

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle e Automação e Computação



Daniele Kuchenbecker

Ferramenta Computacional para Cálculo de Pontos de Troca de
Marcha em Transmissões Manuais Automatizadas

Blumenau

2021

Daniele Kuchenbecker

**Ferramenta Computacional para Cálculo de Pontos
de Troca de Marcha em Transmissões Manuais
Automatizadas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Mejia Rincon

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle e Automação e Computação

Blumenau
2021

Daniele Kuchenbecker

Ferramenta Computacional para Cálculo de Pontos de Troca de Marcha em Transmissões Manuais Automatizadas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Leonardo Mejia Rincon
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Prof. Dr. Daniel Alejandro Ponce Saldías
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Gonzalo Guillermo Moreno
Universidad de Pamplona - Colômbia

Blumenau, 24 de maio de 2021

Dedico este trabalho à minha família e ao meu orientador,
sem os quais eu não teria chegado até aqui.

Agradecimentos

Há tanto para agradecer por ter chegado à conclusão desta etapa, que só foi possível graças ao auxílio e compreensão de muitas pessoas importantes para mim.

Agradeço aos meus pais, Luís Carlos Kuchenbecker e Marlene Doege Kuchenbecker, e irmãs, Priscila Kuchenbecker e Louise Kuchenbecker, que acompanharam meus maiores desafios desde o início e nunca deixaram de dar o apoio necessário. Também aos demais familiares e, em especial, às minhas avós, Ilse Kuchenbecker e Norma Doege, obrigada por sempre se preocuparem e torcerem por mim.

Agradeço ao meu orientador, Leonardo Mejia Rincon, por ter aceitado o desafio que eu trouxe, pela imensa compreensão e prestatividade sem igual. Palavras não são suficientes para descrever seu dom como educador. Sou muito grata por tudo que me ensinou e por me ajudar a desenvolver meu potencial.

Agradeço aos demais professores da UFSC que participaram da minha formação como Engenheira. Vocês ensinaram muito mais do que teorias acadêmicas. Obrigada por não se acomodarem diante dos desafios e pelas soluções inovadoras. Nosso sucesso, como alunos, é reflexo do esforço de vocês.

Agradeço à empresa onde realizei meu estágio curricular obrigatório pela oportunidade que me foi concedida. A experiência profissional foi fundamental para complementar minha formação. Poder unir o que estudei durante a graduação ao que aprendi na empresa e aplicar na resolução de um desafio real permitiu-me vivenciar a engenharia na prática, e agradeço por isso. Também aos colegas de trabalho, meu muito obrigada por sempre se mostrarem dispostos a me ensinar e a me envolver nas atividades, de modo a acelerar meu amadurecimento profissional.

Agradeço aos amigos que a Universidade me deu. Suportamos tantos desafios juntos, amadurecemos e conquistamos nossos objetivos. Dividindo as cargas, a trajetória foi mais leve. Agradeço pelos trabalhos em grupo e conversas que nos auxiliaram a desenvolver nosso raciocínio crítico. Também as risadas foram importantes para balancear as pressões do dia a dia. Sou grata por essas amizades e espero levá-las para a vida.

E agradeço a Deus por estar no controle mesmo quando o caminho não é claro.

"O tamanho dos seus sonhos deve sempre exceder a sua capacidade de alcançá-los. Se os seus sonhos não te assustam, eles não são grandes o suficiente."
(Ellen Johnson-Sirleaf)

Resumo

No final do século XIX ocorreu uma grande popularização dos automóveis, e a partir desse momento, uma contínua evolução das tecnologias associadas ao setor automobilístico tem se evidenciado. Um elemento fundamental no funcionamento dos veículos modernos é a transmissão, que pode ser de diversos tipos como mecânica, automática, mecânica automatizada ou CVT.

Na busca por maior conforto e simplicidade para operar um veículo, transmissões automáticas têm despertado o interesse por retirar do motorista a responsabilidade de realizar as trocas de marchas. Porém esse tipo de transmissão costuma ter um custo maior do que uma transmissão mecânica. Uma boa alternativa às transmissões automáticas são as transmissões mecânicas automatizadas (AMTs), que possuem uma configuração igual à de uma transmissão manual, porém um atuador comandado por uma Unidade de Controle da Transmissão (TCU) realiza a abertura e fechamento da embreagem.

Um dos principais desafios relacionados às transmissões mecânicas automatizadas é o de calibrar corretamente os pontos em que as trocas das marchas devem acontecer. Engenheiros de calibração dispõem inúmeras horas de trabalho calibrando manualmente cada um dos pontos de troca de marcha.

O presente trabalho apresenta uma proposta metodológica que visa acelerar o processo de calibração a partir da pré-determinação automática dos pontos de troca, gerados por um algoritmo baseado em variáveis da dinâmica veicular. O escopo se restringe à calibração de AMTs via mapas de pontos de troca e visa a fornecer um ponto de partida para a atividade de calibração, para que depois haja um ajuste fino realizado junto ao engenheiro de calibração.

A fim de validar os procedimentos metodológicos propostos, uma ferramenta computacional para cálculo de pontos de subida de marcha em transmissões manuais automatizadas foi implementada. Resultados do funcionamento dessa ferramenta são apresentados em um estudo de caso cujo contexto é a calibração dos pontos de subida de marcha de um caminhão leve, com transmissão automatizada de seis marchas, visando à economia de combustível.

Palavras-Chave: 1. AMT. 2. Automação de processos. 3. Calibração.

Abstract

Automobiles became very popular by the end of the 19th century. Since then, there has been a significant rise in technologies related to the automotive sector. One of the fundamental components of modern vehicles is the transmission, which can be mechanical, automatic, mechanical automated or CVT.

Seeking more comfort and simplicity in the process of driving a vehicle, automatic transmissions have been arousing interest of drivers for taking away their responsibility in gear shifting. This type of transmission is usually significantly more expensive than a mechanical transmission, though. A good alternative to automatic transmissions are automated manual transmissions (AMTs), which have the same configuration as mechanical transmissions, but count with a Transmission Control Unit (TCU) controlling clutch actuation.

One of the biggest challenges related to AMTs is to achieve good shift point calibration. Calibration engineers spend innumerous work hours setting each shifting point manually.

The present work presents a methodological proposal aiming to accelerate calibration process by an automatic predetermination of shifting points, generated by an algorithm based on vehicle dynamics variables. The scope is limited to AMT calibration via shift point calibration maps and aims to provide a starting point for calibration activities, followed by fine-tuning performed by a calibration engineer.

In order to validate the methodological procedures proposed in this work, a computational tool for AMT shift point calculation was implemented. Results are presented in a case of study involving upshifting calibration of a light-duty truck with 6-speed AMT, aiming for economic calibration.

Keywords: 1. AMT. 2. Process automation. 3. Calibration.

Lista de figuras

Figura 1 – Sistema de Transmissão Manual.	18
Figura 2 – Alavanca de câmbio automatizado com opção de troca de marcha manual.	19
Figura 3 – Par de engrenagens em sistema redutor.	22
Figura 4 – Par de engrenagens em sistema multiplicador.	23
Figura 5 – Fluxo de potência na transmissão com marchas engatadas.	25
Figura 6 – Conjunto de embreagem e volante do motor.	26
Figura 7 – Conjunto diferencial.	27
Figura 8 – <i>Oldsmobile Curved Dash</i> , o veículo de duas marchas produzido em massa em 1904.	28
Figura 9 – O complexo sistema de acionamentos do Mercedes-Simplex de 35 cv.	29
Figura 10 – A transmissão automática da GM: Hydra-Matic.	30
Figura 11 – EAO-6106, transmissão automatizada da Eaton utilizada em veículos leves.	31
Figura 12 – Estrutura genérica de mapa de calibração	32
Figura 13 – Indicação das faixas de operação do motor no conta-giros do veículo.	33
Figura 14 – Curva de torque e potência em função da velocidade do motor.	33
Figura 15 – Curvas de torque para diferentes porcentagens de pedal.	34
Figura 16 – Diagrama de forças resistivas agindo no veículo	38
Figura 17 – Exemplo de área frontal de caminhão.	44
Figura 18 – Dados de entrada do sistema compilados em Excel.	45
Figura 19 – Conjunto de informações que variam nos mapas de calibração compilados em Excel.	46
Figura 20 – Equacionamento da Dinâmica Veicular em Excel.	47
Figura 21 – Indicação da faixa verde nas curvas de torque e potência do motor utilizado para testes na ferramenta em Excel.	48
Figura 22 – Testes de pontos de troca de marcha com auxílio da ferramenta no Excel.	49
Figura 23 – Pontos da curva de torque para testes em Excel.	51
Figura 24 – Células para interpolação dos pontos da curva de torque.	52
Figura 25 – Diferentes técnicas de interpolação aplicadas à curva de torque.	53
Figura 26 – Curva de torque interpolada e com valores arredondados.	54
Figura 27 – Fluxograma da lógica para determinação de subidas de marcha para uma condição de pedal e calibração voltada para economia.	55

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados para exemplificar caso de gear hunting	35
Tabela 2 – Custo computacional do algoritmo	57
Tabela 3 – Mapas de Plano e Aclive 1 para carga nominal	58
Tabela 4 – Mapas de Aclive 2 e Aclive 3 para carga nominal	58
Tabela 5 – Mapas de Plano e Aclive 1 para meia carga	59
Tabela 6 – Mapas de Aclive 2 e Aclive 3 para meia carga	59
Tabela 7 – Mapas de Plano e Aclive 1 para carga máxima	59
Tabela 8 – Mapas de Aclive 2 e Aclive 3 para carga máxima	59

Lista de Siglas e Abreviaturas

AMT	<i>Transmissão Manual Automatizada</i>
CVT	<i>Transmissão Continuamente Variável</i>
GM	<i>General Motors</i>
TCU	<i>Unidade de Controle da Transmissão</i>
VW	<i>Volkswagen</i>
VWCO	<i>Volkswagen Caminhões e Ônibus</i>
<i>atan</i>	<i>arco tangente</i>
<i>cv</i>	<i>cavalo-vapor</i>
<i>cos</i>	<i>cosseno</i>
<i>m</i>	<i>metro</i>
<i>m²</i>	<i>metro quadrado</i>
<i>m/s</i>	<i>metros por segundo</i>
<i>m/s²</i>	<i>metros por segundo ao quadrado</i>
<i>N</i>	<i>Newton</i>
<i>Nm</i>	<i>Newton-metro</i>
<i>kg</i>	<i>quilograma</i>
<i>kg/m³</i>	<i>quilogramas por metro cúbico</i>
<i>km/h</i>	<i>quilômetros por hora</i>
<i>kW</i>	<i>quilowatt</i>
<i>rad</i>	<i>radiano</i>
<i>rpm</i>	<i>rotações por minuto</i>
<i>sen</i>	<i>seno</i>
<i>W</i>	<i>watt</i>

Lista de Símbolos

i	<i>relação de transmissão;</i>
n_{mot}	<i>número de dentes da engrenagem motora;</i>
n_{mov}	<i>número de dentes da engrenagem movida;</i>
W	<i>força peso;</i>
m	<i>massa;</i>
g	<i>aceleração da gravidade;</i>
F_p	<i>força de resistência ao aclave;</i>
α	<i>inclinação da pista;</i>
F_a	<i>força de resistência de inércia translacional;</i>
a	<i>aceleração do veículo;</i>
F_r	<i>força de resistência ao rolamento;</i>
c	<i>coeficiente de resistência ao rolamento;</i>
p	<i>pressão do pneu;</i>
v	<i>velocidade do veículo;</i>
F_d	<i>força de resistência aerodinâmica;</i>
v_f	<i>velocidade do fluido;</i>
A	<i>área frontal do veículo;</i>
c_d	<i>coeficiente de arrasto;</i>
ρ	<i>densidade do fluido;</i>
F_t	<i>total de forças resistivas;</i>
T_v	<i>demanda de torque na roda;</i>
r_d	<i>raio dinâmico de roda;</i>
T_e	<i>demanda de torque no motor;</i>
g_r	<i>relação de transmissão da marcha engatada;</i>
d_{if}	<i>relação de transmissão do diferencial;</i>
P_m	<i>perdas mecânicas;</i>
n_m	<i>eficiência da transmissão;</i>
P_e	<i>potência efetiva do motor;</i>
T_d	<i>demanda efetiva de torque no motor;</i>
n_{rpm}	<i>velocidade do motor;</i>
v_{rpm}	<i>velocidade do veículo em [rpm];</i>
v_{kmh}	<i>velocidade do veículo em [km/h];</i>
v_1	<i>velocidade (genérica) em [km/h];</i>
v_2	<i>velocidade (genérica) em [m/s];</i>
v_f	<i>velocidade após a troca de marcha;</i>

v_i	<i>velocidade antes da troca de marcha;</i>
Δt	<i>tempo de troca de marcha;</i>
s	<i>inclinação de rampa;</i>
h	<i>altura da rampa;</i>
N	<i>força normal;</i>
d	<i>distância da seção no plano horizontal.</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	Estrutura do documento	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Definição e Tipos de Transmissões	18
2.1.1	Vantagens e Desvantagens	20
2.2	Conceitos Importantes	21
2.2.1	Engrenagens e Relações de Marcha	21
2.2.2	Caixa de Transmissão	23
2.2.3	Embreagem	25
2.2.4	Diferencial	26
2.3	A Evolução das Transmissões na Busca por Conforto, Eficiência e Desempenho	27
2.4	Calibração de AMTs	31
2.5	Dinâmica Veicular	35
3	METODOLOGIA	42
3.1	Definições sobre o formato da ferramenta a ser desenvolvida	43
3.2	Seleção de variáveis e implementação em Excel	43
3.3	Algoritmo para cálculo automático dos pontos de troca e implementação em Matlab [®]	52
4	RESULTADOS	57
5	CONCLUSÕES	60
5.1	Trabalhos Futuros	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 Introdução

Steve Jobs, empresário e fundador da Apple, disse “Você não pode impor a produtividade, você deve fornecer as ferramentas para permitir que as pessoas se transformem no seu melhor.”. O século XX foi marcado por inúmeras propostas de modelos produtivos, no contexto da viabilização da produção em larga escala devido às inovações da Segunda Revolução Industrial. Cada modelo tinha suas peculiaridades e estratégias próprias.

O Taylorismo procurou reduzir desperdício de tempo através da cronometragem rígida das etapas de produção. Já o Fordismo propôs a linha de montagem e a simplificação das atividades, de modo que cada operário pudesse focar em uma pequena etapa do processo produtivo. O Toyotismo, por outro lado, prezava pela qualificação flexível do funcionário e adequação da produção às demandas do mercado, evitando desperdício de recursos com seu sistema *just-in-time*. Já o Volvismo caracterizou-se pelo alto grau de informatização e automação. Apesar das significativas diferenças entre os modelos, cada um à sua maneira buscava um objetivo comum a todos: o aumento da produtividade.

Conforme [1], “A produtividade é a capacidade de realizar o máximo de trabalho possível com o mínimo de recursos necessários.”. Dessa forma, empresas que desejam evitar desperdício do potencial de seus recursos visam ao aumento da produtividade. Para isso, é necessário entender como criar condições para que cada tipo de recurso tenha o desempenho máximo. Quando trata-se de máquinas, a qualidade e potência estão diretamente ligadas aos resultados que podem ser atingidos. No caso de recursos humanos, a produtividade está altamente relacionada à satisfação pessoal, a qual, por sua vez, é afetada pelo ambiente e condições de trabalho [2].

As inovações no contexto industrial continuaram trazendo transformações na forma de as pessoas trabalharem e se conectarem ao mundo. A Terceira Revolução Industrial viabilizou a programação de máquinas e a automação no processo produtivo devido aos avanços na eletrônica e na informática. Já no início do século XXI, a Quarta Revolução Industrial trouxe inteligência aos sistemas e a interconexão de bilhões de dispositivos, integrando cada vez mais o mundo físico e o digital.

Essas, e tantas outras ferramentas tecnológicas, podem ser utilizadas para gerar aumento na produtividade tanto humana quanto das máquinas, e se beneficiar ainda mais do trabalho em conjunto de ambas as forças produtivas. Tal tendência vem dando origem ao conceito de Indústria 5.0, ou Quinta Revolução Industrial, que tem como principal característica alinhar a tecnologia robótica à inteligência humana [3].

O engenheiro de Controle e Automação tem um papel fundamental nessas transformações. Deve identificar oportunidades de uso das novas tecnologias sem esquecer da importância dos recursos humanos. A automação de processos é uma ótima forma de

contribuir para o aumento da produtividade e otimização do uso dos recursos. Ao transferir para máquinas e programas a execução de tarefas repetitivas ou que podem ser padronizadas, libera o tempo e a criatividade dos recursos humanos para focar em outras atividades.

