

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

HENRIQUE WEBER WEIHERMANN

ESTUDO SOBRE APLICAÇÃO DE TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL  
PARA VEÍCULOS DE PEQUENO PORTE

Joinville, 2015

HENRIQUE WEBER WEIHERMANN

ESTUDO SOBRE APLICAÇÃO DE TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL  
PARA VEÍCULOS DE PEQUENO PORTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
à Universidade Federal de Santa Catarina,  
como exigência para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio  
Fiorentin

Joinville, 2015

HENRIQUE WEBER WEIHERMANN

ESTUDO SOBRE APLICAÇÃO DE TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL  
PARA VEÍCULOS DE PEQUENO PORTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
à Universidade Federal de Santa Catarina,  
como exigência para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Automotiva.

Banca Examinadora:

---

Dr. Thiago Antonio Fiorentin

---

Dr. Jakerson Ricardo Gevinski

---

Dr. Lucas Weihmann

Joinville, 2015

## RESUMO

As exigências exercidas pelo consumidor de automóveis em relação ao conforto vêm aumentando nas últimas décadas, assim como a legislação governamental por equipamentos de segurança dentro de um veículo automotor. Há uma clara necessidade por automóveis mais seguros e confortáveis devido ao crescimento de necessidades dos usuários deste mercado. Neste contexto, a elaboração de uma transmissão mais confortável como a continuamente variável (CVT) proporciona uma solução para os problemas enfrentados neste segmento. Assim, um dos objetivos deste trabalho é realizar um estudo de viabilidade para uma transmissão continuamente variável para um veículo de acesso à população, sendo um projeto de baixo custo para a substituição da transmissão manual para um câmbio mais confortável. Outro objetivo é comparar a viabilidade do projeto com os modelos de transmissões empregadas nos veículos de entrada do mercado. Para atingir estes objetivos o projeto foi dividido em três fases. Primeiramente uma introdução sobre os sistemas de transmissão utilizados na categoria descrita, seguido do projeto propriamente dito, onde foi aplicada a metodologia de cálculos de relações de transmissão de torque. Finalmente, um estudo de viabilidade levando em conta o preço das peças e a manutenção do câmbio, assim como o custo para elaboração do projeto.

Palavras Chave: Transmissão Continuamente Variável, Segurança, Conforto, Baixo custo.

## **ABSTRACT**

The demands asked by the vehicle consumer regarding comfort have been increasing in recent decades, as well as government legislation for safety equipment in a motor vehicle. There is a clear need for safer and more comfortable vehicles due to the growth of these market users. In this context, the development of a more reliable transmission as the continuously variable transmission (CVT) provides a solution to the problems facing this segment. So one of the goals of this paper is to develop a continuously variable transmission for a popular vehicle, being a low-cost project to replace the manual transmission for a more comfortable and reliable exchange. Another objective is to compare the feasibility of the project with the models transmissions employed in market entry vehicles. To achieve these objectives the project was divided into three stages. First an introduction to the transmission systems used in the described category, followed by the project itself, which was applied to the calculation methodology of torque gear ratios. Finally, a feasibility study taking into account the price of the parts and the maintenance of the exchange, as well as the cost of preparing the project.

**Keywords:** Continuously Variable Transmission, Security, Comfort, Low cost.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de consumo de combustível entre o câmbio manual e o CVT.	27
Tabela 2 – Relações de marcha.	33
Tabela 3 – Velocidades, em km/h, do veículo em cada marcha	34
Tabela 4 – Rendimento em função do tipo de transmissão.	36
Tabela 5 – Valores de comprimento da correia.	42
Tabela 6 – Comparação dimensional das transmissões	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo didático de uma caixa de marchas.	11
Figura 2 – Modelo didático da caixa de câmbio com a seleção de uma marcha.	11
Figura 3 – Par de engrenagens de dentes helicoidais.	12
Figura 4 – Par de engrenagens de dentes retos.	13
Figura 5 – Gráfico de força trativa para câmbio manual.	14
Figura 6 – Embreagem automotiva.	15
Figura 6 – Disposição do diferencial.	16
Figura 7 – Eixo de transmissão.	17
Figura 8 – Câmbio automatizado.	18
Figura 9 – Esquema do câmbio de dupla embreagem.	19
Figura 10 – Conversor de torque.	21
Figura 11 – Câmbio automático.	21
Figura 12 – Curva de força trativa do câmbio automático.	22
Figura 13 – Transmissão continuamente variável de polias.	23
Figura 14 – Câmbio Jacto da Nissan.	24
Figura 15 – Câmbio Multitronic da Audi.	25
Figura 16 – Câmbio toroidal.	26
Figura 17 – Câmbio CVT do Honda Fit.	27
Figura 18 – Curva de potência pela rotação do motor.	30
Figura 19 – Curva de torque pela rotação do motor.	31
Figura 20 – Curva de consumo específico do motor.	32
Figura 21 – Curva dente de serra seguindo o menor consumo de combustível.	35
Figura 22 – Curva dente de serra para melhor torque.	35
Figura 23 – Força trativa pela velocidade.	37
Figura 24 – Modelo de manopla de câmbio.	38
Figura 25 – Força Trativa em 3000 RPM.	39
Figura 26 – Força Trativa em 4500 RPM.	40
Figura 27 – Transmissão por correia com polias.	41
Figura 28 – Comparação de forças de tração do câmbio manual e CVT.	43

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	10
2.1 Câmbio Manual .....	12
2.1.2 Diferencial .....	15
2.1.3 Eixo de Transmissão .....	17
2.2 Câmbio Automatizado.....	18
2.3 Câmbio Automático .....	20
2.4 Câmbio Continuamente Variável .....	23
2.4.1 Câmbio Jatco .....	24
2.4.2 Câmbio Multitronic .....	25
2.4.3 Cambio CVT Toroidal .....	25
2.5 Análise Comparativa .....	26
2.6 Estimativa de Custo de Desenvolvimento.....	28
2.6.1 Tempo de desenvolvimento.....	29
2.6.2 Custo de Testes e Desenvolvimento.....	29
2.6.3 Custo de Trabalho .....	30
2.6.4 Custo de implantação da nova transmissão .....	30
3. METODOLOGIA .....	31
3.1 Cálculo das Relações de Transmissões .....	32
3.2 Descrição do Sistema de Transmissão .....	39
3.3. Dimensionamento das Polias e Correia.....	42
4. ANÁLISE DE RESULTADOS E CUSTOS.....	45
4.1 Estimativa de preço final do veículo .....	46
5. CONCLUSÃO .....	48
REFERÊNCIAS .....	50

## 1. INTRODUÇÃO

O mercado automotivo, por parte dos compradores, vem exigindo cada vez mais conforto, segurança e tecnologia mesmo nas faixas mais populares de automóveis. Os veículos de motorização 1.0 e 1.4 representam este nicho do mercado. A cada ano que passa mais opções de compra são lançadas, disputando a faixa mais concorrida do mercado.

Observa-se que os itens de conforto nos carros até o ano de 1995 eram somente ar quente e no máximo ar condicionado, atualmente vão desde pacotes elétricos até transmissões semi automáticas. Além disto, segundo Pellizzari (2002), 40% das mulheres e 25% dos homens que compram um veículo tem preferência pelo câmbio automático.

O problema é que a exigência de segurança e tecnologia nos veículos é tão acelerada que as pesquisas deixam a desejar no quesito de estar presente em cada segmento de demanda dos clientes. Estima-se que uma transmissão automática com custo 30% a 40% superior seria bem aceita pelo mercado.

Para tanto este estudo será baseado na pesquisa de Pellizzari (2002) que trazem conceitos de mercado automotivo e cálculos referentes ao projeto de uma transmissão continuamente variável. Será utilizado o método das relações de engrenagens (Norton, 2013), o qual apresenta equações para a realização de cálculos de relação de transmissão.

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo de uma alternativa de transmissão de forças com um câmbio continuamente variável, com preço compatível ao mercado. Além deste objetivo principal, o presente trabalho possui os objetivos específicos:

- Apresentar as curvas de torque do automóvel analisado;
- Realizar uma revisão bibliográfica das transmissões automotivas;
- Comparar a viabilidade técnica e financeira do projeto.

Será visto em seguida uma revisão bibliográfica sobre sistemas de transmissão de potência em automóveis.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sistema de transmissão é o conjunto de elementos que garantem a transmissão de potência do motor para os diferentes mecanismos a serem utilizados (Ribas et al., 2010). A caixa de marchas é essencialmente composta por pares de engrenagens, também chamados de árvores ou trens de engrenagens, que transmitem a força do motor do veículo até as rodas, passando ainda pelo diferencial.

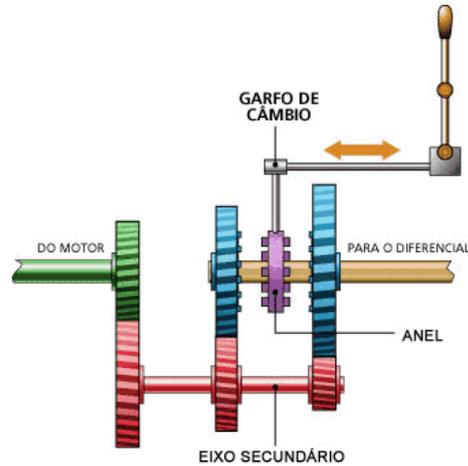
A caixa de transmissão manual em um automóvel possui um eixo primário, oriundo do próprio motor, um eixo secundário (árvore intermediária) e o eixo de saída. Os eixos estão acopladas através de engrenagens, as quais definem a rotação e o torque final no eixo secundário.

