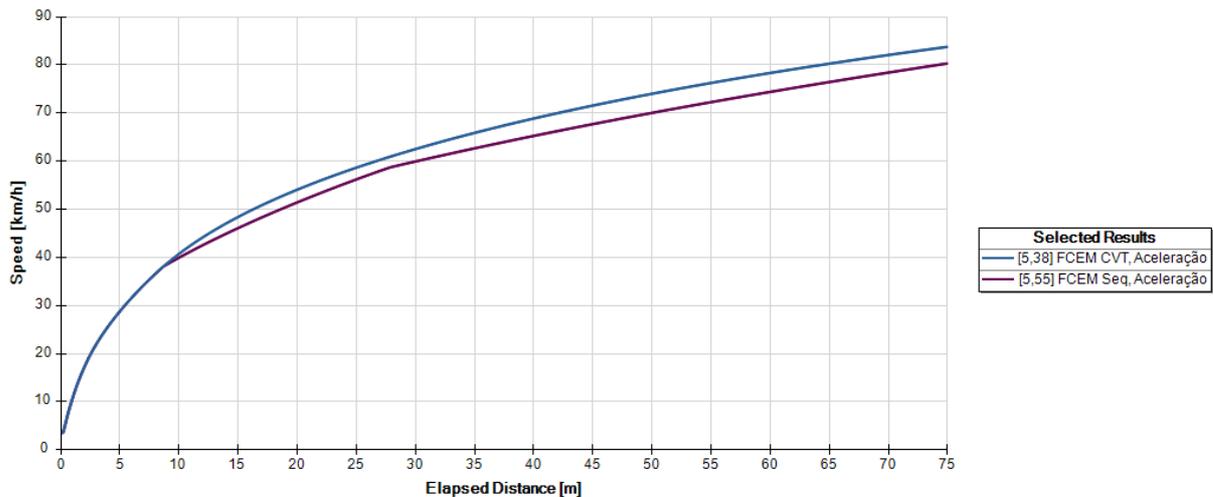
Fonte: Autor (2022)

A Figura 42 mostra como o comportamento pode ser diferente com uma mudança no sistema de transmissão. Como é possível ver no modelo seqüencial, existe uma queda repentina da aceleração longitudinal ocasionada justamente pela mudança da relação de transmissão naquele ponto. Já ao CVT demonstra uma forma

mais suave, o que faz com que o veículo apresente vantagens em relação a dinâmica longitudinal.

Diante disso, o veículo consegue atingir maiores velocidades com a transmissão continuamente variável, ocasionando redução no tempo de volta e melhor eficiência do mesmo. A variação da velocidade em ambos os sistemas pode ser vista na Figura 43.

Figura 43 – Velocidade do veículo para cada sistema de transmissão



Fonte: Autor (2022).

5.5 COMPARAÇÃO EM TELEMETRIA

A análise de telemetria é um ponto importante quando se fala em veículos de competição para a realização de análises do comportamento do veículo. A telemetria consiste em um sistema que é capaz de coletar os dados do carro para uma posterior análise da equipe, tendo uma tecnologia bastante avançada principalmente nos carros de Fórmula 1 (BOCCI, 2020).

Na equipe Fórmula CEM é comum antes das competições a realização de alguns testes com o carro, a fim de obter a melhor configuração possível, bem como tirar alguns parâmetros de dirigibilidade para o piloto.

Um dos testes realizados é o teste de Aceleração, que corresponde a uma simulação da prova estática da competição. Para o presente estudo, obteve-se os dados desses testes no intuito de realizar uma comparação com as simulações executadas no decorrer desse trabalho.

Para esse estudo comparativo, coletou-se os tempos do Aceleração. Não obstante, vale ressaltar que, não foi possível utilizar os dados coletados pelo próprio veículo, sendo esses executados de forma manual com cronômetro. Por conta disso, utilizou-se uma amostra com 10 medições, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Amostra com dados de Aceleração

Medida	Tempo (s)
1	5,65
2	5,31
3	5,45
4	5,64
5	5,45
6	5,44
7	5,40
8	5,52
9	5,67
10	5,59
Média Amostral	5,512
Desvio Padrão	0,121454

Fonte: Formula CEM⁵ (2022)

É importante dizer que se tem ciência que os dados adquiridos não são tão precisos quanto os coletados por meio de sistema de telemetria, uma vez que pode haver erros por parte do usuário.