A busca por inteligência na automação permite que máquinas e humanos unam esforços para otimizar a análise de dados, por exemplo. As máquinas trazem o benefício do processamento mais veloz de grandes volumes de dados, que, quando analisados e interpretados, podem se transformar em informações bastante relevantes. Sozinhos, os humanos levariam talvez anos para processar o que as máquinas são capazes de avaliar em questão de horas. Por outro lado, a participação humana é fundamental para definir quais dados devem ser analisados, qual ferramenta automática utilizar - ou mesmo desenvolver - e depois dar o direcionamento correto às informações geradas e entender as exceções e situações que não podem ser traduzidas para linhas de código de programação.

O presente trabalho nasceu a partir dessa visão de utilizar automação de processos para aumentar a produtividade e otimizar a utilização de recursos, de modo que a automação sirva de ferramenta para auxiliar as atividades humanas e reduzir o tempo de execução. O contexto onde identificou-se a oportunidade de melhoria foi durante o estágio curricular obrigatório realizado pela discente, em uma empresa que trabalha com transmissões manuais automatizadas (AMTs).

AMTs são uma variação de transmissões manuais, em que não há pedal de embreagem - esta é controlada pela Unidade de Controle da Transmissão (TCU), que comanda os atuadores e permite a troca de marcha sem intervenção do motorista. As trocas ocorrem quando o veículo atinge velocidades específicas sob condições pré-estabelecidas, configurando os pontos de troca de marcha.

Os pontos de troca precisam ser calibrados no veículo e tal atividade é desempenhada por um engenheiro de calibração. Uma metodologia existente é a utilização de mapas de calibração, em que são definidos os pontos de troca para algumas condições de massa, avaliando-se diferentes inclinações de pista e porcentagens de pedal. Após o preenchimento dos mapas para as condições pré-estabelecidas, estes servem de input para o software de calibração, que irá comandar as trocas no veículo. Para condições de massa e inclinação da pista diferentes daquelas dos mapas, utiliza-se interpolação dos valores mais próximos para os quais foram definidos os pontos de troca.

O processo de calibração costuma ser lento, pois há muitos pontos de troca a serem determinados e testados em condições diversas. O tempo dispendido varia de acordo com a experiência do calibrador. Porém pode chegar a cerca de mil horas ao longo de todo o desenvolvimento de um novo produto.

Diante desse cenário, levanta-se o seguinte questionamento: Como fazer uso de automação de processos para auxiliar o engenheiro nas atividades de calibração de pontos de troca de marcha e reduzir o tempo dispendido?

Com o intuito de propor uma resposta à pergunta supracitada, este trabalho traz uma proposta de acelerar o processo de calibração a partir da pré-determinação automática dos pontos de troca, gerados por um algoritmo baseado em variáveis da dinâmica veicular. O escopo se restringe à calibração de AMTs via mapas de pontos de troca e visa a fornecer um ponto de partida para a atividade de calibração, para que depois haja um ajuste fino realizado junto ao engenheiro de calibração.

Não faz parte do escopo deste trabalho determinar os valores finais da calibração, já que estes variam de acordo com as funcionalidades adicionais que podem ser incluídas na calibração de acordo com a decisão do cliente.

1.1 Objetivos

Nesta sessão são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional que auxilie na calibração dos pontos de troca de marcha em transmissões manuais automatizadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Modelar matematicamente os aspectos da dinâmica veicular mais relevante ao processo de calibração de pontos de troca de marcha;
- Desenvolver a lógica para determinação de pontos de troca de marcha a partir da modelagem da dinâmica veicular;
- Implementar o algoritmo para cálculo automático dos pontos de troca de marcha;
- Proporcionar uma ferramenta que auxilie na redução do número de horas gastas para realizar a calibração dos pontos de troca de marcha em AMTs;

1.2 Estrutura do documento

O presente documento foi dividido em cinco capítulos a fim de apresentar a base teórica, os materiais e métodos utilizados e os resultados obtidos.

No Capítulo 1, uma breve introdução e caracterização do problema é apresentada, neste capítulo também são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho.

No Capítulo 2 são apresentadas as principais ferramentas conceituais e de análise que servirão como base para o entendimento dos capítulos subsequentes.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia proposta para realizar o cálculo automático dos pontos de troca de marcha em transmissões manuais automatizadas baseado em modelagem simplificada da dinâmica veicular e que foi implementada na ferramenta computacional desenvolvida.

No Capítulo 4 são apresentados os principais resultados obtidos, descrevendo o caso de estudo contemplado no desenvolvimento do trabalho. Também é apresentada uma breve análise do custo computacional da ferramenta desenvolvida.

Finalmente, o Capítulo 5 encerra o estudo apresentando as principais conclusões do trabalho e introduz as perspectivas de trabalhos futuros.

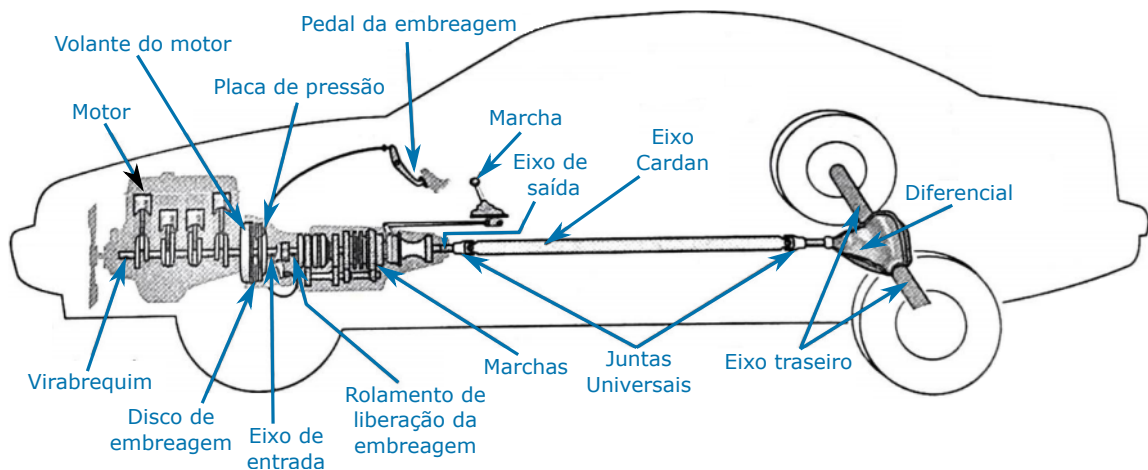
2 Fundamentação Teórica

2.1 Definição e Tipos de Transmissões

Um sistema de transmissão é um conjunto de componentes interligados entre si, capazes de modificar o torque e a rotação do motor, permitindo assim a movimentação do veículo. Tem como objetivo transmitir para as rodas motrizes a modificação do torque e da rotação gerada pelo motor em virtude do deslocamento do veículo, inverter o sentido da rotação e possibilitar o ponto neutro. [4]

Um sistema de transmissão manual, conforme ilustrado na Figura 1, é composto da seguinte maneira: a árvore de manivelas, ou virabrequim, possui várias seções defasadas que se conectam aos pistões do motor através de bielas. O volante do motor faz a conexão com o disco de embreagem e, na sequência, há a placa de pressão, que pode ser acionada através do pedal de embreagem (no caso de transmissões com câmbio manual) ou através de atuadores (em transmissões mecânicas automatizadas). O eixo de entrada conecta o conjunto da embreagem às diferentes marchas da transmissão, que podem ser selecionadas manualmente pelo motorista através da alavanca de câmbio, ou automaticamente, no caso de transmissões automatizadas. O eixo de saída se conecta ao eixo cardan que, através do diferencial, transmite torque e rotação às rodas. [5]

Figura 1 – Sistema de Transmissão Manual.



Fonte: Adaptada de [5].

As transmissões automatizadas, ou Transmissões Manuais Automatizadas (na sigla em inglês, AMT), também chamadas de Transmissões Mecânicas Automatizadas, são, como o próprio nome indica, uma variação das transmissões mecânicas. A principal diferença está na ausência de um pedal de acionamento da embreagem, a qual tem sua abertura

e fechamento controlados pela Unidade de Controle da Transmissão (na sigla em inglês, TCU). Apesar de realizar as trocas de marcha automaticamente, as AMTs apresentam também a opção de troca manual de marchas. No modelo de alavanca de câmbio automático apresentado na Figura 2, o símbolos de + e - indicam onde o motorista deve posicionar a alavanca para subir ou descer uma marcha manualmente. Outras configurações trazem essa opção através de botões, que podem estar posicionados na própria alavanca ou até mesmo no volante do veículo.

Figura 2 – Alavanca de câmbio automatizado com opção de troca de marcha manual.



Fonte: Adaptado de [6].

Além dos sistemas de transmissão mecânica com câmbio manual e automatizado, existem dois tipos principais de transmissões automáticas: hidráulica e transmissões continuamente variáveis (na sigla em inglês, CVT). No caso das transmissões automáticas hidráulicas, não existe embreagem e a caixa de mudanças funciona de forma automática, com base na velocidade do veículo e na rotação do motor. A caixa de mudanças é comandada por um fluxo hidráulico, que transmite a rotação ao diferencial. No lugar da embreagem, essa transmissão conta com um conversor de torque. Quanto maior a porcentagem do acelerador que está sendo pisada, mais fluido é enviado ao conversor de torque, que, por sua vez, transmite mais torque às rodas [7].

Já as CVTs funcionam com base no princípio de duplas polias de raios variáveis e uma correia de transmissão especial de aço ou corrente. A variação da relação de transmissão pode ser feita também através de dois pares de rolamentos, o que é o caso em CVTs com sistema toroidal. Os rolamentos conectam o eixo de entrada ao de saída e a variação

de relação é obtida pelo ângulo de trabalho formado pelo rolamento. O sistema toroidal traz a vantagem de trabalhar com torque mais elevado do que no caso das polias de raios variáveis. Os CVTs tipo toroidal têm como principal vantagem a possibilidade de trabalhar com torque elevado, o que não ocorre com CVTs de polia de diâmetro variável. [8]

2.1.1 Vantagens e Desvantagens

Uma breve análise das vantagens e desvantagens de cada um dos principais tipos de transmissão permite avaliar o que o usuário deve levar em conta ao decidir que sistema de transmissão irá utilizar.

No caso das transmissões manuais, as principais vantagens são o menor custo, a manutenção mais barata, a possibilidade de o motorista ter maior controle sobre o veículo e ainda a um melhor aproveitamento do torque - se o sistema for utilizado corretamente. Em contrapartida, as desvantagens desse tipo de câmbio são a necessidade de maior habilidade do motorista para realizar as trocas de marchas corretamente, menor conforto e cansaço físico - especialmente em trânsito lento -, maior desgaste dos componentes quando a utilização não é realizada de maneira ótima, reduzindo o tempo de vida do sistema, e consumo de combustível mais elevado quando as trocas de marchas não são realizadas adequadamente.

Em sistemas automatizados, as vantagens são o maior conforto em relação a sistemas manuais; custo e manutenção mais acessíveis, se comparado aos sistemas automáticos; sistema de autoproteção do motor, da transmissão e da embreagem contra mau uso do motorista; avisos no painel em caso de falhas no sistema; avisos sonoros para alertar o motorista sobre mau uso; e melhor aproveitamento do consumo de combustível. Algumas das desvantagens são a ocorrência de trancos quando o veículo não é operado corretamente; podem ocorrer atrasos na mudança de marcha, dependendo de como foi realizada a calibração da transmissão; e comportamentos estranhos do veículo devido a falhas de software.

No caso de sistemas automáticos, as principais vantagens são o maior conforto ao dirigir, a facilidade na operação e as trocas de marcha quase imperceptíveis. Já as desvantagens estão no custo elevado, no maior consumo de combustível e na dificuldade de encontrar oficinas aptas a realizar manutenção em veículos com esse tipo de sistema.

Comparando-se as três opções apresentadas, avalia-se que usuários que busquem maior conforto e praticidade, sem se importar com custos mais elevados, têm as transmissões automáticas como melhor opção. Já quem prefere economizar e tem bom domínio do sistema de trocas de marcha, pode optar pelo sistema manual. O sistema automatizado é uma opção intermediária, conciliando maior praticidade com custos relativamente acessíveis.

No cenário brasileiro, percebe-se uma tendência à substituição dos veículos com câmbio

manual por aqueles com câmbios automatizados ou automáticos. Em 2015, a proporção de carros e comerciais leves que contavam com transmissão manual era de 67% contra 33% de caixas automatizadas ou automáticas. Já em 2017, a utilização de veículos manuais caiu para 56,8% e a cada ano que passa a porcentagem de veículos automáticos e automatizados aumenta. [9]

2.2 Conceitos Importantes

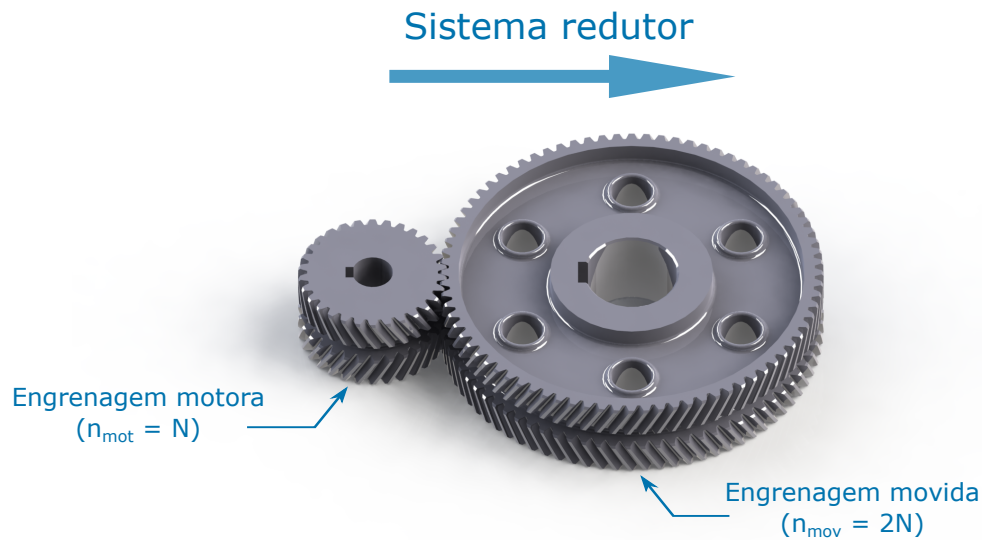
O escopo prático deste trabalho utiliza como referência transmissões do tipo AMT. Por isso, nas seções seguintes, quando houver menção a transmissões, considera-se a estrutura de transmissões mecânicas com câmbio manual ou automatizado, e desconsideram-se as variações para sistemas automáticos - a não ser que explicitamente mencionado. A seguir, são apresentados alguns conceitos fundamentais para a compreensão do funcionamento de transmissões, bem como o papel desempenhado pelos principais componentes desse sistema.

2.2.1 Engrenagens e Relações de Marcha

Engrenagens possuem a função de transmissão de potência, o que é feito através da transferência de torque e velocidade no atrito dos seus dentes com os de outra engrenagem e, por isso, elas operam em pares [10]. Um par de engrenagens é composto por uma engrenagem motora - onde ocorre a entrada de torque e velocidade - e outra movida - que recebe torque e velocidade através do contato com os dentes da motora. Quando as duas engrenagens possuem o mesmo número de dentes, trata-se de uma relação 1:1, e tanto a velocidade como o torque de entrada são os mesmos na saída. Alterando-se a relação entre o número de dentes do par de engrenagens, é possível reduzir ou multiplicar torque ou velocidade, os quais são inversamente proporcionais.

Quando deseja-se aumentar o torque fornecido, o sistema utilizado é chamado de redutor, onde o número de dentes da engrenagem motora é menor do que o da engrenagem movida. Na Figura 3, um exemplo mostra o cálculo da relação de transmissão em um sistema redutor. Considerando-se que a engrenagem motora possui N dentes e a movida possui $2N$, a Equação (2.1) mostra que a relação de transmissão é igual a 2:1. Ou seja, a velocidade de saída será a metade da de entrada, ao passo que o torque de saída será o dobro do de entrada.

Figura 3 – Par de engrenagens em sistema redutor.



Fonte: A autora.

$$i = \frac{n_{mov}}{n_{mot}} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1),

- i = relação de transmissão;
- n_{mot} = número de dentes da engrenagem motora;
- n_{mov} = número de dentes da engrenagem movida;

De modo análogo, no sistema multiplicador o número de dentes da engrenagem motora é menor do que o da movida e ocorre redução de torque e aumento de velocidade. Assim, considerando-se o exemplo da Figura 4 , composto por uma engrenagem motora com $2N$ dentes e uma engrenagem movida com N dentes, obtém-se uma relação de transmissão igual a 1:2 ou 0,5. Ou seja, o torque é reduzido pela metade, e a velocidade é dobrada.