Os principais componentes da caixa de marcha manual são:

- Pares de engrenagens;
- Embreagem;
- Anéis sincronizadores;
- Eixos de transmissão;
- Alavanca de seleção de marcha.

Ao acionar a embreagem e selecionar uma marcha pela alavanca, o sincronizador pertinente à marcha selecionada acopla a engrenagem no eixo de saída. Geralmente o sincronizador age para dois pares de engrenagens. Assim o movimento do eixo proveniente do motor é transferido para o eixo de saída através da conexão do par de engrenagens selecionado. É possível observar na Figura 1 como é disposta a caixa de marchas em um esquema didático. Além disso, é apresentado o eixo de entrada na transmissão, o eixo intermediário e o eixo de saída. Também é possível observar o anel sincronizador posicionado entre dois pares de engrenagens. Nesta condição o veículo está em “ponto morto”.

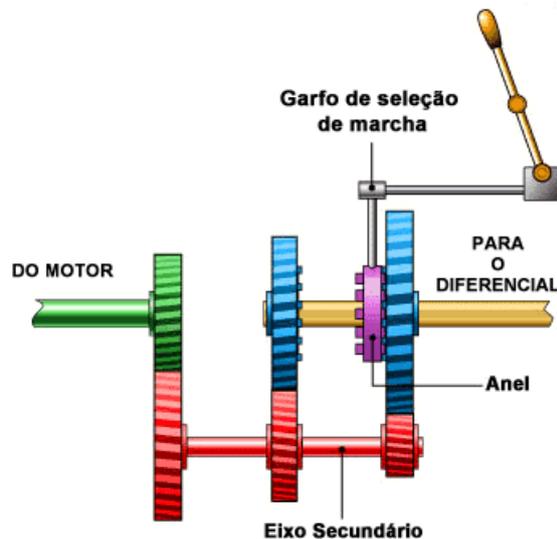
Figura1 - Modelo didático de uma caixa de marchas.



Fonte: Brain (2003).

Na Figura 2 é possível observar o funcionamento da caixa de marchas quando é selecionada uma marcha pela alavanca de câmbio. O anel sincronizador está acoplado no par de engrenagens da direita. Comparando as dimensões (diâmetros) das engrenagens posicionadas no eixo de saída é possível afirmar que o par da direita desenvolve mais torque do que o par da esquerda.

Figura 2 – Modelo didático da caixa de câmbio com a seleção de uma marcha.



Fonte: Brain (2003).

Assim como descrito anteriormente, para que a troca de marcha ocorra, o sincronizador é movido em direção à engrenagem de escolha do condutor através do garfo de seleção.

## 2.1 Câmbio Manual

O câmbio manual é a principal forma de transmissão de torque em automóveis desde o princípio do mercado automotivo. Pode-se perceber que essa tendência do câmbio manual vem mudando ao longo da última década. A mudança ocorre pelo fato do câmbio manual apresentar menor segurança de seus componentes devido ao desgaste mecânico, segundo Naunheimer (2011).

Essa configuração de transmissão é a mesma explicada anteriormente onde às trocas de marcha são feitas manualmente, assim como o acionamento da embreagem.

Podemos verificar que ainda hoje, no Brasil, o câmbio manual é empregado em grande parte dos veículos por ser, principalmente, a configuração de transmissão menos custosa, possuindo manutenção fácil e componentes com um nível de complexidade menor que as outras opções.

Assim como disposto na Figura 2, o câmbio manual transmite torque através de pares de engrenagem. Estas engrenagens possuem tamanho e número de dentes diversos, assim pode-se obter inúmeras relações de transmissão.

Geralmente, a caixa de marchas é formada por pares de engrenagens com dentes helicoidais, Figura 3, e um par de engrenagens de dentes retos presente na Figura 4. O conjunto composto por engrenagens com dentes retos é disposto para a marcha à ré.

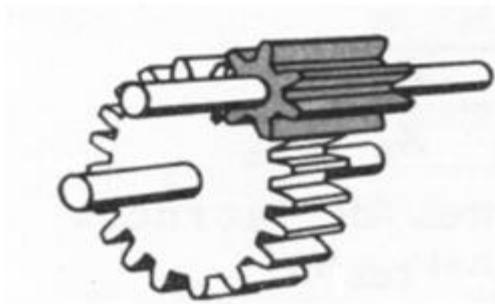
Figura 3 – Par de engrenagens de dentes helicoidais.



Fonte: Generoso (2009).

Segundo conhecimentos adquiridos, engrenagens de dentes helicoidais, no contato dente com dente, são menos ruidosas e assim, normalmente, são usadas para as configurações de marchas onde o veículo desloca-se para frente. Já as engrenagens de dentes retos (Figura 4) são usadas para a marcha à ré pelo fator de que está marcha geralmente é composta de um trio de engrenagens onde um não se encontra engatada. A mesma é deslizada ao acionar a ré, engrenando assim o sistema. Outro motivo é a produção de mais ruído, alertando outros veículos ao seu redor.

Figura 4 – Par de engrenagens de dentes retos.

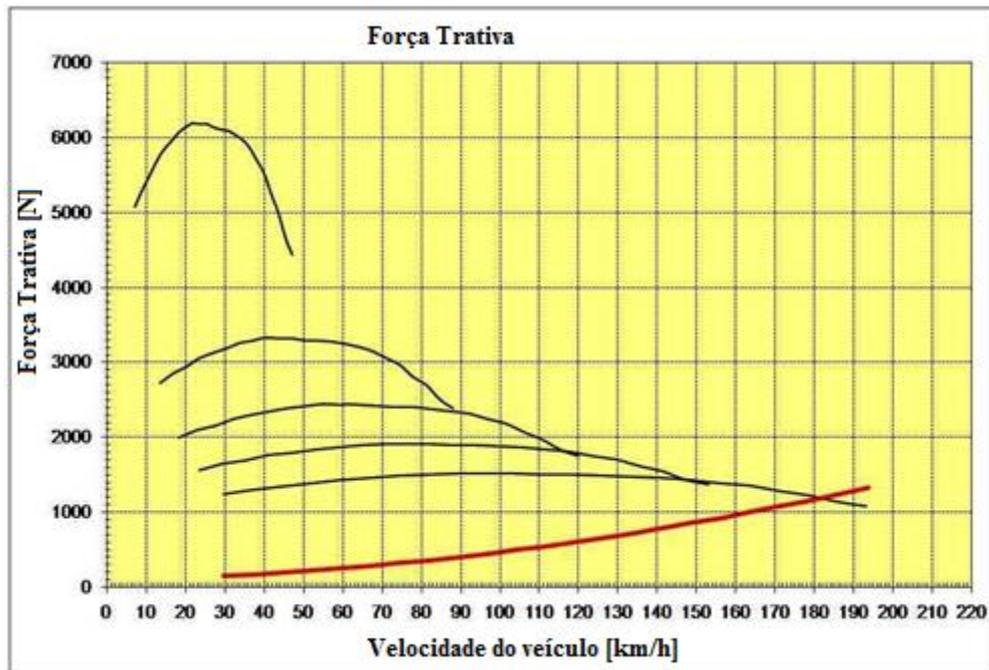


Fonte: Generoso (2009).

Em relação as vantagens e desvantagens esta configuração de câmbio transmite mais esportividade, é melhor nas ultrapassagens e há grande oferta de peças de reposição. Apesar de possuir manutenção mais em conta, quando mal usado, exige mais manutenção do que outros tipos de transmissão. Também exige mais do condutor ,é mais cansativo, e o uso incorreto das marchas pode ocasionar aumento de consumo, problemas de embreagem e prejuízo ao motor. Ideal para pessoas que moram em lugares onde não há muito congestionamento e que têm prazer em dirigir.

O gráfico de força trativa para o câmbio manual pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Gráfico de força trativa para câmbio manual.



Fonte: Meccia (2014).

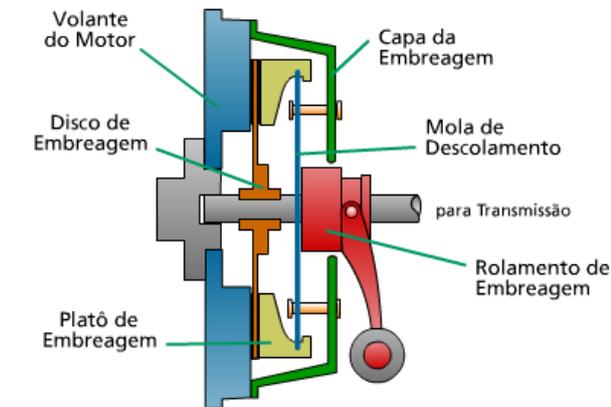
Cada curva na Figura 5 representa o valor de força trativa de cada relação de marcha do câmbio manual, começando da primeira marcha até a quinta. Na figura também é possível ver em vermelho a curva de resistência ao movimento, assim é possível observar que o veículo que apresenta esta curva não ultrapassará os 180 km/h, aproximadamente.

É possível observar que existe um espaço entre as curvas ocasionando perda de força de tração, característica esta que é amenizada no câmbio CVT. As linhas azuis no gráfico representam a força trativa do veículo em função da velocidade, cada curva é uma marcha. Já a curva vermelha representa as forças de resistência ao movimento. No ponto de cruzamento das curvas, azul com a vermelha, é onde o veículo apresenta a velocidade máxima.