Analisando os dados adquiridos por telemetria e comparando com as simulações executadas no decorrer desse trabalho pode-se dizer que os resultados alcançados pelo programa Optimum Lap foram satisfatórios, uma vez que foram bem próximos aos dados de validação. Para um estudo de simulação isso se demonstra muito relevante, pois dá credibilidade as análises desenvolvidas.

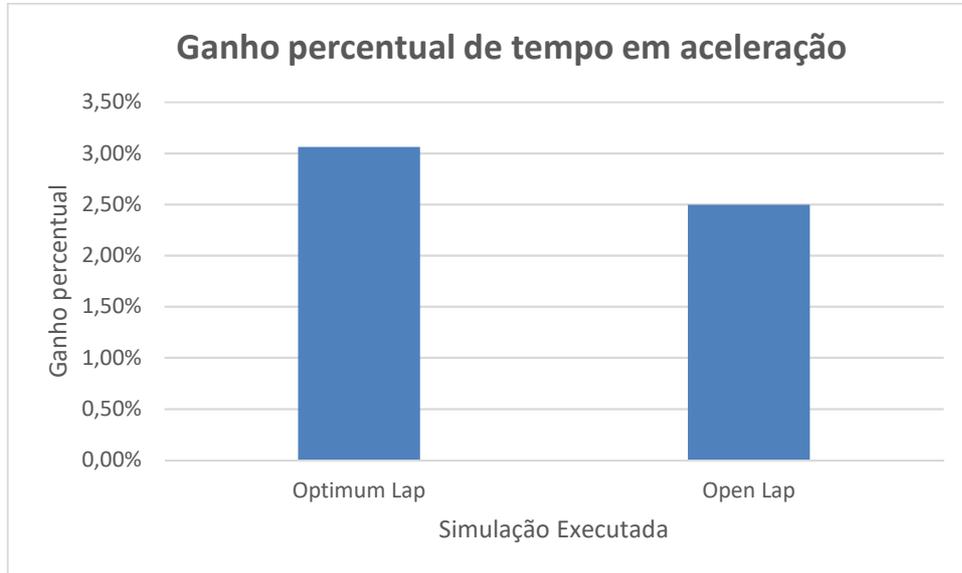
Quanto aos dados adquiridos pelo Open Lap se demonstram distantes dos resultados da telemetria, porém, do mesmo modo, representam uma redução do tempo de volta quando empregada a utilização da transmissão CVT. Portanto, em ambas as simulações pode-se dizer que houveram reduções de tempo.

Vale ressaltar que, em ambas as simulações executadas a transmissão continuamente variável conseguiu melhores resultados do que a transmissão sequencial para as provas e pistas selecionadas. A Figura 44 traz uma análise

⁵ Dados adquiridos com a equipe Fórmula CEM

percentual entre as simulações realizadas para os resultados na prova de aceleração, podendo assim afirmar que o resultado foi satisfatório nas duas abordagens.

Figura 44 – Resultado percentual de ganho no tempo de volta



Fonte: Autor (2022)

6. CONCLUSÃO

O trabalho em estudo procurou realizar a simulação de desempenho de um veículo Fórmula SAE comparando a aplicação de uma transmissão continuamente variável com uma transmissão sequencial, utilizando como base o protótipo da equipe Fórmula CEM da Universidade Federal de Santa Catarina.

O estudo concentrou-se na utilização de simulações de ponto de massa, sendo abordada toda a metodologia quanto ao seu uso e apresentadas todas as hipóteses adotadas para a sua realização. Já entre as modelos de simulação se optou por seguir a modelagem quase estática devido a entrega de resultados rápidos e eficazes.

Para a realização das simulações, foi escolhido como programa o Optimum Lap, sendo apresentados os equacionamentos matemáticos utilizados em seus cálculos de frenagem, aceleração e curva, a fim de uma melhor compreensão da sua maneira de trabalho. Além do Optimum Lap, foi utilizado um código desenvolvido no programa Matlab, chamado de OpenLap, para a comparação dos resultados.

As simulações foram efetuadas com o objetivo de entender o desempenho do veículo em provas que existem na competição de Fórmula SAE. Entre as provas existentes, escolheu-se as de Aceleração e Autocross, pois poderiam retratar bem o veículo em situação de partida e também o entendimento do carro em uma volta na pista, sendo optado nesse caso por uma pista fechada e outra aberta.

Por meio das pistas escolhidas, buscou-se analisar a influência do sistema de transmissão em relação ao tempo de volta e na aceleração. A execução da simulação foi feita para o modelo atual da equipe (transmissão sequencial de cinco velocidade) e para a transmissão CVT, que fora modelada com adoção de algumas hipóteses.