Figura 4 – Par de engrenagens em sistema multiplicador.



Fonte: A autora.

2.2.2 Caixa de Transmissão

A caixa de transmissão, ou caixa de câmbio, é composta por um conjunto de pares de engrenagens. Cada par corresponde a uma marcha, sendo que os sistemas mais populares costumam ter até 6 marchas (também chamadas de velocidades), mais a ré. Porém esse número pode ser maior, como é o caso em transmissões com 10 marchas, presentes, por exemplo, no Ford Mustang, Chevrolet Camaro e Honda Accord [11], ou também em transmissões de 12 marchas em veículos semi-pesados e pesados, como no VW Constellation [12].

A função da caixa de transmissão é receber a rotação e torque do motor e permitir as multiplicações ou reduções necessárias de acordo com as condições em que o veículo se encontra. Cada marcha permite ao veículo a necessária força ou torque motriz para vencer a resistência ao seu movimento e atingir determinada velocidade [4]. As marchas mais baixas fornecem maior torque e são utilizadas para arrancar, manobras em baixa velocidade ou em subidas íngremes, quando a demanda de torque é maior. Já as marchas mais altas fornecem menos torque e deixam o veículo mais leve, permitindo atingir velocidades maiores, e costumam ser mais utilizadas em vias de trânsito rápido.

A caixa conta com um eixo piloto, o qual transfere ao contra-eixo o torque e a rotação vindos do motor através de uma engrenagem motora. O contra-eixo possui uma série de engrenagens ao longo da sua extensão, as quais estão diretamente conectadas a ele. Elas fazem contato com as engrenagens do eixo principal, fazendo-as girar sobre rolamentos. [13]

Dessa forma, quando a transmissão está em ponto morto, ou seja, nenhuma marcha está engatada, as engrenagens do eixo principal giram livremente, sem transmitir potên-

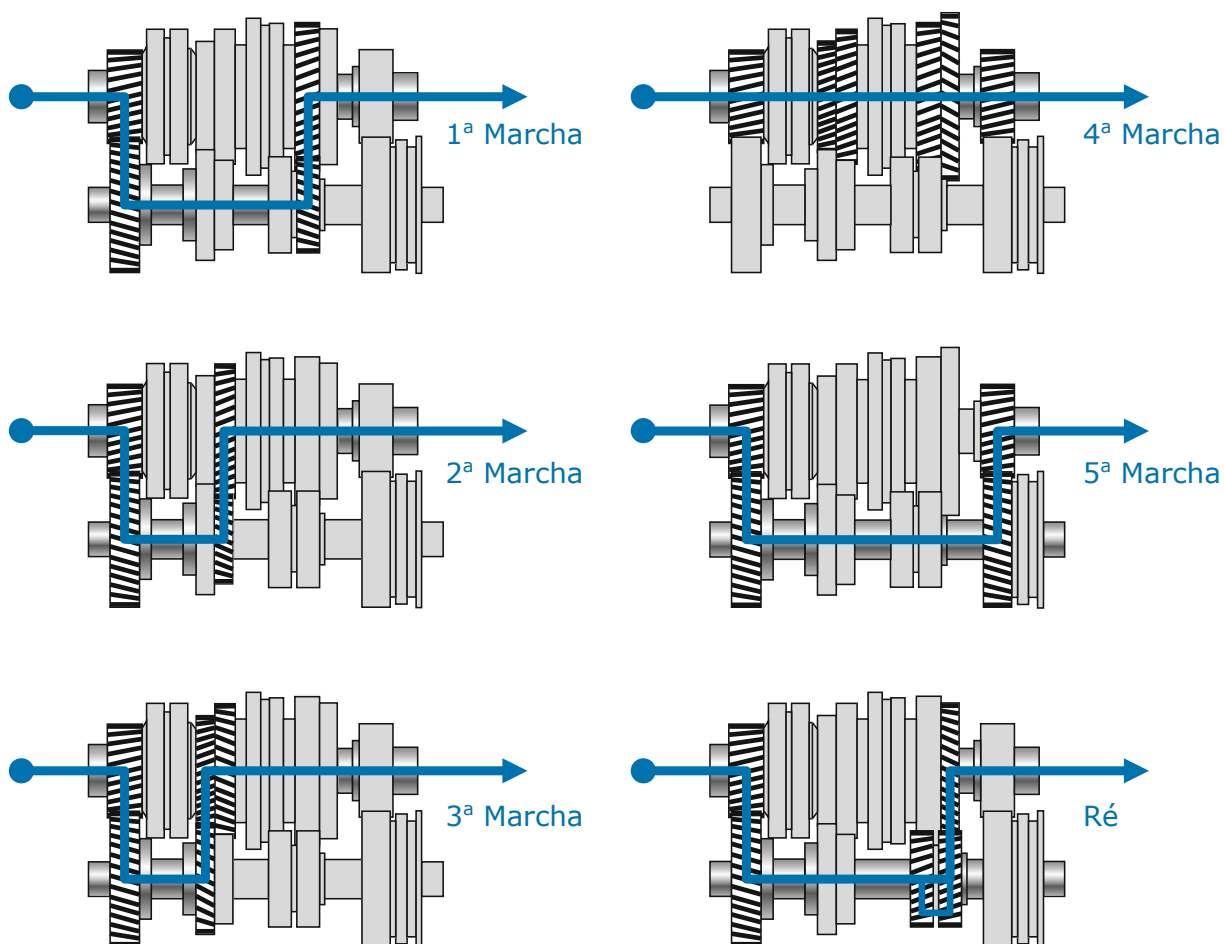
cia, e o eixo principal permanece parado. No caso de transmissões manuais, é através da alavanca de câmbio que o motorista pode selecionar a marcha desejada. Nas automatizadas, o acionamento é feito através de um atuador, controlado pela TCU. A alavanca aciona o varão de engate, o garfo e o conjunto sincronizador correspondente à marcha em questão.

O garfo movimenta a luva (ou capa) sincronizadora em direção ao cubo sincronizador, o qual é solidário ao eixo principal. Entre a luva e o cubo, há o anel sincronizador, responsável por tornar o engrenamento mais suave, igualando o movimento da luva ao da engrenagem. Assim, a marcha engatada se torna solidária ao eixo principal, que passa a rotacionar e transmitir torque ao cardan, na proporção determinada pela relação de transmissão do conjunto de engrenagens [4].

No caso da marcha ré, existe uma engrenagem intermediária, entre a do contra-eixo e a do eixo principal. Essa engrenagem intermediária é também conhecida como “louca da ré” e tem como função inverter o sentido da rotação, permitindo que o veículo se desloque para trás.

A Figura 5 apresenta uma transmissão de 5 velocidades e mostra o fluxo de potência quando cada uma das marchas está engatada.

Figura 5 – Fluxo de potência na transmissão com marchas engatadas.

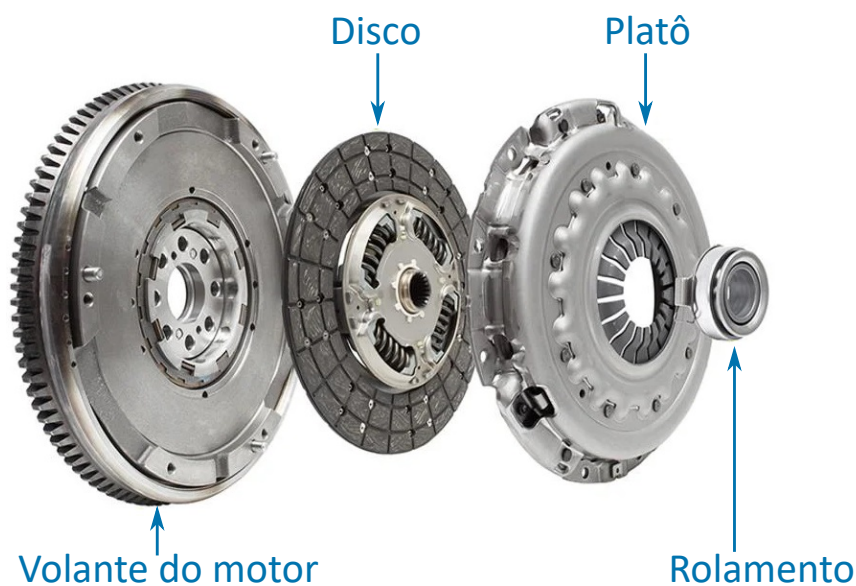


Fonte: Adaptado de [14].

2.2.3 Embreagem

A embreagem é responsável por conectar e desconectar o motor do resto do sistema de transmissão, de maneira suave e progressiva. Seus principais componentes, apresentados na Figura 6, são: platô, disco de embreagem e rolamento de encosto. Na posição de repouso, a embreagem encontra-se fechada, ou seja, o platô está comprimindo o disco de embreagem contra o volante do motor. Através deste contato, o torque e a rotação do motor são transferidos ao disco, que se conecta ao cubo de embreagem, ligado às estrias do eixo piloto, que é a entrada da caixa de transmissão.

Figura 6 – Conjunto de embreagem e volante do motor.



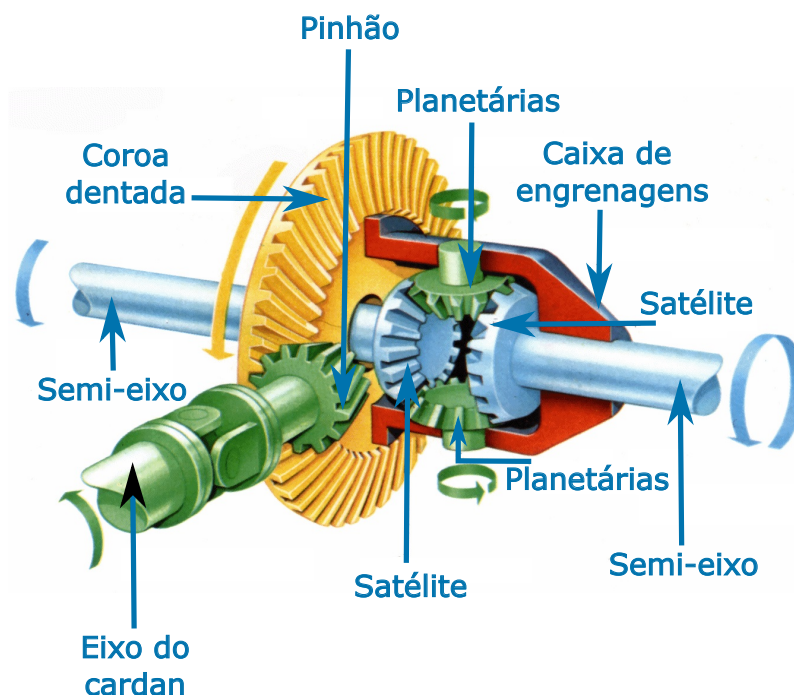
Fonte: adaptado de [15].

Quando a embreagem é atuada - através do pedal de embreagem ou do atuador controlado pela TCU -, um conjunto de elementos mecânicos se move e libera o disco do volante [4]. Enquanto a embreagem está aberta, torque e rotação não são transmitidos à caixa de transmissão. Assim, quanto maior o tempo que dura o processo de abertura e fechamento da embreagem, mais tempo a transmissão fica sem receber torque e rotação. Por isso o tempo de troca de marcha afeta significativamente a qualidade da transmissão [16].

2.2.4 Diferencial

O diferencial é o componente que, através do eixo cardan, recebe torque e rotação da caixa de transmissão, e os repassa às rodas com uma conversão de 90° na direção de rotação. Para fazer essa conversão, o diferencial conta com um conjunto de engrenagens planetárias, pinhão, coroa e semieixos, conforme ilustrado na Figura 7. Além da conversão na direção, o diferencial divide o fluxo de potência para cada um dos semieixos que se conectam às rodas motrizes, de modo que elas possam girar com velocidades independentes uma da outra. Isso é necessário quando o veículo realiza uma curva e o trecho percorrido pela roda interna é menor do que aquele percorrido pela roda externa. Para compensar essa diferença, a roda externa precisa girar mais rapidamente do que a interna. Outra funcionalidade do diferencial é a redução proporcionada pela relação de transição entre as engrenagens do conjunto.

Figura 7 – Conjunto diferencial.



Fonte: Adaptado de [17].

2.3 A Evolução das Transmissões na Busca por Conforto, Eficiência e Desempenho

A popularização do automóvel ocorreu no final do século XIX, período de revoluções, descobertas e inovações no cenário mundial. Em 1894, Louis-Rene Panhard e Emile Levassor desenvolveram a primeira transmissão manual moderna e consolidaram aspectos que servem como base de projeto de transmissões até hoje. Em 1898, Louis Renault acrescentou o diferencial ao modelo, melhorando a performance do sistema.[18]

O *Oldsmobile Curved Dash*, apresentado na Figura 8, foi o primeiro carro produzido em massa, e, apesar de limitado a 32km/h, já contava com um sistema de transmissão e duas marchas [9]. O desejo por expandir os limites e aprimorar o desempenho dos veículos serviu de motivação para experimentação em termos de modelos e configurações de veículos, o que marcou o século XX. Na época, eram os veículos a vapor que dominavam as estradas, seguidos pelos elétricos, enquanto os movidos a gasolina ainda não eram tão populares. A criatividade - e a disponibilidade de recursos - era o limite, já que regulamentações e especificações de segurança eram escassas. Fatores como autonomia, desempenho e conforto pesavam na decisão do usuário ao optar por uma configuração ou outra.

Figura 8 – *Oldsmobile Curved Dash*, o veículo de duas marchas produzido em massa em 1904.



Fonte: Adaptado de [19].

Enquanto os avanços nas tecnologias ainda tinham um longo caminho a percorrer, o interesse em automóveis e carros de corrida ficava mais restrito aos entusiastas. Por outro lado, veículos para transporte e entrega de mercadorias despertaram o interesse de empresas, bem como caminhões e tratores militares chamaram a atenção do exército austríaco, fomentando o desenvolvimento de inovações na área [9].

Dirigir um veículo no início do século XX estava longe de ser uma tarefa simples. O Mercedes-Simplex (Figura 9) de 35 cv é um exemplo da complexidade e criatividade empregados na construção dos veículos. Ele contava com cinco pedais, dois deles de freios (nas rodas dianteiras e na transmissão), e um terceiro para abrir o cano de escape. Com uma caixa de transmissão sem sincronização, o acionamento do pedal de embreagem não podia ser feito ao mesmo tempo em que se pisava no acelerador. [9] Já o Ford Modelo T, de 1908, contava com três marchas em uma caixa de câmbio planetária, três pedais e duas alavancas. A possibilidade de ocorrer um “coice” ao dar a partida era um ponto que afetava negativamente o conforto do usuário. [20]

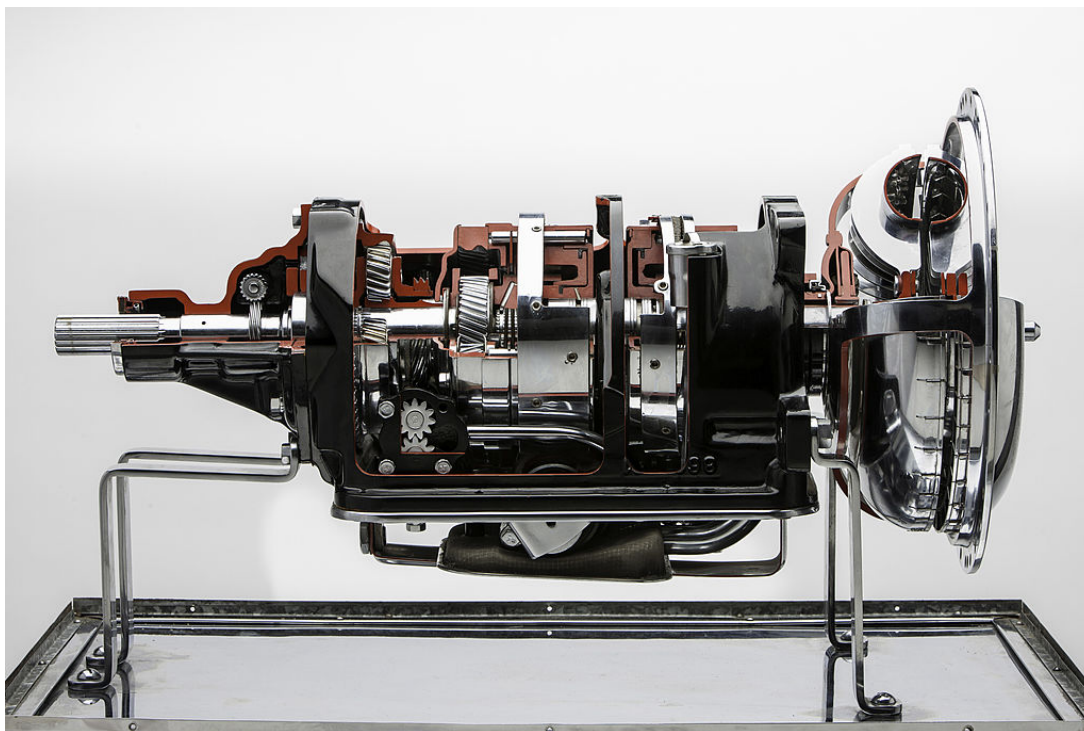
Figura 9 – O complexo sistema de acionamentos do Mercedes-Simplex de 35 cv.