### 2.1.1 Embreagem

A embreagem é um dispositivo que permite o acoplamento e desacoplamento do eixo oriundo do motor com a transmissão. Estes acoplamentos transmitem força e movimento somente quando acionados. Segundo Generoso (2009), existem dois tipos principais de embreagem: por adaptação de forma e por atrito. É possível observar com a Figura 6 como é disposta a embreagem automotiva.

Figura 6 – Embreagem automotiva.



Fonte: Nice (2000).

Pode-se perceber que a embreagem por atrito de disco é a mais empregada em veículos de passeio, ela consiste em anéis planos pressionados contra um disco com um material de alto coeficiente de atrito, evitando escorregamento na transmissão de potência. Neste caso a embreagem é acionada, mecanicamente, por uma alavanca ou pedal de embreagem.

Para Generoso (2009), existem quatro tipos de embreagens:

- Acionamento mecânico – por meio de alavancas ou pedais;
- Acionamento eletromagnético – por meio de solenoides ou bobinas;
- Acionamento hidráulico/pneumático – por meio de pistões;
- Acionamento por mola – através da pressão de uma mola.

### 2.1.2 Diferencial

Segundo Karim Nice (2014) o diferencial é, na maioria dos veículos, onde o torque recebe a última transformação antes de ir para as rodas.

Além disso, o diferencial possui três funções principais:

- Direcionar a potência do motor para as rodas;
- Atuar como um mecanismo final de redução no veículo, diminuindo a velocidade da transmissão uma última vez, antes que ela chegue às rodas;

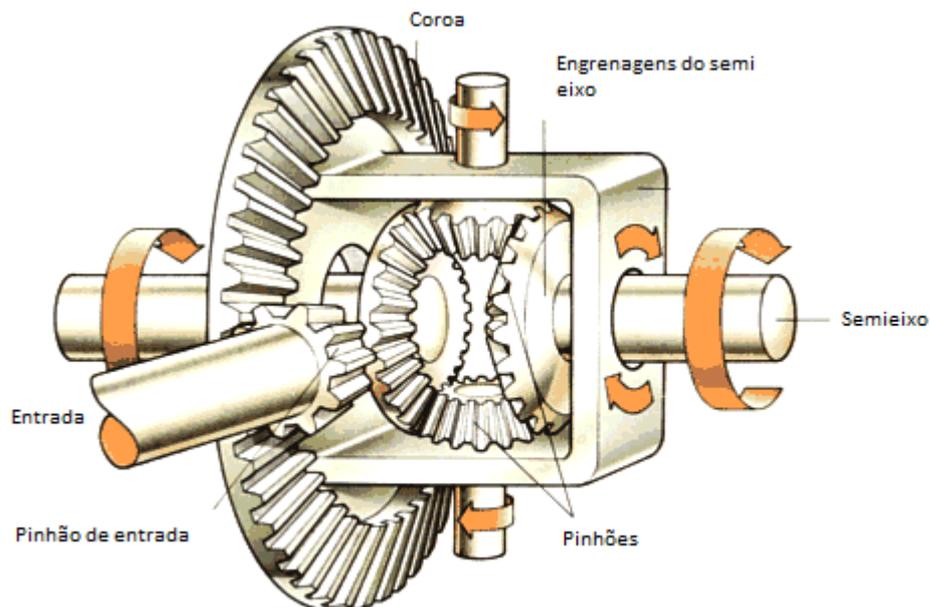
- Transmitir a potência para as rodas, enquanto permite que elas girem a velocidades diferentes. Foi esta característica a qual deu o nome do dispositivo de diferencial.

Este mecanismo divide o torque do motor para as duas direções, permitindo a cada saída rodar a uma velocidade diferente. Na Figura 6 podemos ver como é disposto o diferencial. Composto por: pinhões, coroa, semieixo e engrenagens planetárias.

Seu funcionamento não é complexo. O torque vem pelo eixo de entrada e é transmitido para a coroa, a relação de diferencial é feita pela diferença de diâmetro, ou número de dentes, entre o pinhão de entrada e a coroa.

As engrenagens planetárias e pinhões servem para que as rodas possam girar em velocidades diferentes, por exemplo, quando o veículo está fazendo uma curva a velocidade da roda de fora da curva deve ser maior do que a velocidade da roda de dentro da curva.

Figura 6 – Disposição do diferencial.



Fonte: Costa (2002).

Para veículos com tração dianteira o diferencial localiza-se junto da transmissão do veículo, já em veículos de tração traseira o mesmo encontra-se perto das rodas traseiras, ligado a transmissão por um eixo chamado de cardan.

Um veículo pode ainda ter mais do que um diferencial, isso acontece caso o mesmo seja com tração em mais eixos.

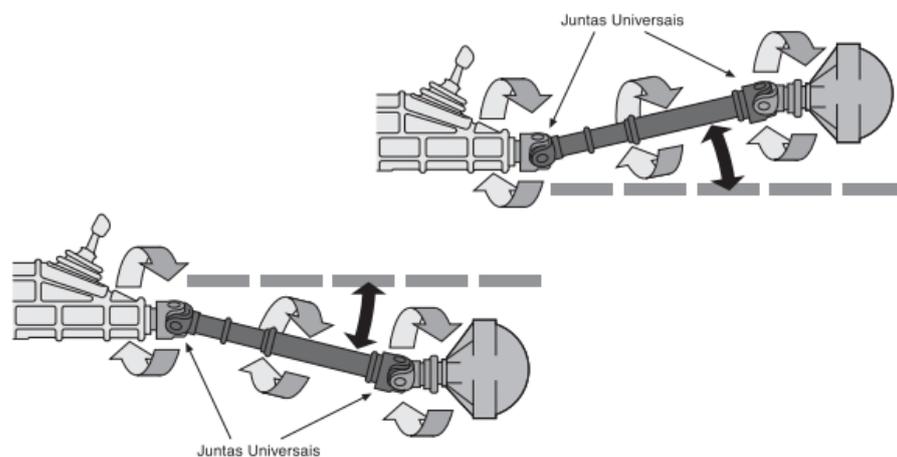
### 2.1.3 Eixo de Transmissão

A função básica do eixo de transmissão, também conhecido como eixo cardan, é transmitir a energia gerada pelo motor para o eixo diferencial, e, por sua vez, o eixo diferencial irá transferir esta energia recebida do eixo cardan para as rodas. Pode até parecer uma tarefa simples, porém não é nada fácil. Em terrenos irregulares, o eixo traseiro oscila muito, e a força tem que continuar chegando às rodas sem perda de potência.

A princípio, parece um tubo comprido, às vezes apoiado num suporte (mancal) e que fica o tempo todo sob as longarinas de caminhões ou o ônibus. Nas extremidades desse tubo existem conexões chamadas de juntas universais, onde estão as cruzetas. São as cruzetas que dão aos cardans a capacidade de transmitir força do motor para o eixo diferencial em diferentes ângulos.

Além de transmitir a força em ângulo, permitido pelas juntas universais, o cardan também precisa ter a capacidade de se encolher e expandir, conforme a oscilação vertical do eixo diferencial. E para isso, o conjunto de luvas e ponteiras localizado no meio do cardan é que permite este movimento. É possível observar na Figura 7 como é disposto o eixo de transmissão (cardan).

Figura 7 – Eixo de transmissão.



Fonte: Spicer (2015).

Veículos com tração traseira possuem eixos de transmissão assim como pode ser visto da Figura 7, já os veículos com tração dianteira possuem um eixo muito menor que também liga a transmissão no diferencial.

## 2.2 Câmbio Automatizado

Nos dias de hoje esta configuração de câmbio é muito aplicada na indústria automotiva mesmo nos veículos de entrada. Ela usa a eficiência de um câmbio manual e o conforto de um câmbio automático, porém apresentando trancos durante as trocas de marchas.

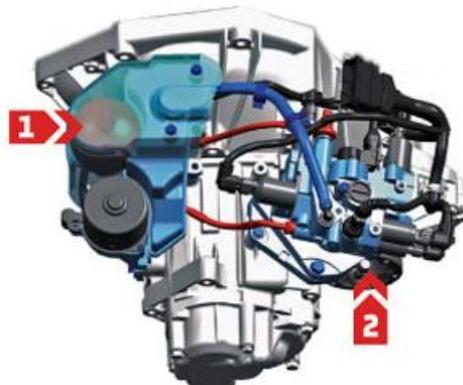
Segundo Naunheimer (2011) o câmbio automatizado é mecanicamente igual ao câmbio manual, porém com a ajuda na eletrônica para efetuar as trocas de marcha. A eletrônica não atua somente na seleção de marchas como também no acionamento da embreagem.

Nesta configuração de câmbio o pedal de embreagem não existe e um atuador faz seu acionamento além da troca de marchas. Existem dois atuadores para o câmbio automatizado, um aciona a embreagem e o outro faz a troca de marcha.

A manutenção para este tipo de transmissão não é muito complexa, pois mantém os mesmo componentes da transmissão manual.

Para que a operação de troca de marchas e acionamento da embreagem seja feita uma central eletrônica avalia variáveis como rotação do motor, inclinação do veículo, temperatura e velocidade do veículo. Diante disso é feita a escolha da melhor marcha a ser engatada. É possível observar na Figura 8 os atuadores e os cabos.