Com as estratégias de simulações traçadas, obteve-se os resultados para a realização das análises propostas. Por meio dos gráficos e tempos de pista encontrados foi possível entender a influência do sistema de transmissão de um veículo Fórmula, sendo que em ambos os cenários de simulação foram obtidas reduções em relação tempo de volta do carro e conseqüentemente melhores comportamento de aceleração do mesmo.

Entre os dados alcançados, preocupou-se em entender se eles representam, de fato, a realidade do veículo. Por isso, também foi realizada uma comparação com

alguns dados de telemetria disponíveis atualmente pela equipe, que se apresentaram próximos das simulações encontradas pelo programa Optimum Lap, o que permitiu uma maior confiabilidade dos resultados adquiridos.

Ressalta-se também que todos os objetivos traçados nesse trabalho foram cumpridos, uma vez que se pôde realizar as simulações do carro atual e da proposta CVT, definidos os parâmetros de sua modelagem. Diante disso, tornou-se possível adquirir as informações esperadas a respeito dos tempos de pista e do comportamento em aceleração, ilustrando como viáveis as análises e comparações entre os sistemas.

Por fim, como proposta para futuros trabalhos, cita-se:

- Estudo aprofundado das diferenças existentes entre uma simulação executada nos programas Optimum Lap e Open Lap;
- Realização de estudo com dados precisos de telemetria.

REFERÊNCIAS

AAEN'S, Olav. **Clutch Tuning Handbook**. [s.l.]: [s.n.], 1986.

AMARAL, Marlon. **Desenvolvimento de projeto do flange de acoplamento da coroa aplicado ao sistema de transmissão de um veículo de competição Fórmula SAE**. 2020. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

BOCCI, Emanuel Damasceno. **Projeto de um sistema embarcado de aquisição de dados com implementação e testes de sistema de telemetria**. 2020. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2005.

BRASIL, SAE. **Fórmula SAE Brasil**. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programa-s-estudantis/formula-sae-brasil/>. Acesso em: 13 set. 2021.

CHALKIOPOULOS, Michael. **OpenLAP Time Simulator Series**. Youtube, 23 jun. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLQiPsAzoaLqUtdVImOM4WjzoYrNUy7fve>. Acesso em: 06 jun. 2022.

COSTA, Carlos Augusto Pereira da *et al.* **APPLICATION STUDY OF A CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION (CVT) ON A PROTOTYPE OF FORMULA SAE**. São Paulo: Sae International, 2015.

CROLLA, David A.. **Automotive Engineering: powertrain, chassis system and vehicle body**. Oxford: Elsevier, 2009.

FORMULA CEM. **Formula CEM**. 2022. Disponível em: <https://formulacem0.wixsite.com/website/historico>. Acesso em: 05 jul. 2022.

GENTA, G.; MORELLO, L. **The automotive Chassis - Volume 1 : Components design**. 1. ed. Torino, Italy: Springer, 2009.

GILLESPIE, T. D., **Fundamentals of Vehicle Dynamics**, Society of Automotive Engineers Inc., 1992.

HALLIDAY, David *et al.* **Fundamentos da Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 797 p.

LECHNER, Gisbert; NAUNHEIMER, Harald. **Automotive Transmission: fundamentals, selection, designs and application**. Berlin: Springer, 1999.

MALACO FILHO, Jonas Tadeu. **Desenvolvimento de sistema de transmissão para veículo de Fórmula SAE**. 2009. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia

Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2009.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2006. 437 p.

MILLIKEN, William F. *et al.* **Race car vehicle dynamics**. Warrendale: Sae International, 1995.

NAUNHEIMER, Harald *et al.* **Automotive Transmissions: fundamentals, selection, design and application**. 2. ed. Berlin: Springer, 2010.

NORTON, Robert L.. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

OPTIMUMG (Estados Unidos). **OptimumLap v1.4: vehicle dynamics simulation. simplified..** Denver: [S.N], 2022.

SIEGLER, Blake *et al.* **Lap Time Simulation: comparison of steady state, quasi-static and transient racing car cornering strategies**. Dearborn: Sae International, 2000.

SOCIETY AUTOMOTIVE ENGINEERING. **RULES 2022 VERSION 2.1: Fórmula SAE**. [s.i]: [s.n], 2021.

XU, Jin *et al.* Longitudinal acceleration of vehicles on complex mountain roads. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers – Transport**. [S.l], p. 249-263. jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jtran.16.00032>. Acesso em: 10 jul. 2022.