Fonte: Adaptado de [21].

Na busca por maior conforto e simplicidade para operar um veículo, o conceito de transmissão automática despertou interesse por retirar do motorista a responsabilidade de realizar as trocas de marchas. A automatic safety transmission, de 1937, é um exemplo de caixa semiautomática, a qual determinava automaticamente a marcha a ser utilizada com base nas informações provenientes de sensores de posição de pedal. Para acionar a embreagem, fazia uso de pressão hidráulica [22]. Nos anos 40, A General Motors (GM) introduziu a transmissão automática Hydra-Matic (Figura 10) , utilizada inicialmente no modelo Oldsmobile, inspirando Ford e Chrysler a desenvolverem suas próprias transmissões automáticas [23].

Figura 10 – A transmissão automática da GM: Hydra-Matic.



Fonte: Adaptado de [24].

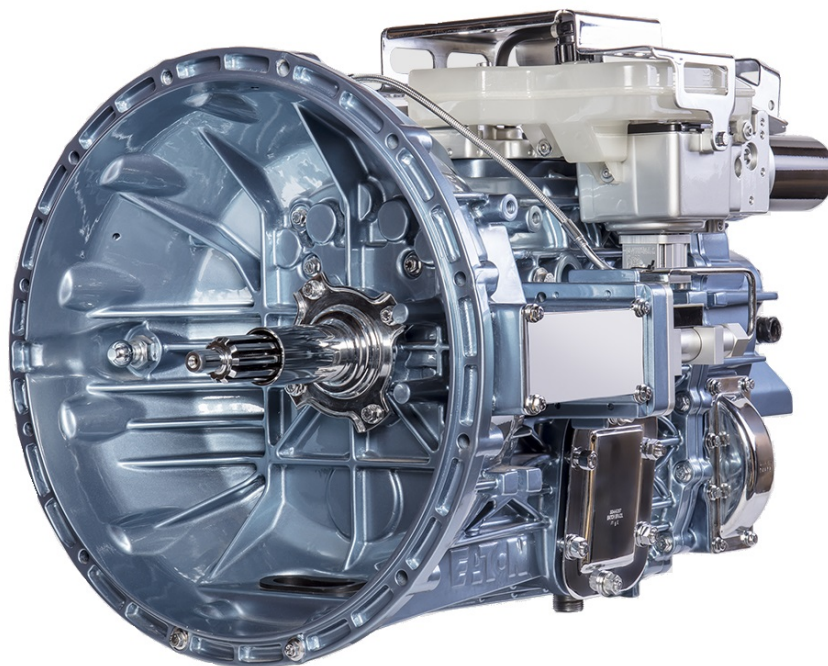
As transmissões mecânicas automatizadas também se mostraram como uma boa alternativa para quem buscava maior conforto na direção, com a vantagem adicional de terem custo mais baixo em relação às automáticas. Sua configuração base é igual a de uma transmissão manual, porém um atuador comandado pela TCU realiza a abertura e fechamento da embreagem. As trocas de marcha ocorrem automaticamente quando o veículo atinge uma velocidade pré-definida para cada subida ou descida de marcha, sem necessidade de interação do motorista.

As primeiras AMTs eram consideradas semiautomáticas, pois apenas a atuação da embreagem era automática, sendo necessário realizar o comando de troca de marcha manualmente. É o caso, por exemplo, da Drive-Master, introduzida no automóvel Hudson Commodore, em 1942. Versões mais modernas, como Selespeed (1993) e Easytronic (2004) já são capazes de controlar as trocas e a embreagem automaticamente, através de comandos da TCU. Ao atingir as velocidades pré-definidas para cada subida ou descida de marcha, as trocas ocorrem automaticamente, sem necessidade de interação do motorista.

No Brasil, tendo em vista oportunidades de aumento da eficiência, sobretudo no consumo de combustível, AMTs foram introduzidas especialmente em veículos comerciais. A porta de entrada foram os veículos pesados, e, já nos anos 70, Scania e Mercedes-Benz começaram a trabalhar com opções semiautomatizadas. A Eaton-Fuller foi uma das primeiras caixas com tecnologia semiautomatizada e a Volvo Trucks desenvolveu o primeiro câmbio totalmente automatizado.[25] A popularidade das AMTs foi se expandindo tam-

bém para veículos semipesados e leves e hoje, por exemplo, a família de caminhões leves Accelo da Mercedes-Benz e Delivery da VWCO conta com transmissões automatizadas Eaton EAO-6106 (Figura 11) e EAO-6206, com seis velocidades [26].

Figura 11 – EAO-6106, transmissão automatizada da Eaton utilizada em veículos leves.



Fonte: Adaptado de [27].

2.4 Calibração de AMTs

As AMTs realizam as trocas de marcha automaticamente. Isso só é possível graças ao software que determina os pontos de troca. Para o correto funcionamento do software, cabe ao engenheiro de calibração a tarefa de definir cada um dos pontos de troca. No escopo deste trabalho, será considerada a estratégia de calibração via mapas de pontos de troca, em que um conjunto de mapas serve de entrada ao software de calibração e os demais casos resultam da interpolação dos mapas.

A Figura 12 ilustra uma estrutura genérica de mapa de calibração a ser preenchido com valores de rotação de roda do veículo, em rotações por minuto [rpm]. No exemplo, observam-se as informações “Plano”, ou seja, a inclinação da pista em torno de 0%, 12 posições de pedal - de 0% a 100% -, e 10 trocas de marcha - sendo 5 subidas e 5 descidas, para uma transmissão com 6 marchas. Estas informações podem ser adaptadas de acordo com a transmissão que se deseja calibrar.

Figura 12 – Estrutura genérica de mapa de calibração

Mapa #1 - Plano (velocidade de roda [rpm])		Posição de Pedal [%]											
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%
Troca de marcha	1-2												
	2-3												
	3-4												
	4-5												
	5-6												
	2-1												
	3-2												
	4-3												
	5-4												
	6-5												

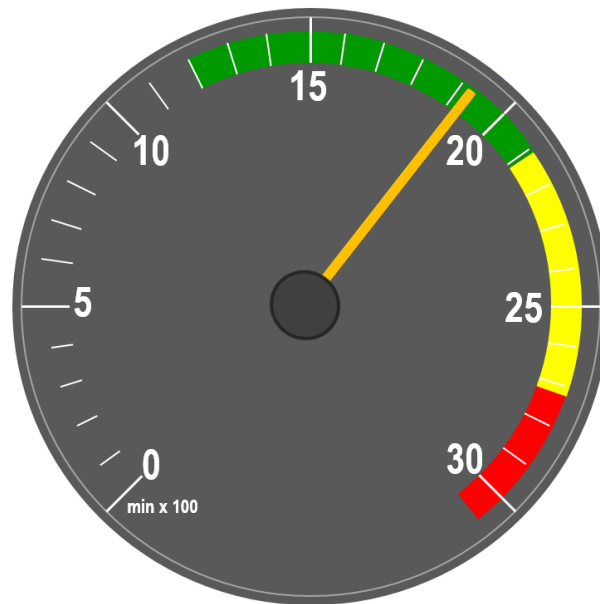
Fonte: A autora.

No software de calibração, podem ser considerados diversos mapas, com inclinações de pista distintas. Quanto mais condições forem mapeadas, mais precisa será a interpolação. Todo esse conjunto de mapas deve ser calibrado para diferentes condições de massa, sendo comum considerar-se o veículo vazio (apenas massa nominal), veículo à meia carga, e veículo com carga máxima. Também no que diz respeito à massa do veículo, em condições intermediárias, o software realiza interpolação dos mapas calibrados.

Considerando-se 3 condições de massa, 6 inclinações de pista, 12 porcentagens de pedal e 10 trocas de marcha, um engenheiro precisaria calibrar 2160 pontos de troca. Cada um desses pontos precisa ser escolhido, testado e validado, de modo que as trocas sejam suficientemente suaves, atendam à demanda de torque do veículo e não ultrapassem a rotação limite do motor.

Para obter o melhor desempenho do veículo, é importante fazer o aproveitamento do torque do motor da melhor maneira possível. As faixas de operação do motor, normalmente indicadas pelo fabricante no conta-giros, podem servir de referência para o motorista. A faixa verde corresponde às rotações onde o torque é mais alto, e, portanto, é a faixa mais econômica. Por sua vez, a faixa amarela fornece mais potência, porém o consumo de combustível é mais alto. Já a faixa vermelha indica rotações muito altas, que podem colocar em risco o motor. As faixas de operação do motor podem ser observadas de maneira genérica na Figura 13.

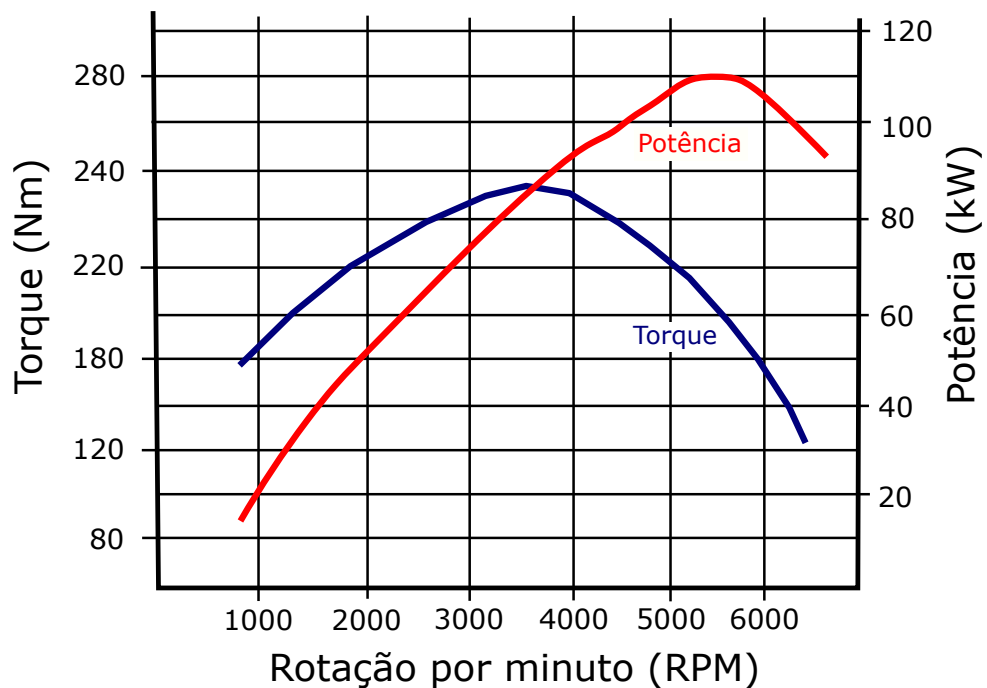
Figura 13 – Indicação das faixas de operação do motor no conta-giros do veículo.



Fonte: Adaptado de [28].

A curva de torque traz informações mais detalhadas sobre o torque disponível em função da velocidade, conforme ilustrado pela linha azul na Figura 14. A mesma figura indica a curva de potência, em vermelho.

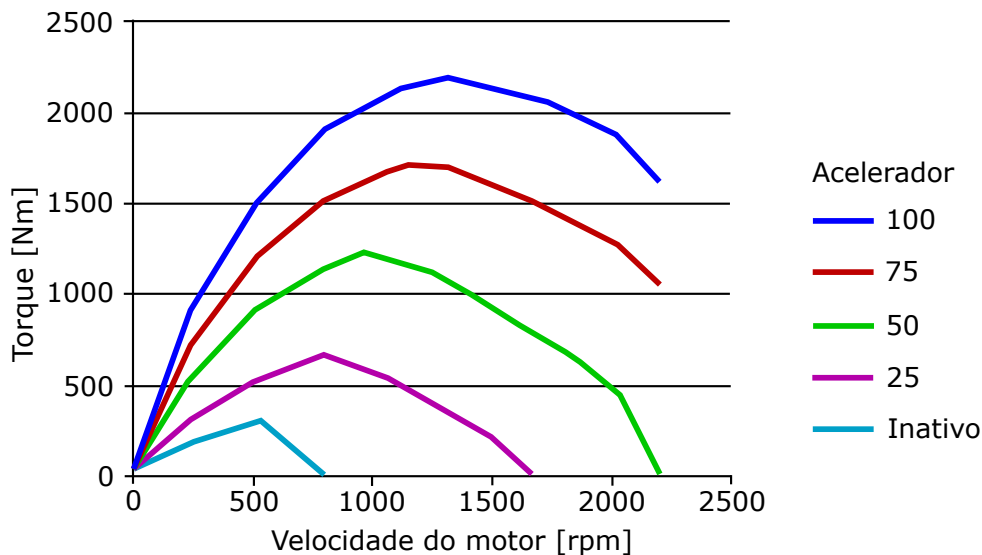
Figura 14 – Curva de torque e potência em função da velocidade do motor.



Fonte: Adaptado de [29].

É importante salientar que a forma da curva de torque é diferente para cada motor e também varia para diferentes porcentagens de pedais, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Curvas de torque para diferentes porcentagens de pedal.



Fonte: Adaptado de [29].

Na calibração, é necessário levar em conta se deseja-se que ela seja voltada para economia ou performance. No caso de economia, procura-se manter a rotação do motor nos pontos em que o torque seja mais alto. No caso de performance, normalmente as trocas de marcha ocorrem em velocidades mais altas, para aproveitar melhor a potência do motor. Ainda assim, procura-se evitar a faixa amarela, pois o consumo aumenta significativamente.

Outro ponto importante na calibração é evitar o que se chama de "*gear hunting*", termo em inglês que se traduz literalmente como "caça de marcha". Trata-se de uma condição em que ocorre uma subida de marcha seguida por uma descida de marcha (ou vice-versa) e isso se repete inúmeras vezes. Isso pode ocorrer, por exemplo, devido à proximidade entre os pontos de subida e descida de marcha. Também podem causar esse problema, condições da pista que o software não consiga prever - como uma inversão brusca de descida para subida na pista - e que coloquem o veículo em uma marcha onde o torque não é suficiente.

Na tabela 1, são apresentados Valores arbitrários para exemplificar um cenário de *gear hunting* envolvendo a subida de marcha 2-3 e a descida de marcha 3-2.

		Velocidade [rpm] marcha de origem	Velocidade [rpm] marcha de destino
Troca de marcha	2-3	2500	1250
	3-2	1200	2400

Tabela 1 – Dados para exemplificar caso de gear hunting

Nesse cenário, quando o motor atingir a rotação de 1200rpm em terceira marcha, ocorrerá a redução para segunda marcha, com rotação equivalente a 2400rpm. Ao aumentar um pouco a velocidade e atingir 2500rpm, ocorrerá a troca 2-3, levando à velocidade de 1250rpm em terceira marcha. Caso o veículo perca um pouco de velocidade durante a troca de marcha, precisará fazer novamente uma descida de marcha e assim podem ocorrer sucessivas subidas e descidas de marchas, gerando desconforto e desgaste excessivo da embreagem.

Ao realizar a calibração de pontos de troca de marcha, é preciso ter em mente que uma mesma porcentagem de pedal pode corresponder a diferentes intenções do motorista, sendo este um item muito relativo para traduzir para linguagem matemática. A experiência do engenheiro auxilia-o na tarefa de decidir como executar a calibração nesses casos mais complexos.

2.5 Dinâmica Veicular

Apesar de alguns pontos de trocas de marcha se enquadrarem em casos complexos, que vão além da dinâmica veicular básica correspondente ao instante em que o veículo se encontra, parte deles pode ser avaliada a partir da demanda de torque e velocidade do motor.

Esta subseção apresenta conceitos da dinâmica veicular relevantes ao processo de calibração. A principal referência bibliográfica usada para os equacionamentos foi [30].

Para determinar a demanda total de torque, é preciso considerar a eficiência de transmissão e cada uma das forças resistivas que agem sobre o veículo. São elas:

- Resistência ao aclave;
- Resistência de inércia;
- Resistência ao rolamento;
- Resistência aerodinâmica.

A resistência ao aclave é proporcional à inclinação da pista em que o veículo se encontra. Quando o veículo encontra-se no plano, a força peso é absorvida pelo solo na forma de

força normal e a resistência ao aclone é nula. Quando há inclinação, a componente da força peso paralela ao solo puxa o veículo para baixo, na direção da rampa.