Figura 8 – Câmbio automatizado.



Fonte: Quatro Rodas (2008).

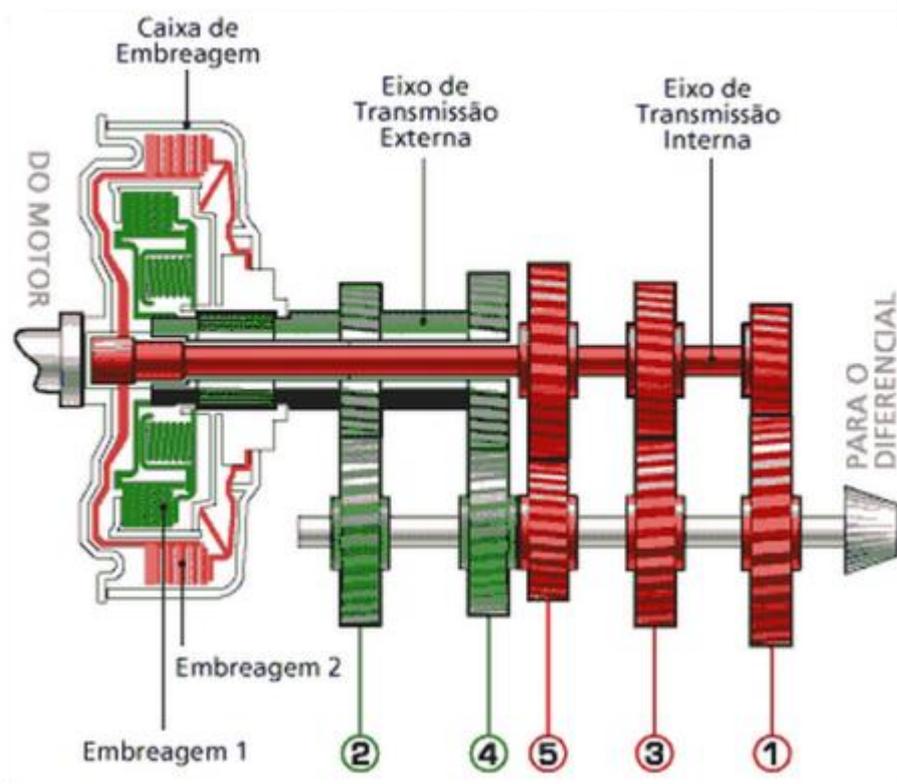
Há um (1) reservatório de óleo em alta pressão que, quando necessário, envia fluido para os (2) atuadores, fazendo com que eles acionem embreagem e câmbio e executem a troca de marcha. O sistema todo é comandado por uma central eletrônica.

Esta configuração de câmbio possui um ponto fraco para o consumidor final que são os trancos. Pelo fato de o motorista estar sempre com o pé no acelerador quando a troca de marcha é efetuada a rotação cai e por isso o tranco. Atualmente, os câmbios automatizados não apresentam este desconforto com muita frequência.

Assim como no câmbio manual, a embreagem continua a ser empregada, porém como o acionamento da mesma é feito por computadores, começam a existir mais opções de embreagens, como dupla embreagem.

Importante ressaltar o câmbio de dupla embreagem, cujo nome já diz, possui duas embreagens. Esta configuração apresenta dois eixos de transmissão assim quando uma marcha é engrenada a próxima já esta pré-selecionada melhorando a rapidez de troca. Na Figura 9 é possível observar um esquema de como o câmbio é disposto.

Figura 9 – Esquema do câmbio de dupla embreagem.



Fonte: Nice (2000).

Configurado de maneira que as marchas pares encontram-se em um eixo e as ímpares em outro, podendo assim pré-selecionar a próxima marcha e diminuir o tempo de troca para somente o tempo de acionamento da própria embreagem.

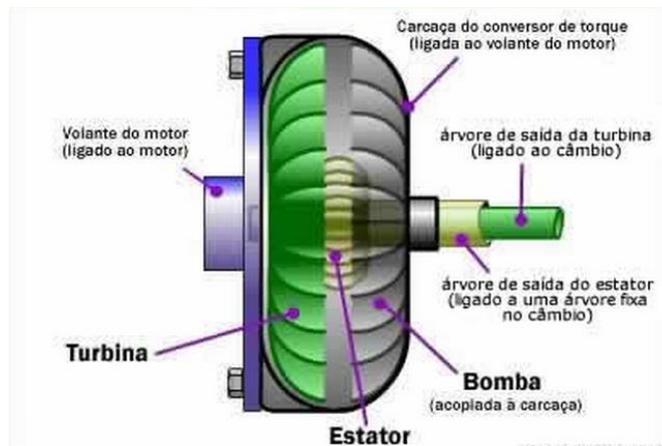
O câmbio automatizado é uma opção mais em conta que a transmissão automática, fica no meio do caminho entre o câmbio manual e o automático. É voltado para carros compactos e médios, onde não há aumento de consumo e nem perda de potência. São câmbios manuais, porém a embreagem é acionada por comando eletrônico dispensando o pedal de embreagem.

Para as vantagens e desvantagens, no câmbio automatizado o condutor tem total autonomia na escolha da marcha que será utilizada. Uma das principais reclamações dos proprietários de veículos com esse tipo de câmbio são os famosos trancos. Ele também não rende muito nas subidas, principalmente quando está cheio. Vale lembrar que ele é automatizado e não automático. Em veículos de luxo, com transmissão automatizada, há ainda a opção de sistema de dupla embreagem. É o preferido de muitas pessoas por transmitir conforto e esportividade ao mesmo tempo.

### 2.3 Câmbio Automático

As transmissões automáticas atuais de 4 e 5 velocidades utilizadas em veículos com motores longitudinais fazem uso de conjuntos de redutores planetários com conversores de torque hidrodinâmicos como elemento de partida. Estas transmissões dominam os segmentos de veículos médios, de luxo e SUV. A introdução de embreagens de travamento nos conversores de torque, controle eletrônico, aumento no número de marchas e numerosas otimizações de componentes contribuíram para uma redução significativa das perdas de potência das transmissões automáticas. Como resultado, a diferença no consumo de combustível relativo as transmissões manuais foi reduzida. Além do que, uma melhor qualidade de troca, obtida através da utilização de algoritmos de controle específicos para este fim, permite a adaptação da transmissão às condições específicas de dirigibilidade com o objetivo de melhorar o conforto ao dirigir. Na Figura 10 estão indicados os principais componentes de um conversor de torque.

Figura 10 – Conversor de torque.



Fonte: Nice (2000).

A introdução de transmissões de 5 velocidades no final dos anos 80, assim como a ampliação de suas funcionalidades, tal como modos de trocas manuais, elevaram o apelo por transmissões automáticas. Requisitos de: redução no consumo de combustível; emissões de gases; de redução do tamanho; peso da transmissão; necessidade crescente de proteção ambiental; conforto ao dirigir e desempenho, levaram ao desenvolvimento de transmissões automáticas de 6 ou 7 velocidades. Vantagens da transmissão de 6 velocidades sobre a de 5 incluem redução no consumo de combustível de 5 a 6 %, redução das emissões, aceleração até 5% melhor, 13% de redução do peso e maior durabilidade. (JOST, 2004). Na Figura 11 pode-se observar como é disposto o câmbio automático.

Figura 11 – Câmbio automático.

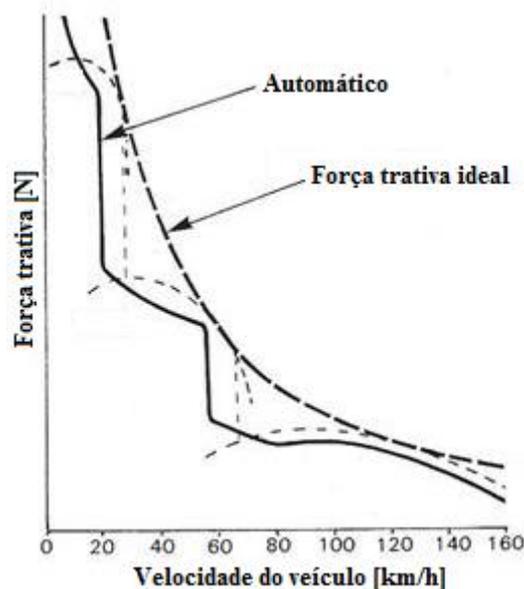


Fonte: Automotive Bussiness (2013).

Assim como em veículos com transmissões manuais convencionais, os veículos dotados de transmissão automática necessitam uma forma de permitir que o motor funcione enquanto as rodas e as marchas na transmissão encontram-se paradas. Veículos com transmissão manual utilizam-se de uma embreagem, que desconecta por completo o motor da transmissão. Veículos com transmissão automática utilizam um conversor de torque. (NICE, 2005)

Um conversor de torque realiza uma espécie de acoplamento fluido, o qual permite o motor girar de forma quase independente da transmissão. (NICE, 2005). Um fluido utiliza energia hidro cinética como meio de transferência de torque do motor para a transmissão de tal forma a automaticamente ajustar-se as características requeridas de velocidade, carga e aceleração. (HEISLER, 2002). Na Figura 12 pode-se observar a curva de força trativa característica do câmbio automático. Este gráfico de força trativa apresenta a característica de união das curvas de cada marcha por uma linha reta devido ao constante acoplamento da transmissão com o motor pelo conversor de torque.