A força peso é expressa na Equação 2.2 e a resistência ao aclone é apresentada na Equação 2.3.

$$W = m \cdot g \quad (2.2)$$

onde:

- W = força peso [N];
- m = massa [kg];
- g = aceleração da gravidade [m/s^2].

$$F_p = W \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (2.3)$$

onde:

- F_p = força de resistência ao aclone [N];
- α = inclinação da pista [rad].

A resistência à inércia pode ser dividida em translacional e rotacional. Para fins deste trabalho, será considerada apenas a inércia translacional. Esta representa o esforço que o veículo tem que fazer para ganhar velocidade. Pode ser expressa pela segunda lei de Newton, que relaciona massa e aceleração, conforme expresso na Equação 2.4. Num caso ideal de velocidade constante, essa força é nula.

$$F_a = m \cdot a \quad (2.4)$$

onde:

- F_a = força de resistência de inércia translacional [N];
- a = aceleração do veículo [m/s^2];

A resistência ao rolamento é causada pelo atrito do pneu em relação ao solo. Corresponde ao esforço para manter o movimento da roda e é proporcional à carga normal que age sobre ela, conforme expresso na Equação 2.5.

$$F_r = c \cdot W \cdot \text{cos}(\alpha) \quad (2.5)$$

onde:

- F_r = força de resistência ao rolamento [N];
- c = coeficiente de resistência ao rolamento.

O coeficiente de resistência ao rolamento é adimensional e depende da velocidade do veículo, pressão do pneu, carga radial e tipo do piso, temperatura e outras variáveis de menor importância. Considerando-se pneus enchidos com ar, rodando sobre pistas secas, pode-se utilizar a Equação 2.6 para estimar o valor do coeficiente.

$$c = 0,005 + \frac{1}{p} \cdot \left(0,01 + 0,0095 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \right) \quad (2.6)$$

onde:

- p = pressão do pneu [bar];
- v = velocidade do veículo [km/h].

A resistência aerodinâmica ocorre quando um corpo move-se em um fluido, no caso o ar. Assim, a geometria do veículo é uma das fontes de perda, de modo que quanto maior a área transversal em contato com o fluido, maior a resistência aerodinâmica. Há também perdas por atrito viscoso, devido à interação do ar com a superfície do corpo, porém no caso de veículos comerciais e de passeio a influência é relativamente baixa. E, por fim, há as perdas por correntes de ar, devido ao ar que penetra no veículo para refrigeração do motor e ventilação. Tais perdas costumam ser bastante significativas, chegando a até 10% das perdas totais, dependendo da velocidade do veículo.

Somando-se essas três fontes de perda, tem-se a resistência aerodinâmica total, conforme descrito na Equação 2.7.

$$F_d = c_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^2 \cdot A \quad (2.7)$$

onde:

- F_d = força de resistência aerodinâmica [N];
- v_f = velocidade do fluido [m/s];
- A = área frontal do veículo [m^2];
- c_d = coeficiente de arrasto [kg/m^3];
- ρ = densidade do fluido [kg/m^3].

O total de forças resistivas é expresso pela Equação 2.8.

$$F_t = F_r + F_p + F_a + F_d \quad (2.8)$$

onde:

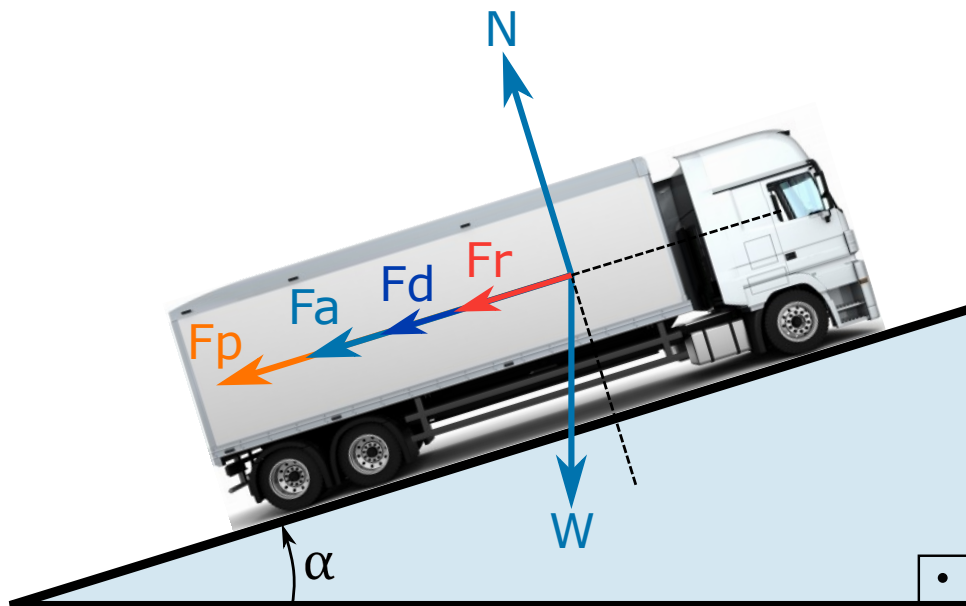
- F_t = total de forças resistivas [N];

A força fornecida pelo motor (que pode ser calculada a partir do torque do motor) deve ser igual ao total de forças resistivas para que o veículo acelere à taxa de aceleração desejada, “ a ”. Se a força não for suficiente, a aceleração será menor, podendo inclusive ser negativa.

No caso ideal de velocidade constante, a aceleração é nula, e F_t deve se igualar às demais forças resistivas. Ou seja, a força de aceleração do veículo - positiva ou negativa - corresponde à diferença entre a força de entrada e as demais forças resistivas.

Cada uma das forças resistivas pode ser observada na Figura 16, onde observam-se também a força normal (N) e a força peso (W).

Figura 16 – Diagrama de forças resistivas agindo no veículo



Fonte: A autora.

Multiplicando-se F_t pelo raio dinâmico da roda, obtém-se a demanda de torque na roda do veículo, conforme expresso na Equação 2.9.

$$T_v = F_r \cdot r_d \quad (2.9)$$

onde:

- T_v = demanda de torque na roda [$N \cdot m$];
- r_d = raio dinâmico de roda [m].

Entre a roda e o motor, há o diferencial e as marchas, cujas engrenagens afetam a relação de transmissão e, conseqüentemente, a demanda de torque no motor. Tal relação é expressa na Equação 2.10

$$T_e = \frac{T_v}{g_r \cdot d_{if}} \quad (2.10)$$

onde:

- T_e = demanda de torque no motor [$N \cdot m$];
- g_r = relação de transmissão da marcha engatada;
- d_{if} = relação de transmissão do diferencial.

A eficiência de transmissão é afetada pelas perdas mecânicas. Tais perdas ocorrem ao longo do fluxo de potência, ou seja, desde o motor até alcançar efetivamente as rodas. O cálculo das perdas mecânicas pode ser resumido através do fator de eficiência da transmissão, conforme descrito na Equação 2.11.

$$P_m = (1 - n_m) \cdot P_e \quad (2.11)$$

onde:

- P_m = Perdas mecânicas [W];
- n_m = eficiência da transmissão;
- P_e = potência efetiva do motor [W].

Esse mesmo fator de eficiência da transmissão deve ser considerado no cálculo da demanda efetiva de torque no motor, conforme expresso na Equação 2.12.

$$T_d = \frac{T_e}{n_m} \quad (2.12)$$

onde:

- T_d = demanda efetiva de torque no motor [$N \cdot m$];

É essa demanda efetiva de torque no motor que deve ser considerada na determinação dos pontos de troca de marcha. Para evitar que o motor fique sem torque, é importante garantir que o torque disponível nas condições em que o veículo se encontra seja maior do que a demanda de torque. Isso precisa continuar sendo verdade mesmo após a troca de marcha, em que a relação de transmissão é diferente daquela na marcha de origem.

Também é importante avaliar a velocidade do motor em cada marcha, evitando que o número de rotações seja alto demais, para não causar danos aos componentes mecânicos.

A velocidade que serve de entrada para os mapas de calibração é a de roda e deve estar em $[rpm]$. Porém é importante entender as conversões para velocidade de roda em $[km/h]$ e velocidade de motor em $[rpm]$, que aparecem em outras equações.

A relação entre velocidade de motor e de veículo (ou roda), ambas em $[rpm]$, é dada pela Equação 2.13.

$$n_{rpm} = v_{rpm} \cdot g_r \cdot d_{if} \quad (2.13)$$

onde:

- n_{rpm} = velocidade do motor $[rpm]$;
- v_{rpm} = velocidade do veículo $[rpm]$.

A conversão da velocidade de veículo em $[km/h]$ para $[rpm]$ é dada pela Equação 2.14.

$$v_{rpm} = \frac{v_{kmh}}{2 \cdot r_d \cdot 0,1885} \quad (2.14)$$

onde:

- v_{kmh} = velocidade do veículo $[km/h]$.
- v_{rpm} = velocidade do veículo $[rpm]$.

A conversão de velocidade de $[km/h]$ para $[m/s]$ é dada pela Equação 2.15.

$$v_1 = \frac{v_2}{3,6} \quad (2.15)$$

onde:

- v_1 = velocidade (genérica) $[km/h]$;
- v_2 = velocidade (genérica) $[m/s]$.

Por fim, para calcular a velocidade final após uma troca de marcha, ou seja, a velocidade na marcha de destino, parte-se da Equação 2.8. Durante a troca de marcha não há fornecimento de torque do motor, então pode-se considerar que a entrada é nula e somente as forças resistivas atuam sobre o corpo. Reescrevendo F_a como apresentado na Equação 2.4 e isolando-se a aceleração, obtém-se a Equação 2.16

$$a = -\frac{F_r + F_p + F_d}{m} \quad (2.16)$$

Manipulando-se algebricamente a Equação 2.16 e isolando-se a velocidade final, obtém-se a Equação 2.17.

$$v_f = -\frac{F_r + F_p + F_d}{m} \cdot \Delta t + v_i \quad (2.17)$$

onde:

- v_f = velocidade após a troca de marcha [m/s];
- v_i = velocidade antes da troca de marcha [m/s];
- Δt = tempo de troca de marcha [m/s].

Outro conceito importante para o estudo da dinâmica veicular é o de inclinação de rampa em porcentagem. Ele é determinado a partir da altura e distância horizontal que formam a rampa [31], conforme expresso na Equação 2.18.

$$s = \frac{h}{d} \cdot 100 \quad (2.18)$$

onde:

- s = inclinação de rampa [%];
- h = altura da rampa [m];
- d = distância da seção no plano horizontal [m].

O uso de % é uma forma comum de se referir ao quão inclinada é uma rampa. Para converter esse valor para radianos, pode se utilizar a Equação 2.19.

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{s}{100} \right) \quad (2.19)$$

As equações e conceitos de dinâmica veicular apresentados nesta subseção servem de base para compreender como determinar a velocidade adequada para cada ponto de troca, sob condições específicas de massa, rampa e porcentagem de pedal.

3 Metodologia

A metodologia adotada para desenvolver este trabalho foi do tipo exploratória. Segundo Oliveira [32], essa metodologia é voltada para estudos que buscam descobrir ou desenvolver ideias, aumentar o conhecimento sobre fatos e solucionar problemas específicos ou bem definidos. Caracteriza-se por um processo de pesquisa flexível, a fim de adaptar-se às descobertas realizadas durante o processo de pesquisa.

A abordagem utilizada neste trabalho foi qualitativa, em que, segundo Triviños [33], as condições de investigação são definidas intencionalmente - e não aleatoriamente - a fim de melhor se adequarem aos objetivos específicos do projeto. Segundo Bogdan & Biklen [34], esta abordagem envolve a obtenção de dados a partir do contato direto do pesquisador com a situação estudada. Dessa forma, este trabalho traz elementos de um estudo de caso, ao fazer a aplicação de conceitos teóricos na busca de uma solução para um problema real observado, por exemplo, mas não exclusivamente, na empresa em que a discente realizou seu estágio curricular obrigatório.

Dentre as técnicas adotadas na coleta de dados para execução deste projeto, fez parte a pesquisa bibliográfica e também documental, incluindo tanto artigos científicos e demais bibliografias de livre acesso, como também documentos técnicos com os quais a discente teve contato durante seu estágio. A partir da observação e participação nas rotinas de trabalho da equipe de engenharia da empresa, a discente pôde realizar pesquisa de campo, fundamental na etapa de compreensão do problema a ser resolvido. A interação com os colegas resultou em entrevistas do tipo não estruturadas, ou seja, que não contam com um roteiro planejado. Através de conversas para esclarecimento de dúvidas ou sobre a experiência profissional na área, a discente pôde obter conhecimentos relevantes para o desenvolvimento do projeto.

Os dados coletados serviram de base para as etapas seguintes do projeto. Após a compreensão do contexto não apenas a nível teórico, mas também entendendo a realidade dos engenheiros de calibração e as demandas do mercado, a discente realizou a modelagem da dinâmica veicular. Foram definidas as variáveis consideradas fundamentais para a determinação dos pontos de troca de marcha, para então equacionar e relacionar as entradas e saídas do sistema.

Após a modelagem matemática, foram determinadas as premissas que norteiam a lógica de calibração, a fim de transcrevê-las em forma de algoritmo. Enquanto as equações servem de base para verificação de grandezas físicas, como demanda de torque em variadas condições de velocidade, massa, inclinação de rampa e posição de pedal, o algoritmo tem o papel de testar valores para uma série de condições até encontrar um ponto de troca que satisfaça as demandas estabelecidas.

Por fim, para avaliação dos resultados obtidos a partir do algoritmo, foram escolhidas condições em que fosse possível comparar os pontos de troca calculados com valores calibrados manualmente por um engenheiro da área. Analisou-se a precisão do algoritmo e quais os fatores que mais impactam a necessidade de um ajuste fino, a ser realizado pelo engenheiro de calibração a partir dos valores de referência calculados. Após identificados os benefícios trazidos pela ferramenta, em termos de otimização das atividades de calibração, foram discutidas oportunidades de melhoria e os próximos passos para aprimoramento do algoritmo.

3.1 Definições sobre o formato da ferramenta a ser desenvolvida

A oportunidade de melhoria identificada para este projeto se dá em um contexto bastante prático: o dia-a-dia de um engenheiro de calibração. A proposta é desenvolver um algoritmo que sirva de ferramenta de auxílio para a determinação dos pontos de troca em AMTs. Definir uma lógica que sustente o algoritmo requer uma compreensão clara sobre como o processo já é executado. Também é fundamental saber o que se espera dos resultados da ferramenta.

O primeiro passo para execução do projeto foi estudar o contexto em termos práticos e teóricos. O acompanhamento dos engenheiros durante o processo de calibração e a visualização do funcionamento dos softwares utilizado contribuíram para a definição da metodologia de calibração que serviria de base para o algoritmo: mapas de calibração de pontos de troca. Também serviu para a compreensão do formato em que os dados devem ser apresentados: valores de velocidade de roda em rpm para cada um dos pontos de troca dos mapas.

Avaliando a literatura disponível sobre o temática explorada, optou-se por fazer uso dos conceitos de dinâmica veicular para modelar o sistema e conseguir determinar a demanda de torque e a velocidade do motor em cada uma das condições dos mapas de calibração.

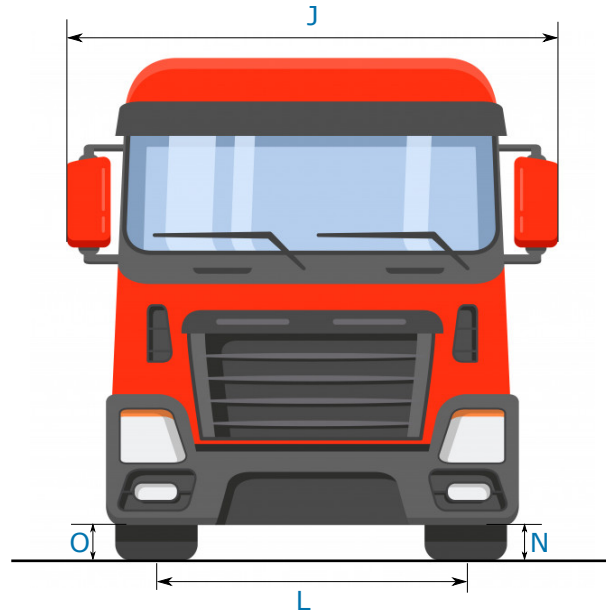
3.2 Seleção de variáveis e implementação em Excel

Foi realizado um levantamento das variáveis mais relevantes para a modelagem da dinâmica veicular no contexto de calibração de pontos de troca. Os dados de entrada foram divididos entre aqueles que se referem ao veículo e os que dizem respeito ao ambiente.

Do veículo, é necessário conhecer as relações de transmissão de cada marcha, as condições de massa do veículo para as quais se deseja realizar a calibração, a curva de torque (preferencialmente já especificada para cada porcentagem de pedal), as referências da

faixa de economia do motor e a área frontal do veículo (como exemplificado na Figura 17).