Figura 12 – Curva de força trativa do câmbio automático.



Fonte: Cartech (2015)

Em relação às vantagens e desvantagens o câmbio automático possui maior durabilidade, é mais confortável e seguro. Por outro lado, a manutenção é mais cara e o gasto de combustível é maior dos que a transmissão manual e automatizada. Na ladeira, o carro

pode ser retido acionando apenas o acelerador. Exige troca periódica do filtro e do óleo do câmbio, além de mão de obra especializada.

#### 2.4 Câmbio Continuamente Variável

O câmbio continuamente variável ou CVT (*continuously variable transmission*) é uma nova configuração de transmissão que apareceu nas últimas décadas em carros de produção.

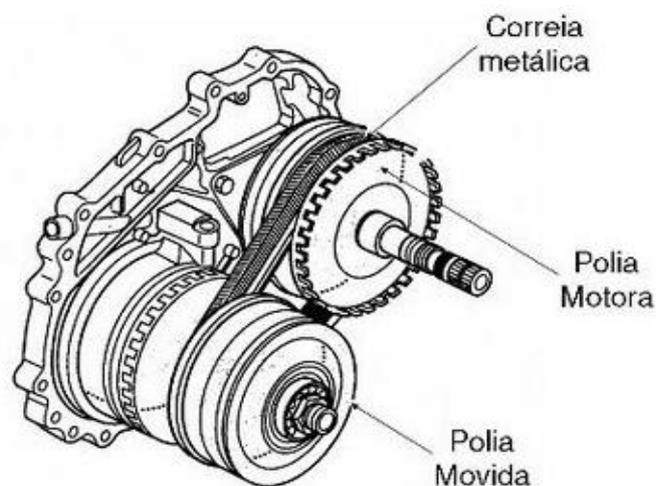
O CVT possui a principal característica de manter a transmissão de potência durante todo o tempo.

Esta característica aparece, pois o câmbio CVT não possui marchas e sim um sistema de polias e correias tornando possível acelerar até altas velocidades sem que haja trancos e de uma forma confortável.

Segundo Naunheimer (2011), este se torna mais econômico sendo programado para permanecer em uma rotação do motor na faixa econômica.

Seu funcionamento é simples. Quando dois cones da polia estão afastados a correia passa pela parte mais baixa, fazendo com que a correia tenha um diâmetro menor. Quando os cones estão juntos a correia passa pela parte mais alta dos cones possuindo um diâmetro maior. Como a relação de transmissão é dada pela razão de diâmetros de entrada e saída da correia, possuímos varias combinações para a transmissão de potência. Na Figura 13 é possível observar o funcionamento do cambio CVT.

Figura 13 – Transmissão continuamente variável de polias.



Fonte: Carlos Kelm (2009).

A razão dos diâmetros da correia entre a polia motora e a polia movida gera a relação de transmissão desejada.

#### 2.4.1 Câmbio Jatco

Introduzido pela Nissan em 1999, este câmbio configura um esquema de polias unidas por uma correia, porém com a adesão de um conversor de torque permitindo o acoplamento e a transferência de torque do motor à polia primária. Na Figura 14 pode-se ver o câmbio em detalhes.

Figura 14 – Câmbio Jatco da Nissan.



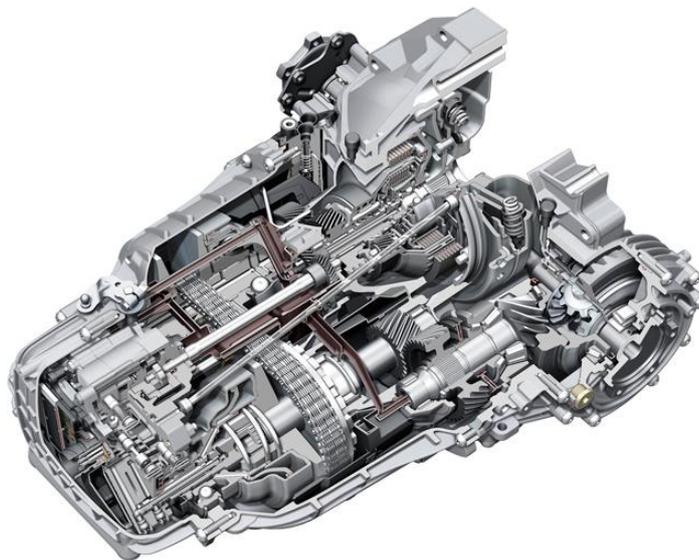
Fonte: Jatco (2004)

É possível observar na Figura 14 as duas polias junto com a corrente metálica posicionadas atrás do conversor de torque representado pelo disco branco na figura.

### 2.4.2 Câmbio Multitronic

Introduzido pela Audi este câmbio apresenta substituição da correia metálica por uma corrente específica e da embreagem por uma de multidiscos concêntrica. Há um atuador de torque que regula diretamente a pressão de fechamento da polia. Com a Figura 15 é possível observar o câmbio cortado por um plano. Como principal característica, observa-se na Figura 15 a troca da correia metálica pela corrente.

Figura 15 – Câmbio Multitronic da Audi.



Fonte: Audi (2015)

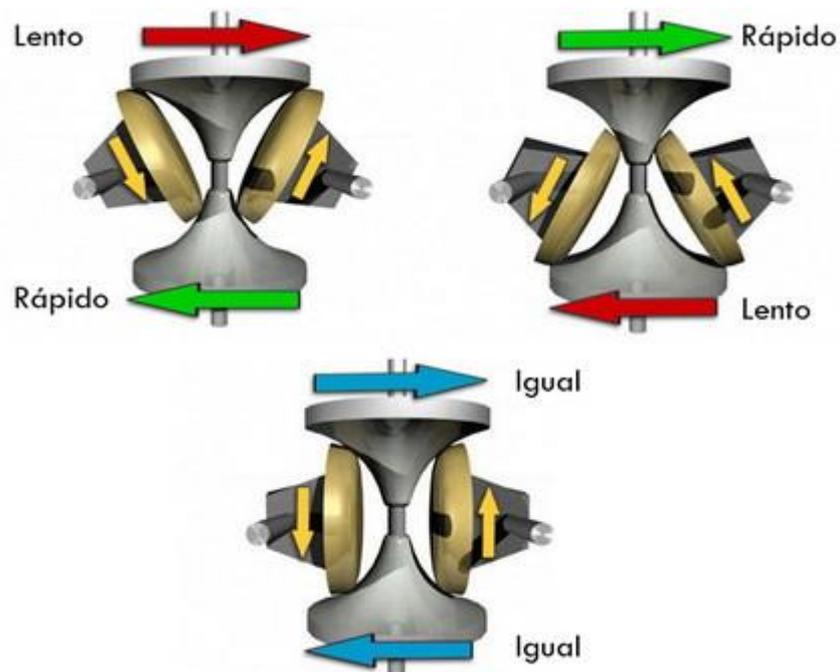
### 2.4.3 Cambio CVT Toroidal

Substitui as correias e polias por discos e roletes. Ainda que tal sistema pareça drasticamente diferente, todos os seus componentes são parecidos com o sistema de polia e correia e tornando-a uma caixa continuamente variável. Seu funcionamento pode ser descrito por::

- Um disco conecta-se ao motor. É equivalente à polia condutora;
- Outro disco conecta-se à árvore de transmissão. Este é equivalente à polia conduzida;
- Roletes, ou rodas, localizados entre os discos agem como a correia, transmitindo energia de um disco para o outro.

Essas rodas podem girar em dois eixos. Elas giram em torno do eixo horizontal e se inclinam para dentro ou para fora em torno do eixo vertical, permitindo que as rodas toquem os discos em áreas diferentes. Quando as rodas estão em contato com o disco condutor próximo ao centro, elas precisam entrar em contato com o disco conduzido perto da borda, resultando numa redução de rotação e um aumento do torque (ou seja, marcha baixa, curta). Quando as rodas encostam-se ao disco condutor próximo à borda, elas precisam entrar em contato com o disco conduzido próximo ao centro, resultando em um aumento de rotação e uma diminuição do torque (ou seja, sobremarcha, marcha bem longa). Uma simples inclinação das rodas muda de maneira incremental a relação de marcha, proporcionando mudanças praticamente instantâneas e suaves. Na Figura 16 é possível observar o funcionamento do câmbio toroidal.

Figura 16 – Câmbio toroidal.



Fonte: Bulletin (2014).

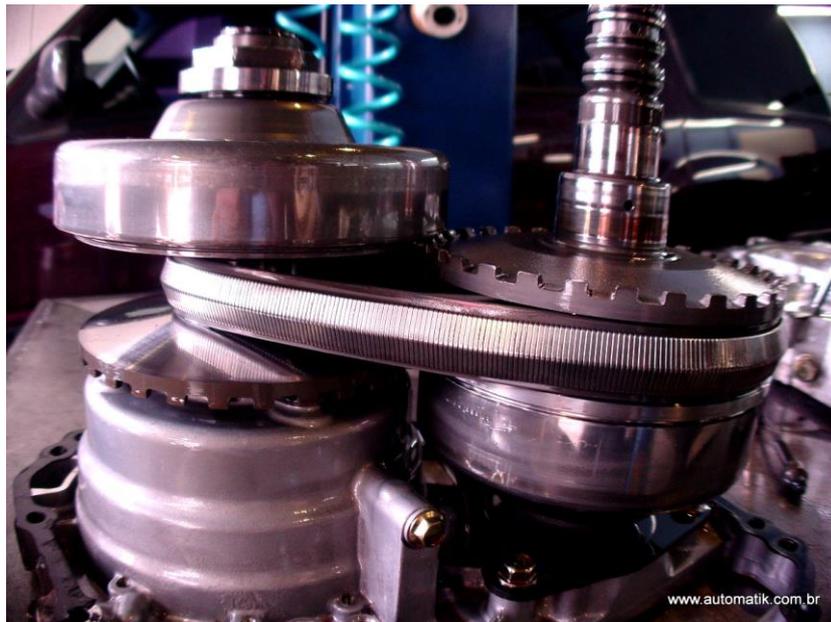
## 2.5 Análise Comparativa

Para uma análise comparativa entre veículos que possuem ambas as configurações de câmbio (manual e CVT), foi escolhido o veículo cujo fluxo de vendas é o maior segundo o número de emplacamentos do Detran.

O veículo escolhido foi o Honda Fit 2015 cujo fluxo de vendas é o maior entre os veículos com câmbio CVT. Os números relacionados a consumo, desempenho e custos são retirados de uma matéria feita por Sérgio Paulo em 2015.

O Honda Fit possui a configuração de câmbio com polias uma correia metálica como é possível ver na Figura 17.

Figura 17 – Câmbio CVT do Honda Fit.



Fonte: Ambrosini (2010)

Segundo Paulo (2015), A transmissão CVT do Honda Fit está disponível no modelo, agora na nova geração *Earth Dreams*. A principal novidade é que o sistema apresenta conversor de torque e uma elasticidade de giro maior, o que melhora a tração em baixas velocidades, proporcionando uma resposta mais rápida, aceleração linear e economia de combustível. Com isso, a força do motor principalmente em subidas mais íngremes é ampliada.

Levando em consideração que o modelo do veículo comparado é o com motor de 1.5 litros, a Tabela 1 apresenta os resultados de consumo para ambos os veículos, manual e CVT.

Tabela 1 – Comparativo de consumo de combustível entre o câmbio manual e o CVT.

Consumo (Km/l)		Transmissão Automática CVT	Transmissão Manual
Etanol	Cidade	<b>8,3</b>	<b>8,3</b>
	Estrada	<b>9,9</b>	<b>9,5</b>
Gasolina	Cidade	<b>12,3</b>	<b>11,6</b>
	Estrada	<b>14,1</b>	<b>13,6</b>

Fonte: Sérgio Paulo (2015).

É possível observar nesta tabela que o câmbio CVT empregado no Honda Fit o torna mais econômico que o câmbio manual mantendo a mesma aceleração.

Segundo a matéria de Sérgio Paulo em seu blog, o veículo não obteve diferença em desempenho comparando os tipos de câmbio e continuou mostrando os valores expressos abaixo:

- Aceleração de 0 a 100 Km/h: 10,9 s
- Aceleração de 0 a 400 m: 17,9 s
- Retomada de 40 a 80 Km/h: 5,6s
- Retomada de 80 a 120 Km/h: 7,7s

Em termos de custos o veículo com câmbio CVT é 7,8% mais caro do que a sua configuração manual sendo que o preço do veículo encontra-se em torno de R\$ 59.000,00 para a configuração CVT e em torno de R\$ 55.000,00 para o câmbio manual.

Já é possível observar que o câmbio CVT pode ser uma alternativa viável quando o fator decisivo é a economia de combustível.

## 2.6 Estimativa de Custo de Desenvolvimento

A estimativa de custo de projeto da transmissão contempla os recursos necessários para o desenvolvimento total, a aplicação no veículo e implementação. A estimativa é feita com base nos estudos de Pellizzari (2002) e podem ser extrapolados para o projeto em questão. Esta estimativa feita por Pellizzari é do ano de 2002 por isso com correção monetária para o ano de 2015 o custo estimado abaixo deverá ser multiplicado por um fator de 2,60.

### 2.6.1 Tempo de desenvolvimento

- Projeto básico da transmissão: 20 semanas;
- Modelamento matemático e teste do modelo: 4 semanas;
- Construção de ferramental protótipo: 12 semanas;
- Construção de 10 protótipos: 2 semanas;
- Testes em bancada: 8 semanas;
- Montagem em veículo: 2 semanas;
- Testes em veículo: 30 semanas;
- Validação final e homologação: 4 semanas;
- Construção do ferramental: 36 semanas;
- Construção do ferramental de usinagem: 15 semanas;
- Treinamento de operadores: 8 semanas;
- Produto piloto: 8 semanas.

Estimativa total de tempo: 112 semanas ( aproximadamente dois anos).

### 2.6.2 Custo de Testes e Desenvolvimento

- Modelamento matemático e teste do modelo: R\$ 150.000,00
- Custo de 10 protótipos: R\$ 300.000,00
- Custo de testes em bancada: R\$ 600.000,00
- Custo de testes em veículos: R\$ 990.000,00
- Custo de 5 veículos: R\$ 105.000,00
- Validação e homologação: R\$ 150.000,00

Total de custos: R\$ 2.205.000,00

### 2.6.3 Custo de Trabalho

- Coordenador de programa: 1;
- Engenheiro de trem de força: 3;
- Engenheiro de testes: 1;
- Projetista: 2;
- Engenheiro experimental: 1;
- Mecânicos/operadores: 3.

Total de desenvolvimento: R\$ 4.065.000,00

### 2.6.4 Custo de implantação da nova transmissão

- Ferramental carcaça injetada: R\$ 5.250.000,00
- Ferramental polias: R\$ 3.600.000,00
- Ferramental engrenagens: R\$ 600.000,00
- Implementação manufatura: R\$ 1.050.000,00
- Custo mão de obra: R\$ 450.000,00

Total de custos: R\$ 10.950.000,00

É visto a seguir a metodologia de trabalho feita. Apresentando as curvas de torque e potência do veículo escolhido, tanto quanto, a curva de consumo específico do motor, delimitando a rotação ideal para o câmbio CVT trabalhar.

### 3. METODOLOGIA

Esta pesquisa é definida como do tipo teórica, ela analisa o problema e constrói hipóteses manipulando variáveis para obterem-se conclusões envolvidas com o objeto de estudo.

Para o êxito da pesquisa teórica neste trabalho, foram utilizadas várias bibliografias de revisão teórica para a melhor compreensão do tema abordado.

Apontamos alguns autores para a fundamentação teórica com termos chaves como ‘câmbio manual’; ‘câmbio CVT’; ‘transmissão por engrenagens’ tanto em português como em espanhol, inglês e alemão, em bases de dados científicos específicos da área de engenharia como o Science Direct e o Portal Capes, assim como o sítio do Google acadêmico. Concluimos que o projeto desta nova configuração de transmissão é de grande interesse ao consumidor.

Assim, definimos como passos essenciais uma comparação prévia de modelos de câmbio continuamente variável (CVT), já empregados na indústria: o projeto em si da nova transmissão; a apresentação do veículo em estudo e por fim o estudo de viabilidade do projeto.

Para determinar as funções do projeto, foram escolhidos os métodos de relação de engrenamento para a transmissão de estudo, seguindo os critérios de seleção de equações para o devido sistema.

No projeto consta a utilização das relações de engrenagens e polias para que o torque seja transmitido de forma adequada ao projeto em questão.

Estas relações seguem o padrão de Norton (2004), que define vários passos para o cálculo de transmissões para máquinas mecânicas.

Os cálculos do sistema de transmissão seguem uma ordem de definições de variáveis como o motor a ser selecionado, a função principal requerida do sistema e o modelo de CVT. Estas etapas já foram selecionadas, sendo o Volkswagen Gol 1.0 o veículo a ser estudado. Economia e baixo custo como características do sistema e um câmbio CVT de polias o modelo empregado no projeto.

Ao desenvolver o projeto e o estudo das novas tecnologias da área de transmissão, foi percebido largo grau de capacitação e aprimoramento do conhecimento em determinadas

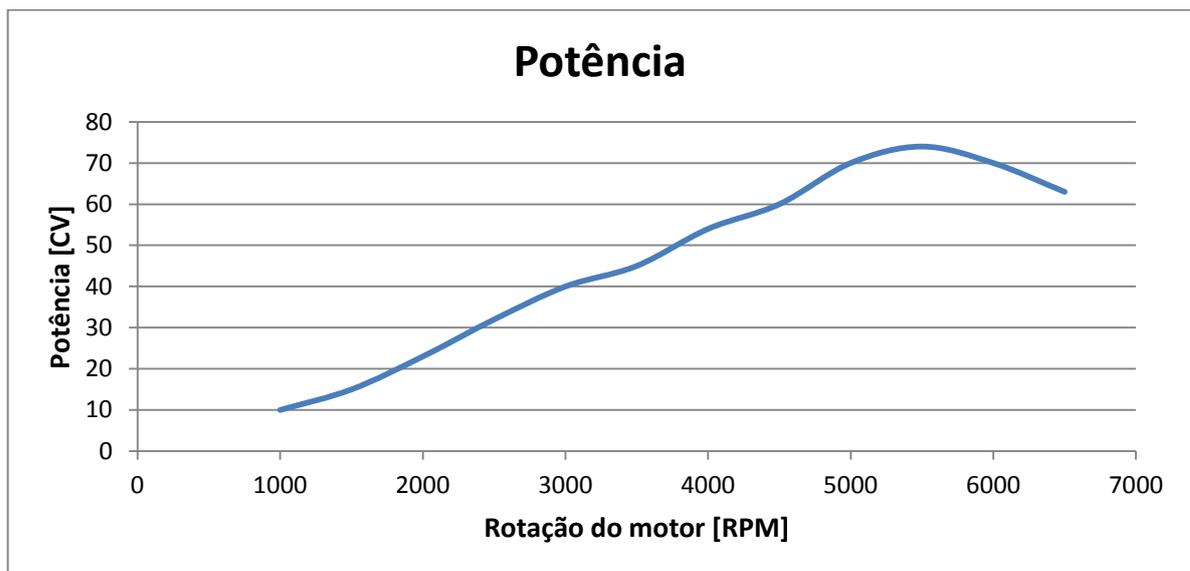
áreas da engenharia, pela circunstância de este projeto assimilar contextos de elementos de máquina, projeto de produto automotivo e sistemas de transmissão.