Figura 17 – Exemplo de área frontal de caminhão.



Fonte: A autora.

Também é necessário saber o raio dinâmico da roda, a pressão do pneu, a qualidade da transmissão (pode ser do sistema completo ou uma combinação da eficiência do motor e da transmissão) e o tempo necessário para realizar a troca de marchas.

Já sobre o ambiente, as seguintes variáveis servem de entrada para o sistema: aceleração da gravidade, coeficiente de fricção, coeficiente de arrasto, densidade do fluido em que o veículo se move (no caso, o ar) e o conjunto de 5 inclinações de rampa para os quais se deseja realizar a calibração.

Todas essas informações foram compiladas em Excel para realização do cálculo preliminar dos pontos de troca, antes da implementação do algoritmo para cálculo automático. A Figura 18 apresenta o conjunto de dados de entrada.

Figura 18 – Dados de entrada do sistema compilados em Excel.

Input Data									
Vehicle					Environment				
Gear Ratio (g_r)		Description	Symbol	Value	Unit	Description	Symbol	Value	Unit
1	4,8	Characteristic frontal area	A	5,410106	m ²	Gravity acceleration	g	9,81	m/s ²
2	2,52	Wheel dynamic radius (cm)	r _{cm}	35,865	cm	Friction coefficient	μ	0,9	-
3	1,47	Tire pressure	p	8,6	bar	Drag coefficient	c _d	1,2	kg/m ³
4	1	Overall efficiency in the transmission	h	0,98	-	Fluid density	ρ	1,204	kg/m ³
5	0,79	Time necessary for changing gears	Δt	1	s				
6	0,65	Engine friction torque coefficient	f _c	7	%				
Reverse	4,03								
Differential (diff)	4,56								
Pedal Curve					Slope				
Throttle Position [%]	Engine Torque 0 - 125 [%]	Engine Torque 0 - 100 [%]	Full load		11000	kg	Flat	2	% grade
0	0	0	Half load		7500	kg	Downhill 1	10	% grade
10	27	21,6	Nominal load		4000	kg	Downhill 2	20	% grade
20	51	40,8	Other		0	kg	Uphill 1	10	% grade
30	76	60,8							
40	91	72,8							
50	99	79,2							
60	106	84,8							
70	112	89,6							
80	123	98,4							
85	124	99,2							
90	125	100							
95	125	100							
97	125	100							
100	125	100							
Kickdown	125	100							
Economy Calibration			Torque Curve						
Minimum rpm	Maximum rpm	Tolerance [%]	Engine speed (rpm)		Engine torque (N.m)				
1200	2200	5	750		457				
			1000		499				
			1100		563				
			1200		635				
			1300		647				
			1400		641				
			1500		636				
			1600		632				
			1700		624				
			1800		625				
			1900		614				
			2000		616				
			2100		617				
			2200		609				
			2300		588				
			2400		561				
			2500		530				
			2600		427				
			3000		0				

Fonte: A autora.

Também foram identificados os dados que se alteram ao longo dos mapas de calibração. Indo do nível mais micro ao macro, o par de marchas correspondente a cada uma das trocas deve variar para cada uma das 5 subidas de marcha e 5 descidas de marcha, para cada uma das 12 porcentagens de pedal escolhidas; isso deve se repetir para cada uma das 6 inclinações de rampas; e, por sua vez, deve de repetir para as 3 condições de massa especificadas, totalizando 18 mapas e 2160 pontos de troca.

O conjunto de informações que varia nos mapas também foi organizado em Excel para realizar os primeiros testes da lógica da ferramenta de cálculo de pontos de troca de marcha e é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Conjunto de informações que variam nos mapas de calibração compilados em Excel.

Variable Input			
Description	Symbol	Value	Unit
Vehicle mass	m	11000	kg
Slope	$\alpha_{\%}$	10	% grade

Gear Info		
Current gear Ratio	Value	Unit
Current gear Ratio	1	4,8
Target gear Ratio	2	2,52

Fonte: A autora.

Uma vez definidos todos os dados de entrada, foi feita a modelagem das principais variáveis de dinâmica veicular agindo sobre o sistema. Consideraram-se as forças resis-tivas longitudinais, as perdas mecânicas devido à eficiência na transmissão, bem como a influência do diferencial e das marchas nos valores finais de torque e velocidade do motor. Tais informações foram organizadas em Excel de modo que, ao fornecer um valor de ve-locidade na marcha atual, todas as demais variáveis fossem calculadas, tanto na marcha de origem, como na marcha de destino.

A tabela utilizada para realizar esse cálculo é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Equacionamento da Dinâmica Veicular em Excel.

CALCULATIONS						
	Description	Symbol	Unit	Equation	Current Gear	Target Gear
Torques	Engine torque total demand	T_d	N.m	$T_d = (T_e + T_f)/h$	255,6644	486,9799
	Wheel torque demand	T_v	N.m	$T_v = F_r \cdot r_m$	5125,293	5125,293
	Engine torque demand	T_e	N.m	$T_e = T_v / (g_r \cdot \text{diff})$	234,16	446,019
	Friction torque	T_f	N.m	$T_f = T_e \cdot f_r / 100$	16,3912	31,22133
	Available engine torque	T_a	N.m	(calculated by interpolation)		
Speeds and Accelerations	Vehicle speed (km/h)	$v_{km/h}$	km/h	$v_{km/h} = v_{m/s} \cdot 3,6$	10	10
	Vehicle speed (m/s)	$v_{m/s}$ Current gear: v_i Target gear: v_t	m/s	$v_{m/s} = v_{km/h} / 3,6$ For target gear: $v_t = - (F_r + F_d + F_p) \cdot \Delta t / m + v_i$ $v_f = -d \cdot \Delta t + v_i$	2,777778	2,777778
	Vehicle speed (rpm)	v_{rpm}	rpm	$v_{rpm} = v_{km/h} / (2 \cdot r_{cm} \cdot 0,001885)$	73,95845	73,95845
	Engine speed	n_{rpm}	rpm	$n_{rpm} = v_{rpm} \cdot g_r \cdot \text{diff}$	1618,803	849,8714
	Flow speed	v_n	m/s	$v_n = v_{m/s}$	2,777778	2,777778
	Vehicle deceleration during gear shift	d	m/s ²	experimental data	0	0
	Vehicle acceleration right before gear shift	a	m/s ²	experimental data	0,26	0,26
Forces	Total forces acting on the vehicle	F_T	N	$F_T = F_r + F_p + F_d + F_a$	14290,52	14290,52
	Drag force	F_d	N	$F_d = c_d \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot v_n^2 \cdot A$	30,15633	30,15633
	Rolling resistance	F_r	N	$F_r = c \cdot W \cdot \cos \alpha_{rad}$	662,9125	662,9125
	Weight	W	N	$W = m \cdot g$	107910	107910
	Pulling force	F_p	N	$F_p = W \cdot \sin \alpha_{rad}$	10737,45	10737,45
Acceleration force	F_a	N	$F_a = m \cdot a$	2860	2860	
Unit conversion	Wheel dynamic radius (m)	r_m	m	$r_m = r_{cm} / 100$	0,35865	0,35865
	Slope (rad)	α_{rad}	rad	$\alpha_{rad} = \text{atan}(\alpha_{\%} / 100)$	0,099669	0,099669
	Rolling resistance coefficient	c	(dimensionless)	$c = 0,005 + (1/p) \cdot (0,01 + 0,0095 \cdot (v_{km/h} / 100)^2)$	0,006174	0,006174

Fonte: A autora.

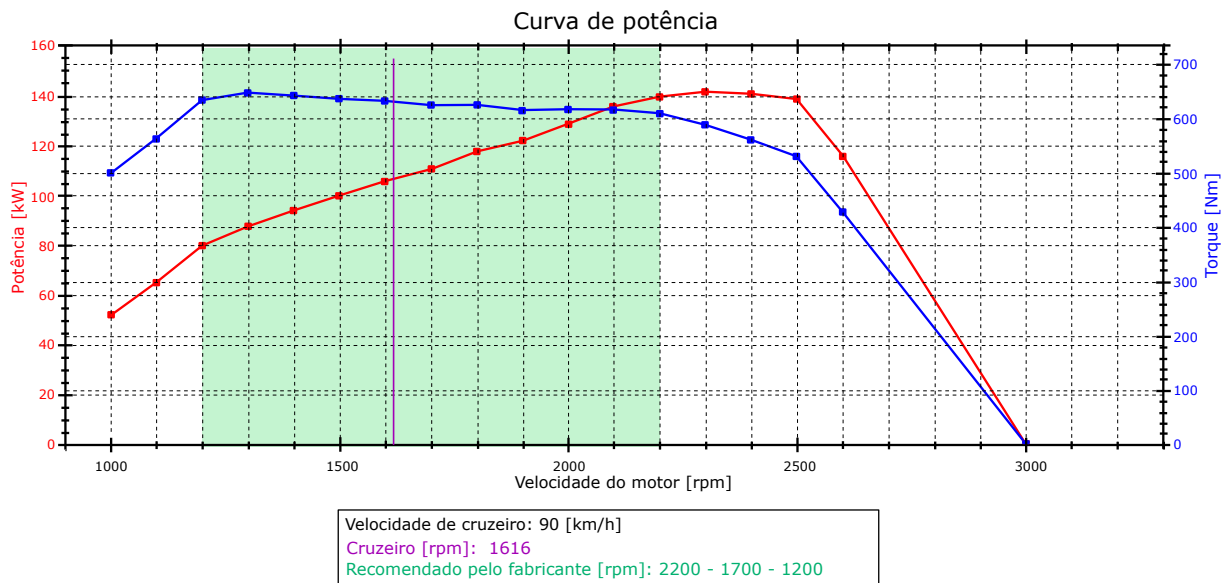
Nesta primeira etapa, o preenchimento das informações de entrada fixas, a definição das condições do mapa (massa, rampa e porcentagem de pedal) e a escolha arbitrária de um valor de velocidade de entrada na ferramenta em Excel já trazia informações relevantes, como demanda de torque, por exemplo. A simples variação do valor de velocidade de entrada já fornecia toda a análise de forças e demanda de torque para a condição desejada.

Alguns pontos especialmente relevantes para a atividade de calibração são as correspondências dos valores de velocidade. Por mais que o input do software de calibração seja a velocidade de roda em $[rpm]$, este não é um valor de fácil interpretação. É mais comum pensar na velocidade do veículo em $[km/h]$ ou na velocidade do motor em $[rpm]$. Na ferramenta conforme apresentada na Figura 18, o usuário pode fornecer um valor de velocidade do veículo em $[km/h]$. Mas o tipo de velocidade que serve de entrada pode facilmente ser alterado.

Para ter condições de teste bem definidas, optou-se por gerar pontos de troca que tenham como objetivo uma calibração econômica, caracterizada por manter-se dentro da faixa verde. Na Figura 21, observa-se que foram estabelecidos os valores de $[rpm]$ corres-

pondentes aos limites superior e inferior da faixa verde (econômica) do motor utilizado como referência. No exemplo apresentado, o limite inferior é de 1200 [rpm] e o superior é de 2200 [rpm]. As informações sobre os limites de velocidade foram obtidas a partir da curva de torque, em azul, apresentada na Figura 21. No exemplo, considerou-se uma tolerância de 5%, normalmente considerada no limite superior em casos de subida de marcha e no limite inferior para casos de descida de marcha.

Figura 21 – Indicação da faixa verde nas curvas de torque e potência do motor utilizado para testes na ferramenta em Excel.



Fonte: A autora.

Nesta etapa, os valores de velocidade ainda precisavam ser testados manualmente, inserindo-os um a um até encontrar um que atendesse às condições pré-estabelecidas. O intuito do algoritmo de cálculo automático dos pontos de troca é realizar esses testes e verificações automaticamente.

A Figura 22 traz um exemplo de como a ferramenta em Excel foi utilizada para verificação manual dos pontos de troca.

Figura 22 – Testes de pontos de troca de marcha com auxílio da ferramenta no Excel.

Wheel speed (rpm)	Engaged gear	Gear ratio	Differential	Engine speed (rpm)	Wheel speed (km/h)
77	1	6,195	4,56	2175	10
77	2	3,391	4,56	1191	10
78	1	6,195	4,56	2203	11
78	2	3,391	4,56	1206	11
127	2	3,391	4,56	1964	17
127	3	2,079	4,56	1204	17
126	2	3,391	4,56	1948	17
126	3	2,079	4,56	1195	17
197	3	2,079	4,56	1868	27
197	4	1,333	4,56	1197	27
198	3	2,079	4,56	1877	27
198	4	1,333	4,56	1204	27
263	4	1,333	4,56	1599	36
263	5	1	4,56	1199	36
264	4	1,333	4,56	1605	36
264	5	1	4,56	1204	36
0	1	6,195	4,56	0	0

Fonte: A autora.

Analisando-se as quatro primeiras linhas como exemplo, tem-se os seguintes passos:

- Testa-se a velocidade de 77 [rpm] de roda como possível ponto de troca na primeira marcha, equivalente a 2175 [rpm] de motor (ou 10 [km/h]). A velocidade está dentro da faixa verde na marcha de origem;
- Testa-se essa mesma velocidade de 77 [rpm] de roda na marcha de destino, no caso a segunda marcha, e verifica-se se a velocidade de destino também está dentro da faixa verde. O valor obtido foi de 1191 [rpm], um pouco abaixo do limite de 1200 [rpm];
- Aumenta-se, então, a velocidade de roda em 1 [rpm], ou seja, 78 [rpm]. Na marcha de origem, a velocidade de motor está um pouco acima do limite da faixa verde, com 2203 [rpm], porém está dentro da faixa de tolerância de 5%;
- Verifica-se o mesmo valor de 78 [rpm] na marcha de destino, onde a velocidade de motor será de 1206 [rpm]. Agora o ponto de troca atende ao requisito de manter a velocidade de destino dentro da faixa verde, e 78 [rpm] pode ser definido como o ponto de troca 1 – 2;
- Não há necessidade de testar valores maiores do que 78 [rpm], pois a velocidade já está no limite na marcha de origem;
- Também já se verificou que valores menores do que 78 [rpm] não atendem aos requisitos para a troca.

Observando-se as linhas 5 a 8 da Figura 22, que iniciam com um teste de ponto de troca a 127 [rpm], tem-se o seguinte passo a passo:

- Testa-se a velocidade de 127 [rpm] de roda como possível ponto de troca na segunda marcha, equivalente a 1964 [rpm] de motor. A velocidade está dentro da faixa verde na marcha de origem;
- Testa-se essa mesma velocidade de 127 [rpm] de roda na marcha de destino, no caso a terceira marcha, e verifica-se que a velocidade de destino também está dentro da faixa verde, 1204 [rpm];
- Apesar de já atender o requisito de estar dentro da faixa verde tanto na marcha de origem como na de destino, deseja-se verificar se é possível realizar a troca mais cedo, ou seja, a uma velocidade mais baixa, e continuar dentro da faixa verde na marcha de destino. Para isso, testa-se o valor logo abaixo, 126 [rpm] de roda;
- Observa-se que na marcha de destino, a terceira, a velocidade de motor é igual a 1195 [rpm] (abaixo da faixa verde). Isso significa que se deve utilizar o valor anterior, 127 [rpm], como ponto de troca 2 – 3, pois este é o valor mais baixo que garante que tanto na marcha de destino como de origem a velocidade fique dentro da faixa verde.

Testes similares são realizados para as trocas 3 – 4 e 4 – 5 nas linhas seguintes. Vale destacar que neste exemplo já se partiu de valores próximos aos do ponto de troca final. Mas, para chegar a conhecê-los, foi necessário testar diversos valores, até que as diretrizes fossem atendidas.

Em casos de subida de marcha, de modo geral, parte-se do limite superior (2200 [rpm] de motor, no exemplo) para iniciar a verificação dos pontos de subida de marcha. Se a velocidade na marcha de destino estiver dentro da faixa verde, tenta-se diminuir o ponto de troca até que atinja o limite inferior (1200 [rpm] de motor, no exemplo). Essa estratégia é adotada pois no início da faixa verde a disponibilidade de torque é maior, o que favorece a economia de combustível.

Se a troca a 2200 [rpm] de motor resultar logo de início em uma velocidade abaixo da faixa verde na marcha de destino, aumenta-se o valor do ponto de troca até o primeiro que atenda aos limites da faixa econômica.

O passo seguinte é fazer a verificação de torque. Para isso, observa-se a demanda de torque antes e depois da troca. Caso não haja torque suficiente na marcha de origem, é um indicativo de que não se deve aumentar uma marcha, e, sim, reduzir. Caso não haja torque suficiente na marcha de destino, por estar caindo em uma velocidade abaixo da faixa verde, significa que a troca precisa ser feita a uma velocidade mais alta.