### 3.1 Cálculo das Relações de Transmissões

Primeiramente definimos o motor do veículo a ser utilizado. O motor EA 111 da empresa Volkswagen foi o escolhido a partir de que o projeto da transmissão deste trabalho é para um veículo Gol de motorização um litro. Como característica este motor tem fácil manutenção, elevado torque em baixas rotações.

Retiramos então as curvas de potência e torque do motor selecionado e a partir delas podemos caracterizar a transmissão manual para o veículo. Na Figura 18 é possível observar a curva de potência do motor

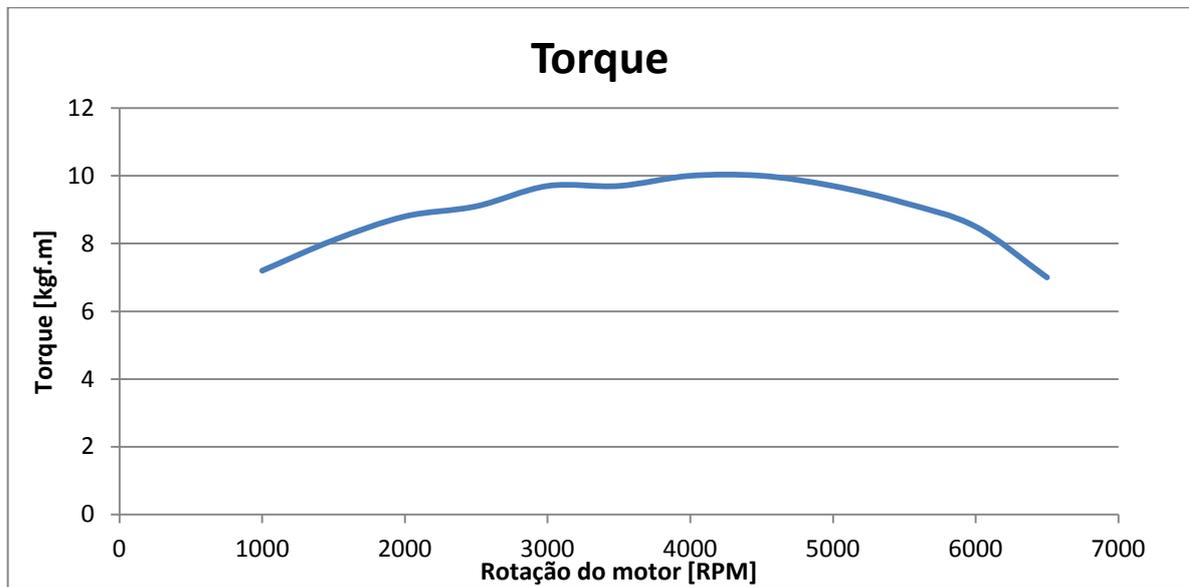
Figura 18 – Curva de potência pela rotação do motor.



Fonte: Autor.

Nesta curva a potência é dada em cavalos a vapor e a rotação em rotações por minuto (RPM). Podemos verificar que a potência máxima encontra-se perto da rotação de 5500 RPM, este fator será importante para o cálculo da curva de dente de serra que mostra em qual rotação será efetuada a troca de marcha. Já na Figura 19, pode-se observar a curva de torque do motor

Figura 19 – Curva de torque pela rotação do motor.



Fonte: Autor.

A partir da curva de torque retira-se o valor ideal de rotação para a troca de marcha de 4000 até 5000 RPM, novamente uma informação crucial para a curva de dente de serra. O torque é apresentado em kgfm.

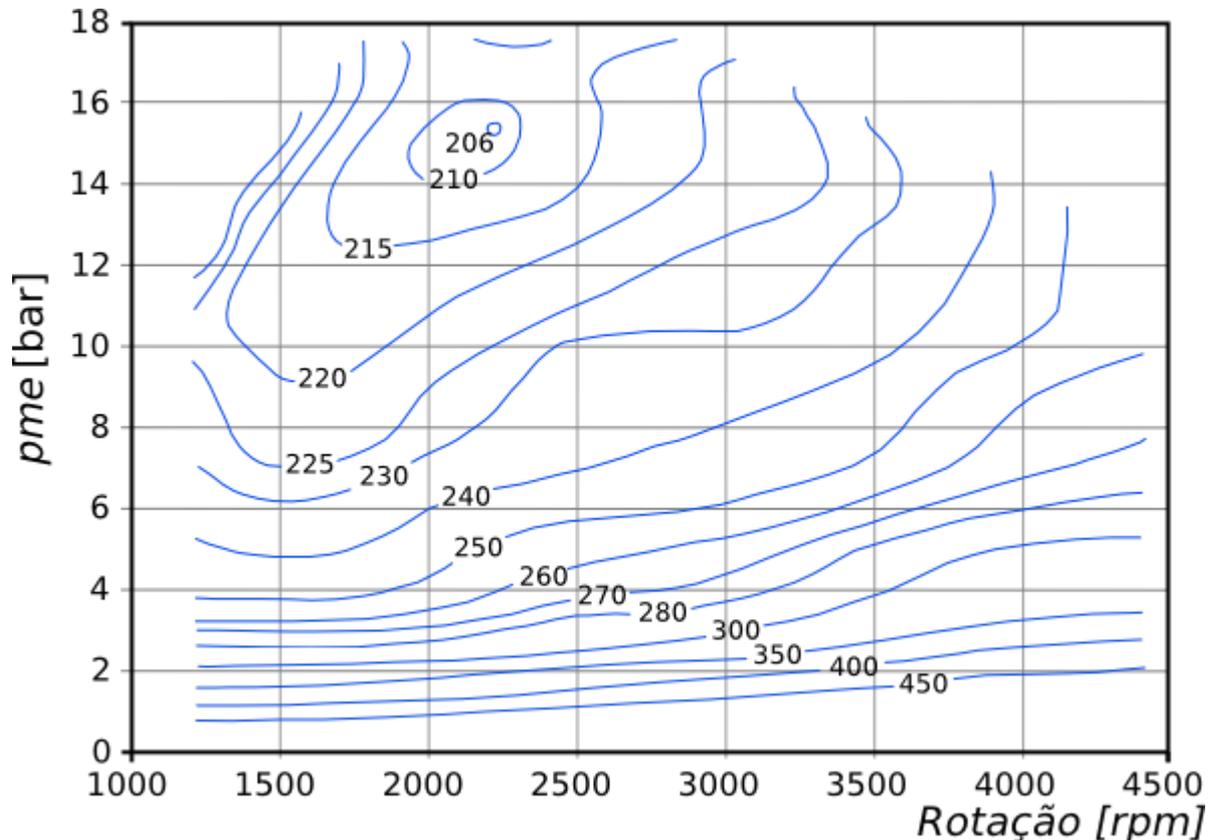
O torque máximo do motor tende a ser alcançado em rotações mais baixas por causa da eficiência volumétrica (a porcentagem de mistura ar-combustível que o motor consegue aspirar a cada ciclo), que é o momento onde há o melhor aproveitamento da explosão. Depois disso, a capacidade de fazer força começa a cair devido ao aproveitamento de energia dentro do cilindro.

O ultimo fator importante que devemos retirar do motor é a curva de consumo específico do motor, ela apresenta a faixa de rotação em que o motor consome menos combustível sendo esta a faixa ideal de trabalho para o câmbio desenvolvido.

Como a informação de consumo específico do motor é algo um pouco sigiloso, foi escolhida uma curva genérica para motores de pequeno porte, assim como o motor 1,0 apresentado neste estudo. Na Figura 20, é apresentada uma curva padrão para veículos a combustão interna com características do ciclo Otto. Esta curva apresenta faixas de valores para o consumo de combustível específico em termos de g/kWh, ou seja, quantidade de massa de combustível gasta pela energia.

Lembrando que a curva de consumo encontrada não é específica para o motor EA 111 da Volkswagen, mas sim uma curva genérica para motores de combustão interna de ciclo Otto.

Figura 20 – Curva de consumo específico do motor.



Fonte: André Dantas (2011).

Verificamos na Figura 20 que a faixa ótima para o menor uso de combustível é entre 1500 e 3000 RPM.

Na Figura 20, vemos o índice *p<sub>mep</sub>* que significa pressão média efetiva. Este índice é a pressão média que ocorre durante uma combustão de um cilindro do motor.