Normalmente o que rege as subidas de marcha são os limites de velocidade, atentando-se à faixa verde, e o que rege as descidas de marcha é a demanda por torque.

No caso das descidas de marcha, deve-se verificar principalmente a demanda de torque. Se, nas condições estabelecidas para um mapa de troca, faltar torque a uma certa velocidade, é sinal de que a marcha deve ser reduzida.

Pode-se iniciar o teste de velocidades a partir do final da faixa verde na marcha de origem, porém deve-se garantir uma defasagem suficientemente grande em relação ao ponto de subida de marcha, a fim de evitar gear hunting. Outra possível estratégia para determinar o ponto de descida de marcha é partir do ponto de subida de marcha e considerar uma defasagem. Em ambos os casos, é fundamental fazer a comparação da demanda de torque com o torque disponível naquelas condições.

A curva de torque (22) disponibilizada na etapa de testes em Excel conta com os pontos de torque em função da velocidade apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Pontos da curva de torque para testes em Excel.

Engine speed (rpm)	Engine torque (N.m)
750	457
1000	499
1100	563
1200	635
1300	647
1400	641
1500	636
1600	632
1700	624
1800	625
1900	614
2000	616
2100	617
2200	609
2300	588
2400	561
2500	530
2600	427
3000	0

Fonte: A autora.

Para verificar pontos intermediários manualmente, e de maneira rápida, criou-se o conjunto de células apresentado na Figura 26. Ele permite inserir a velocidade que se deseja verificar no campo que corresponde ao intervalo entre dois pontos da curva e apresenta como resultado o torque equivalente.

Figura 24 – Células para interpolação dos pontos da curva de torque.

	750<x<1000	1000<x<1100	1100<x<1200	1200<x<1300	1300<x<1400	1400<x<1500	1500<x<1600	1600<x<1700	1700<x<1800	1800<x<1900	1900<x<2000
Speed (rpm)	778	1010	1100	1257	1350	1450	1550	1650	1750	1850	1950
Torque (N.m)	461,704	505,4	563	641,84	644	638,5	634	628	624,5	619,5	615
	2000<x<2100	2100<x<2200	2200<x<2300	2300<x<2400	2400<x<2500	2500<x<2600	2600<x<3000				
Speed (rpm)	2050	2118	2200	2350	2450	2550	2650				
Torque(N.m)	616,5	615,56	609	574,5	545,5	478,5	373,625				

Fonte: A autora.

Assim, o funcionamento da ferramenta em Excel se resume nos seguintes itens:

- fácil inserção das variáveis de entrada referentes ao veículo, ambiente e condições de mapeamento de pontos de troca;
- visualização instantânea da contribuição de cada uma das forças resistivas na demanda por torque, tanto na marcha de origem, como na de destino;
- visualização instantânea da equivalência entre velocidades de roda e motor, em $[rpm]$, $[km/h]$ e $[m/s]$, tanto na marcha de origem, como na de destino;
- possibilidade de testar manualmente diversos valores de velocidade até encontrar um que atenda às condições desejadas - por exemplo, verificação da faixa verde para calibração econômica;
- possibilidade de verificar a demanda de torque tanto antes como depois da troca de marcha e comparar com o torque disponível;
- versatilidade para alterar alguma das variáveis (como massa, inclinação da rampa ou marcha) e instantaneamente ver como ela afeta a dinâmica veicular.

3.3 Algoritmo para cálculo automático dos pontos de troca e implementação em Matlab[®]

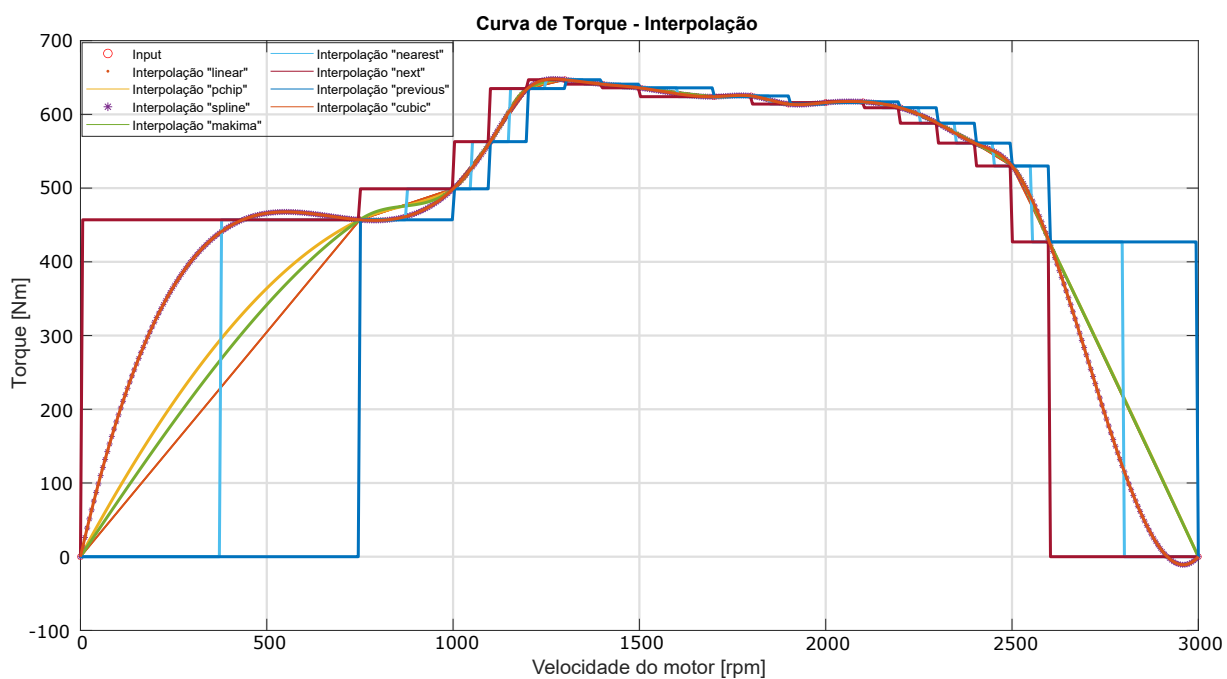
A etapa de desenvolvimento em Excel[®] permitiu a visualização das funcionalidades que o auxílio por computador pode trazer no processo de determinação de pontos de troca de marcha. O passo seguinte foi traduzir os testes manuais de velocidade para um algoritmo que permite gerar os pontos de troca automaticamente.

A ideia é que o algoritmo teste em loop os valores de velocidade, e faça os incrementos ou decrementos necessários, até satisfazer as condições pré-estabelecidas. Além disso, deve verificar a disponibilidade de torque para atender a demanda.

O algoritmo foi implementado no software Matlab[®], de modo que sirva como ferramenta de auxílio para o engenheiro de calibração gerar rapidamente valores preliminares de pontos de troca.

Para determinar os valores de torque correspondentes a qualquer valor de velocidade de motor a partir dos pontos da curva que eram conhecidos, foi feito uso de interpolação. A Figura 25 apresenta as curvas geradas pelas diferentes estratégias de interpolação disponíveis no Matlab[®]. Após avaliar o formato das curvas, optou-se pelo tipo “pchip”, o qual utiliza interpolação cúbica que preserva a forma da curva.

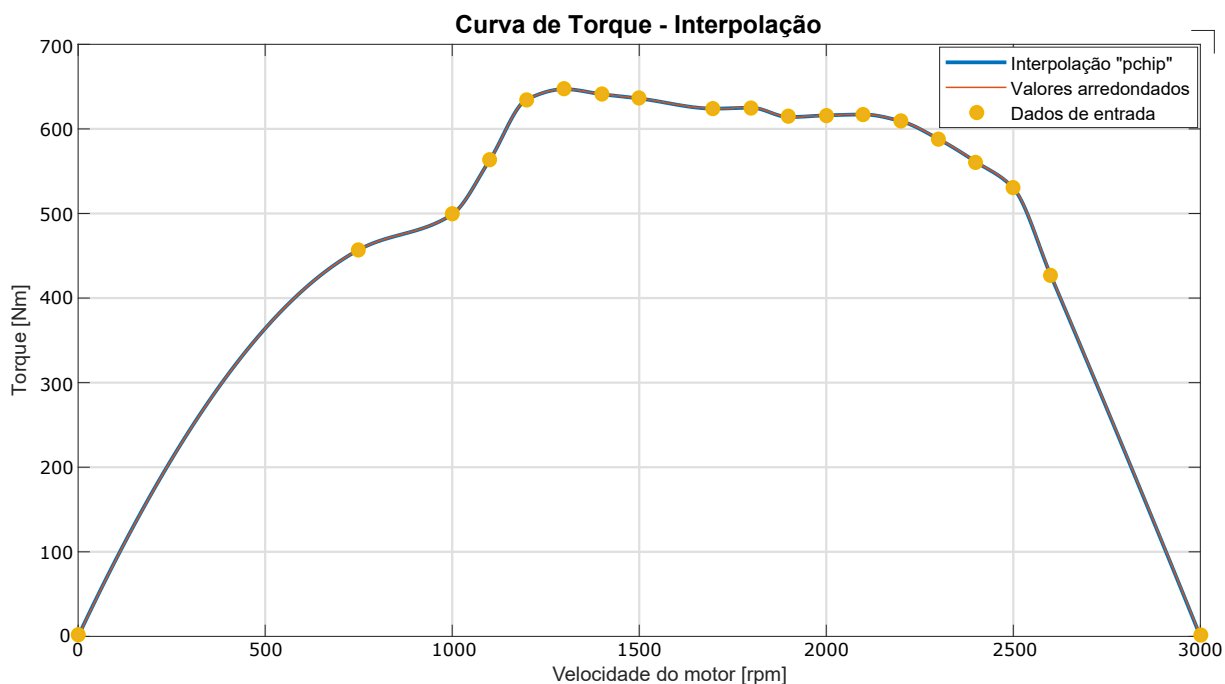
Figura 25 – Diferentes técnicas de interpolação aplicadas à curva de torque.



Fonte: A autora.

A Figura 26 mostra a curva interpolada e também a curva em que os valores foram todos arredondados para números inteiros, de modo a facilitar seu armazenamento em um vetor de tamanho pré-determinado.

Figura 26 – Curva de torque interpolada e com valores arredondados.



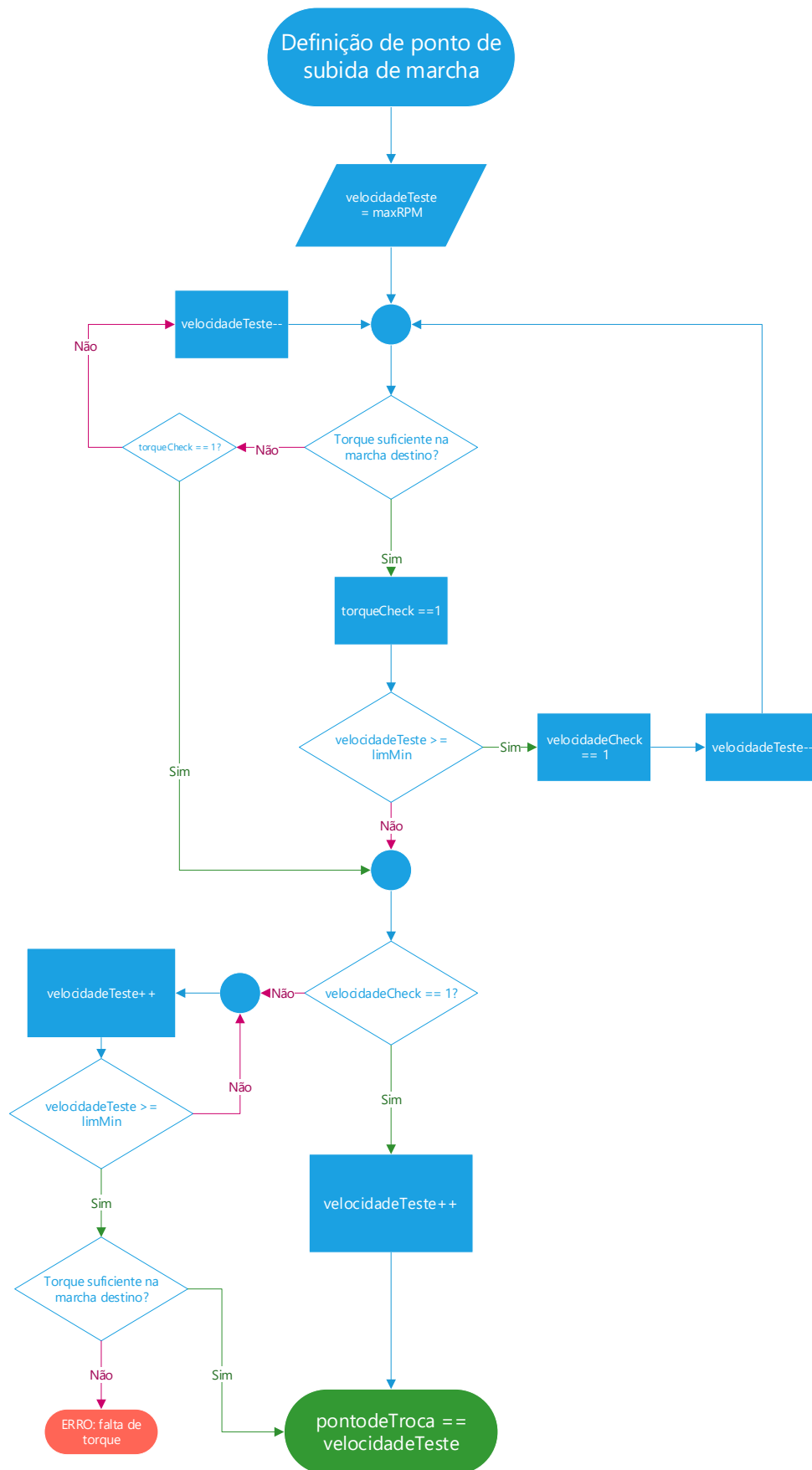
Fonte: A autora.

Foram implementadas em Matlab[®] uma série de funções que auxiliam na geração dos pontos de troca de marcha e deixam o código do algoritmo mais claro e organizado. Alguns exemplos das funções implementadas são:

- Função para cálculo das forças resistivas atuando sobre o veículo;
- Função para conversão da velocidade para todas as unidades de medida de interesse;
- Função para determinação da demanda total de torque;
- Função que realiza todos os cálculos da dinâmica veicular na marcha de origem e na de destino e retorna as principais informações para o algoritmo: velocidade de roda, rotação do motor, demanda de toque, torque disponível e uma variável de verificação que indica se a velocidade na marcha de destino está dentro da faixa verde e se há torque suficiente;
- Função para interpolação dos dados da curva de torque.

Dessa forma, o arquivo principal contempla a inserção das variáveis de entrada relevantes ao algoritmo e a execução dos loops para cada condição de massa, inclinação de rampa e troca de marcha. O fluxograma da Figura 27 apresenta a lógica por trás do algoritmo para determinação de subidas de marcha para uma condição de pedal e calibração voltada para economia.

Figura 27 – Fluxograma da lógica para determinação de subidas de marcha para uma condição de pedal e calibração voltada para economia.



Fonte: A autora.

As elaboração de um algoritmo para descidas de marcha não é contemplada no escopo deste trabalho. Uma vez implementada e validada a ferramenta computacional que auxilia na determinação dos pontos de subida de marcha, pode-se considerar expandi-la para descidas de marcha em trabalhos futuros.

Os testes da ferramenta e resultados obtidos são apresentados no capítulo seguinte.

4 Resultados

Para testar a ferramenta, foram utilizados os dados de um caminhão leve, com transmissão automatizada de seis marchas. A curva de torque utilizada é a mesma apresentada na Figura 21. O tipo de calibração escolhido foi o econômico e a faixa verde do motor é de 1200 [rpm] a 2200 [rpm]. Os dados foram gerados para três condições de massa: nominal, meia carga e carga máxima. Os valores de inclinação de rampa utilizados foram 2%, 10%, 15% e 20%, em que 2% representa um plano e os demais valores são de aclives. Não foram estudados cenários de declive, pois a determinação de qual marcha utilizar em descidas fica pouco atrelada à demanda de torque e aos limites da faixa de economia do motor.

Existe uma série de exceções e condições específicas a serem avaliadas e compreendidas a fim de tornar a ferramenta desenvolvida funcional em um contexto real. Levando-se isso em conta, optou-se por restringir o escopo do algoritmo e focar apenas nos pontos de subida de marcha.

Um dos pontos a serem avaliados é a redução no tempo gasto para calibração com a utilização da ferramenta proposta. Uma vez que o engenheiro tenha coletado todos os dados de entrada e inserido-os na ferramenta, esta leva menos de um segundo para gerar os dados de pontos de troca, para o cenário de testes aqui proposto. Executou-se o programa 5 vezes e o custo computacional médio da ferramenta foi de 0,28 segundos, conforme apresentado na Tabela 2. Ao se pensar nas quase mil horas que podem ser gastas na execução de um projeto de calibração de pontos de troca de marcha sem ter valores como ponto de partida, a ferramenta proposta se mostra como um potencial fator redutor no tempo de execução das atividades de calibração.

Observa-se que a ferramenta é de utilização fácil e rápida e evita que o engenheiro de calibração tenha que partir do zero na determinação dos pontos de troca.

Os dados gerados são apresentados nas Tabelas 3 a 8.

Na Tabela 3, observam-se os dados gerados para as os cinco pontos de subida de

# Execução	Tempo [s]
1	0.41
2	0.23
3	0.26
4	0.27
5	0.25
Média	0.28

Tabela 2 – Custo computacional do algoritmo

Carga nominal (4000kg)					
Velocidade		Mapa #1 - Plano (2%)		Mapa #2 - Aclive 1 (10%)	
		rpm roda	rpm motor	rpm roda	rpm motor
Troca de marcha (Subidas)	1-2	78	2203	78	2203
	2-3	127	1963	127	1963
	3-4	198	1877	198	1877
	4-5	264	1604	264	1604
	5-6	340	1550	340	1550

Tabela 3 – Mapas de Plano e Aclive 1 para carga nominal

Carga nominal (4000kg)					
Velocidade		Mapa #3 - Aclive 2 (15%)		Mapa #4 - Aclive 3 (20%)	
		rpm roda	rpm motor	rpm roda	rpm motor
Troca de marcha (Subidas)	1-2	78	2203	78	2203
	2-3	127	1963	127	1963
	3-4	198	1877	198	1877
	4-5	264	1604	363	2206
	5-6	484	2207	484	2207

Tabela 4 – Mapas de Aclive 2 e Aclive 3 para carga nominal

marcha em $[rpm]$ de roda e o valor de $[rpm]$ de motor equivalente. Essas são as velocidades mínimas em que as trocas podem ocorrer de modo que a velocidade na marcha de destino permaneça dentro da faixa verde do motor. A demanda de torque foi satisfeita em todos os casos e nota-se que a variação no aclive, de 2% para 10% tem pouca influência nos valores de calibração para carga nominal.

Os pontos obtidos nos mapas de Aclive 3 e 4, apresentados na Tabela 4, são bastante similares aos primeiros resultados obtidos. Porém nota-se que, no Mapa 3, o valor do ponto de troca 5 – 6, destacado em negrito, é superior ao limite de 2200 $[rpm]$. Pela forma como o algoritmo está programado, isso indica que houve insuficiência de torque e que não é recomendável o uso da 6ª marcha em rampas acentuadas, mesmo que o caminhão não esteja carregado. De modo similar, os resultados obtidos para o Mapa 4 mostram que, para uma rampa ainda mais inclinada, tanto o uso da 5ª como da 6ª marcha não é recomendado, pois não haveria torque suficiente no motor para atender a demanda do veículo.

Essa mesma restrição já ocorre em rampas de 10% quando o veículo está com meia carga, conforme mostrado na Tabela 5. As restrições se intensificam nos casos de 15% e 20% de rampa com meia carga, e, principalmente, com carga máxima. Analisando-se as Tabelas 6 e 7, verifica-se que, com carga máxima, mesmo no plano o caminhão não terá condições de utilizar a sexta marcha. No caso mais extremo, de rampa de 20%, apenas a primeira marcha fornece torque suficiente ao veículo.

Meia carga (7500 kg)					
Velocidade		Mapa #1 - Plano (2%)		Mapa #2 - Aclive 1 (10%)	
		rpm roda	rpm motor	rpm roda	rpm motor
Troca de marcha (Subidas)	1-2	78	2203	78	2203
	2-3	127	1963	127	1963
	3-4	198	1877	198	1877
	4-5	264	1604	363	2206
	5-6	340	1550	484	2207

Tabela 5 – Mapas de Plano e Aclive 1 para meia carga

Meia carga (7500 kg)					
Velocidade		Mapa #3 - Aclive 2 (15%)		Mapa #4 - Aclive 3 (20%)	
		rpm roda	rpm motor	rpm roda	rpm motor
Troca de marcha (Subidas)	1-2	78	2203	78	2203
	2-3	127	1963	144	2226
	3-4	234	2218	234	2218
	4-5	363	2206	363	2206
	5-6	484	2207	484	2207

Tabela 6 – Mapas de Aclive 2 e Aclive 3 para meia carga

Carga máxima (11000 kg)					
Velocidade		Mapa #1 - Plano (2%)		Mapa #2 - Aclive 1 (10%)	
		rpm roda	rpm motor	rpm roda	rpm motor
Troca de marcha (Subidas)	1-2	78	2203	78	2203
	2-3	127	1963	127	1963
	3-4	198	1877	234	2218
	4-5	264	1604	363	2206
	5-6	484	2207	484	2207

Tabela 7 – Mapas de Plano e Aclive 1 para carga máxima

Carga máxima (11000 kg)					
Velocidade		Mapa #3 - Aclive 2 (15%)		Mapa #4 - Aclive 3 (20%)	
		rpm roda	rpm motor	rpm roda	rpm motor
Troca de marcha (Subidas)	1-2	78	2203	78	2203
	2-3	144	2226	144	2226
	3-4	234	2218	234	2218
	4-5	363	2206	363	2206
	5-6	484	2207	484	2207

Tabela 8 – Mapas de Aclive 2 e Aclive 3 para carga máxima

5 Conclusões

A busca por aumento de produtividade é uma tendência desde os séculos passados e cresce cada vez mais com a evolução das tecnologias e os estilos de vida acelerados. A automação de processos possui grande potencial de reduzir o tempo gasto em atividades repetitivas, agilizar o processamento de dados e trabalhar em conjunto com os seres humanos para obter os melhores resultados nas atividades desempenhadas no dia a dia. A automação também pode proporcionar mais conforto e eficiência ao assumir a execução de tarefas pouco agradáveis e executá-las de maneira padronizada, buscando alto desempenho.

Transmissões Manuais Automatizadas são um exemplo revolucionário que alia conforto à economia. Com popularidade ascendente no Brasil, muitos veículos comerciais e esportivos contam hoje com AMTs. Para que essas transmissões possam realizar a troca de marchas automaticamente, existe um trabalho fundamental a ser executado por um engenheiro de calibração: a definição dos pontos de troca de marcha. Tal tarefa é, por si só, bastante dispendiosa. Os pontos de troca são muitos e cenários diversos devem ser considerados. Apesar da grande complexidade da tarefa, a qual depende, muitas vezes, da experiência do calibrador, existem etapas do processo de calibração que são repetitivas e seguem um certo padrão. Os pontos de troca escolhidos devem levar em conta a dinâmica veicular, e um estudo sobre ela pode ajudar a prever ou estimar os valores a serem calibrados.

De fato, neste trabalho foi realizada uma investigação sobre as atividades de calibração e o funcionamento de AMTs, a fim de compreender como a automação poderia auxiliar na redução do número de horas gastas com tais atividades e como tornar o trabalho do engenheiro menos desgastante. A solução proposta foi uma ferramenta computacional que auxilia na determinação dos pontos de troca, levando em conta aspectos da dinâmica veicular e as premissas definidas na estratégia de calibração.

Desenvolveu-se uma ferramenta preliminar em Excel[®], onde foi possível visualizar as variáveis e equações relevantes ao processo de calibração e realizar manualmente testes sucessivos de valores de pontos de troca, até encontrar um que atendesse às condições estabelecidas. Alguns dos principais ganhos foram a fácil visualização da conversão de velocidades de roda e motor, a previsão do comportamento dinâmico do veículo tanto na marcha de origem como na de destino, e a verificação das demanda e disponibilidade de torque.

Após identificados os benefícios trazidos pela ferramenta e pensando no potencial em termos de otimização de tarefas, transcreveu-se o que havia sido implementado em Excel para o formato de algoritmo que calcula automaticamente os pontos de troca de marcha,

testando em loop valores de velocidade, até encontrar o ideal. Devido aos múltiplos cenários e intenções por trás de cada conjunto de ponto de troca, escolheu-se um escopo bem específico para implementar o algoritmo em Matlab[®]: foram calculados pontos de subidas de marcha em quatro condições de rampa, para três condições de massa. A curva de torque utilizada não trazia os valores correspondentes à cada porcentagem de pedal e, portanto, este aspecto ficou de fora do escopo do projeto.

Os resultados obtidos através da ferramenta mostraram seu potencial de gerar dados agilmente, a partir de um conjunto de informações de entrada, podendo contribuir significativamente no dia a dia das atividades de um engenheiro de calibração. A ferramenta possui muitas oportunidades de melhoria, que serão mencionadas na seção de Trabalhos Futuros.

5.1 Trabalhos Futuros

A ferramenta computacional desenvolvida neste projeto cobriu apenas alguns casos do universo de calibração de AMTs. Estudos mais aprofundados sobre trocas de marcha em descidas, redução de marcha e comportamento da curva de torque em diferentes porcentagens de pedal são oportunidades de aprimorar o uso da ferramenta.

Além disso, a utilização da ferramenta no dia a dia por engenheiros de calibração vai permitir a verificação na prática dos ganhos avaliados neste trabalho. O teste da ferramenta seguido de feedback do usuário final é uma boa estratégia para entender ainda mais os desafios por trás das atividades de calibração.

Um possível trabalho futuro relacionado a este consiste no uso de redes neurais para a identificação de aspectos sutis da lógica utilizada pelo engenheiro de calibração e então traduzir isso para linguagem matemática.

Referências Bibliográficas

- 1 ROCKCONTENT. **Tudo sobre produtividade e como ser mais produtivo no trabalho.** In: . [s.n.], 2016. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://rockcontent.com/br/blog/produtividade/>>. 14
- 2 FLEURY, A. C. C. **Produtividade e organização do trabalho na indústria.** In: . [s.n.], 1980. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75901980000300002>. 14
- 3 PONTOTEL. **O que é a quinta revolução industrial?** In: . [s.n.], 2020. Acesso em: 15/02/2021. Disponível em: <<https://www.pontotel.com.br/quinta-revolucao-industrial/>>. 14
- 4 INDUSTRIAL, S. N. D. A. **Transmissão Mecânica de Veículos Leves.** In: SÃO PAULO: SENAI-SP. [S.l.], 2016. 18, 23, 24, 26
- 5 SCLAR DEANNA; O'DELL, J. **Mecânica de Automóveis para Leigos, edição de bolso.** In: RIO DE JANEIRO - RJ: ALTA BOOKS. [S.l.], 2015. p. 282. 18
- 6 AUTO, E. da empresa consulta. **Cuidados com o câmbio automático.** In: . [s.n.], 2020. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.consultaauto.com.br/blog/dicas-de-manutencao/cuidados-com-o-cambio-automatico>>. 19
- 7 MULTICAMBIOS. **Conversor de Torque.** In: . [s.n.], 2016. Acesso em: 11/05/2021. Disponível em: <<https://multicambios.com.br/cambio-automatico-duvidas/conversor-de-toque-como-funciona/>>. 19
- 8 CONVERSORES, M. **CVT, você sabe o que é?** In: . [s.n.], 2020. Acesso em: 11/05/2021. Disponível em: <<http://www.marfconversores.com.br/cvt-voce-sabe-o-que-e/>>. 20
- 9 VIEIRA, J. L. **A história do automóvel: do início do Século XX à era da produção em massa, volume 2.** In: SÃO PAULO: ALAÚDE EDITORIAL. [S.l.], 2010. 21, 27, 28
- 10 ENGRENAGENS, S. C. e. **Engrenagens Industriais: Quais são os tipos e funções.** In: . [s.n.], 2019. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://sailor.ind.br/engrenagens-industriais-quais-sao-os-tipos-e-funcoes/>>. 21
- 11 DELIBERATO, A. **Câmbio automático: até quantas marchas existem?** In: . [s.n.], 2020. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.webmotors.com.br/wm1/noticias/cambio-automatico-ate-quantas-marchas-existem>>. 23
- 12 ESTADAO. **Caminhão VW Constellation ganha transmissão ZF Traxon.** In: . [s.n.], 2020. Acesso em: 11/05/2021. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/constellation-vwco-ganham-zf-traxon/>>. 23
- 13 AUTOMOTIVA, T. C. **Eaton - Como funciona a Transmissão (Cambio).** In: . [s.n.], 2015. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=f0c3zHS5094>>. 23

- 14 REIF, K. **Fundamentals of Automotive and Engine Technology: Standard Drives, Hybrid Drives Brakes, Safety Systems**. Springer, p. 1–286, 2014. 25
- 15 AUTOPAPO, E. da empresa. **Embreagem: como aumentar a vida útil e adiar a troca**. In: . [s.n.], 2021. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://autopapo.uol.com.br/noticia/embreagem-como-detonar/>>. 26
- 16 WEIQING, L. et al. **Shifting process study on AMT of a parallel hybrid electric vehicle**. In: *2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–7. 26
- 17 ZOTTI, E. et al. **Estudo de propostas para um sistema de tração 4x4 em um veículo de tipo BAJ SAE**. *Destaques acadêmicos*, Univates, v. 12, n. 4, p. 253–265, 2020. 27
- 18 PARKER, M. **The History of Manual Transmissions**. In: . [S.l.: s.n.], 2012. 27
- 19 CLASSICAUTOMALL, E. da empresa. **Curved Dash Réplica**. In: . [s.n.], 2021. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.classicautomall.com/vehicles/175/1901-oldsmobile-curved-dash-replica>>. 28
- 20 CHALINE, E. **50 máquinas que mudaram o rumo da história**. In: RIO DE JANEIRO: SEXTANTE. [S.l.], 2014. 28
- 21 CARANDCLASSIC, E. da empresa. **1908 Mercedes Simplex**. In: . [s.n.], 2021. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.carandclassic.co.uk/car/C1222794>>. 29
- 22 VIEIRA, J. L. **A história do automóvel: o período entreguerras, volume 3**. In: SÃO PAULO: ALAÚDE EDITORIAL. [S.l.], 2010. 29
- 23 WEADOCK, T. **Sticktory: the evolution of classic transmissions**. In: . [s.n.], 2012. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.historicvehicle.org/sticktory-the-evolution-of-classic-transmissions/>>. 29
- 24 DESANTIS, G. **The Hydramatic Transmission is the Coolest Thing Since Sliced Bread**. In: . [s.n.], 2021. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.motorbiscuit.com/the-hydramatic-transmission-is-the-coolest-thing-since-sliced-bread>>. 30
- 25 RAMOS, A. **Automático ou automatizado: qual é o melhor câmbio?** In: . [s.n.], 2016. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://transportemundial.com.br/automatico-ou-automatizado-qual-o-melhor-cambio/>>. 30
- 26 KUTNEY, P. **Eaton reafirma aposta em câmbio automatizado para caminhões leves**. In: . [s.n.], 2020. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.automotivebusiness.com.br/noticia/31337/eaton-reafirma-aposta-em-cambio-automatizado-para-caminhoes-leves>>. 31
- 27 CHICODABOLEIA, E. da empresa. **Eaton EAO-6106**. In: . [s.n.], 2021. Acesso em: 04/03/2021. Disponível em: <<https://www.chicodaboleia.com.br/transmissao-automatizada-e-embreagem-eaton-equipam-dois-novos-modelos-do-vw-delivery/eaton-eao-6106/>>. 31

- 28 SSTELEMATICA, E. da empresa. **Conta-giros: a ferramenta de trabalho do motorista**. In: . [s.n.], 2021. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <<https://sstelematica.com.br/conta-giros/>>. 33
- 29 DANTAS, A. P. **Torque ou Potência**. In: . [s.n.], 2021. Acesso em: 14/05/2021. Disponível em: <http://clubedocarroelettrico.com.br/index.php?/passo-a-passo/torque_ou_potencia/>. 33, 34
- 30 NICOLAZZI EDISON DA ROSA, L. d. C. M. L. L. C. **Uma introdução à modelagem quase-estática de veículos automotores de rodas**. In: FLORIANÓPOLIS: GRANTE - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFSC. [S.l.], 2001. 35
- 31 DEJTIAR, F. **Como projetar e calcular uma rampa?** In: . [s.n.], 2019. Acesso em: 16/05/2021. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/894740/como-projetar-e-calcular-uma-rampa>>. 41
- 32 OLIVEIRA, M. F. de. **METODOLOGIA CIENTÍFICA: um manual para a realização de pesquisas em administração**. Catalão: UFG, 2011. 42
- 33 TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em Ciências Sociais: a pesquisa qualitativa em Educação**. São Paulo. Editora Atlas, 1987. 42
- 34 BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. **Investigação qualitativa em educação**. Porto Editora, 2003. 42