A partir destas informações podemos encontrar dois diferentes gráficos de dente de serra. O primeiro sendo relacionado com o melhor ganho de velocidade e o segundo relacionado com o menor consumo de combustível. Como trabalharemos com uma opção de transmissão, a qual faz a troca de marcha eletronicamente sem a ação do condutor, a curva que melhor representará a faixa de troca de marcha do câmbio CVT será a de menor consumo.

Após a definição dos parâmetros do motor, determinamos as relações de transmissão do câmbio manual e do câmbio CVT, as quais se encontram da Tabela 2.

Tabela 2 – Relações de marcha.

Marcha/Câmbio	Câmbio Manual	Câmbio CVT
1ª marcha	4.167	4.167
2ª marcha	2.300	-
3ª marcha	1.433	-
4ª marcha	0.975	-
5ª marcha	0.776	0.600
Diferencial	4.929	4.929

Fonte: Autor

A partir das relações de transmissão de cada marcha retiradas do câmbio manual do mesmo veículo Gol 1,0 pode-se calcular a velocidade do veículo em cada marcha por rotação. Foi utilizado o fator de 0,600 para a última relação de transmissão do câmbio CVT pela razão de que em 3000 RPM, a qual seria a rotação econômica do CVT, o veículo se deslocará com velocidade superior a 100 km/h.

Para este cálculo é utilizada a equação 1:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot R_{din}}{60 \cdot I_t \cdot I_{dif}} \quad (1)$$

Onde:

$v$  = Velocidade de atuação de cada marcha;

$N$  = Rotação do motor [Rpm];

$R_{din}$  = Raio dinâmico do pneu;

$I_t$  = Relação de transmissão;

$I_{dif}$  = Relação do diferencial.

O valor do raio dinâmico do pneu é retirado do próprio pneu do veículo. Este valor é de 0,2768 metros.

Desta fórmula calculamos então as velocidades expressas na Tabela 3.

Tabela 3 – Velocidades, em km/h, do veículo em cada marcha.

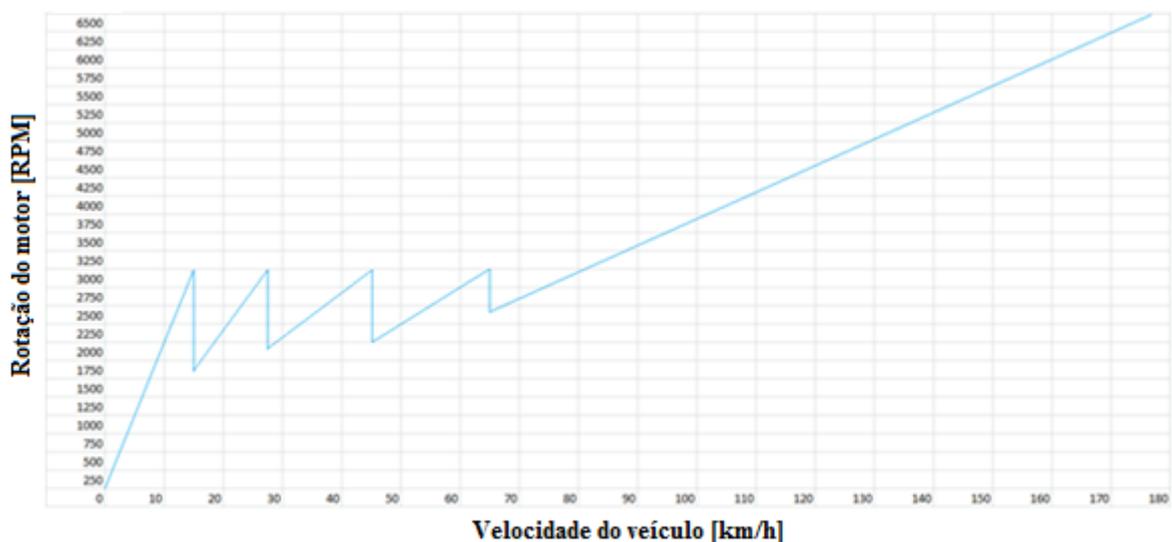
RPM	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
1000	5,08	9,20	14,77	21,71	27,28
1500	7,62	13,81	22,16	32,57	40,92
2000	10,16	18,41	29,55	43,43	54,57
2500	12,70	23,01	36,94	54,29	68,21
3000	15,24	27,61	44,32	65,14	81,85
3500	17,78	32,22	51,71	76,00	95,49
4000	20,32	36,82	59,10	86,86	109,13
4500	22,86	41,42	66,48	97,71	122,77
5000	25,40	46,02	73,87	108,57	136,41
5500	27,94	50,63	81,26	119,43	150,05
6000	30,48	55,23	88,64	130,29	163,70
6500	33,02	59,83	96,03	141,14	177,34

Fonte: Autor.

Com estes valores de velocidade podemos montar as curvas de dente de serra para o menor consumo e para a maior aceleração.

Como já explicado anteriormente a curva de dente de serra expressa a rotação do motor em qual a troca de marcha será efetuada. Seguindo os valores encontrados para o melhor torque e melhor consumo de combustível, é possível representar a ação de troca de marcha seguindo as Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Curva dente de serra seguindo o menor consumo de combustível.

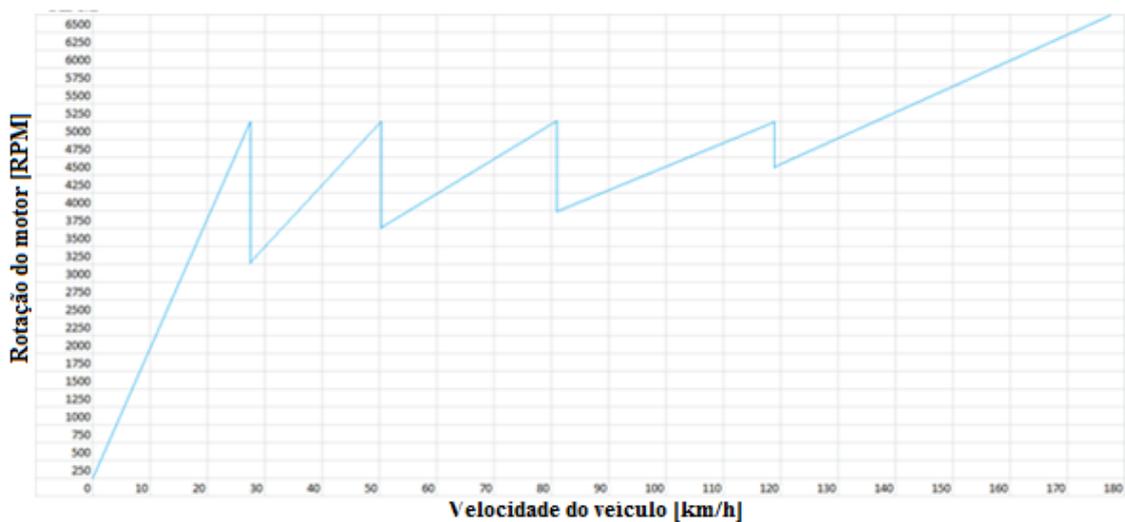


Fonte: Autor

Na Figura 21 é possível ver que as trocas de marcha serão efetuadas em 3000 RPM rotação a qual foi designada segundo a curva de consumo específico.

Na próxima curva de dente de serra focaremos em desempenho. Como a zona de melhor torque e de potência vai até uma rotação de 5000 até 5500 RPM, foi determinado que a rotação de troca fosse feita em 5000 RPM priorizando o torque do motor nesta rotação, como observado na Figura 22.

Figura 22 – Curva dente de serra para melhor torque.



Fonte: Autor.

O próximo passo é determinar a força trativa do veículo segundo as relações de marcha do câmbio manual. Este cálculo é feito a partir da equação 2:

$$F_t = \frac{T \cdot I_t \cdot I_{dif} \cdot \eta_t}{R_{din}} \quad (2)$$

Onde:

$F_t$  = Força de tração;

$T$  = Torque do motor;

$I_t$  = Relação de transmissão;

$I_{dif}$  = Relação do diferencial;

$R_{din}$  = Raio dinâmico do pneu;

$\eta_t$  = Rendimento mecânico.

O rendimento do câmbio é retirado da Tabela 4, que segundo Melconian (2009) fica em torno de 0.96 para engrenagens usinadas, pois o processo de obtenção das engrenagens de transmissões automotivas é usualmente feito por usinagem, segundo informações obtidas diretamente com os fornecedores de engrenagens.

Tabela 4 – Rendimento em função do tipo de transmissão.

<b>Tipo</b>	<b><math>\eta</math></b>
Correias planas	0,96-0,97
Correias em V	0,97-0,98
Correntes silenciosas	0,97-0,99
Correntes Renold	0,95-0,97
Rodas de atrito	0,95-0,98
Engrenagens fundidas	0,92-0,93
Engrenagens usinadas	0,96-0,98
Rosca sem fim 1 entrada	0,45-0,60
Rosca sem fim 2 entrada	0,70-0,80
Rosca sem fim 3 entrada	0,85-0,80
Mancais – Rolamento	0,98-0,99
Mancais - Deslizamento	0,96-0,98

Fonte: Melconian (2009).

Utilizando a fórmula chegamos à Figura 23 que descreve a força trativa pela velocidade. Junto a este introduzimos o gráfico de potência constante calculado pela equação 3:

$$F = \frac{P}{v} * n \quad (3)$$

Onde,

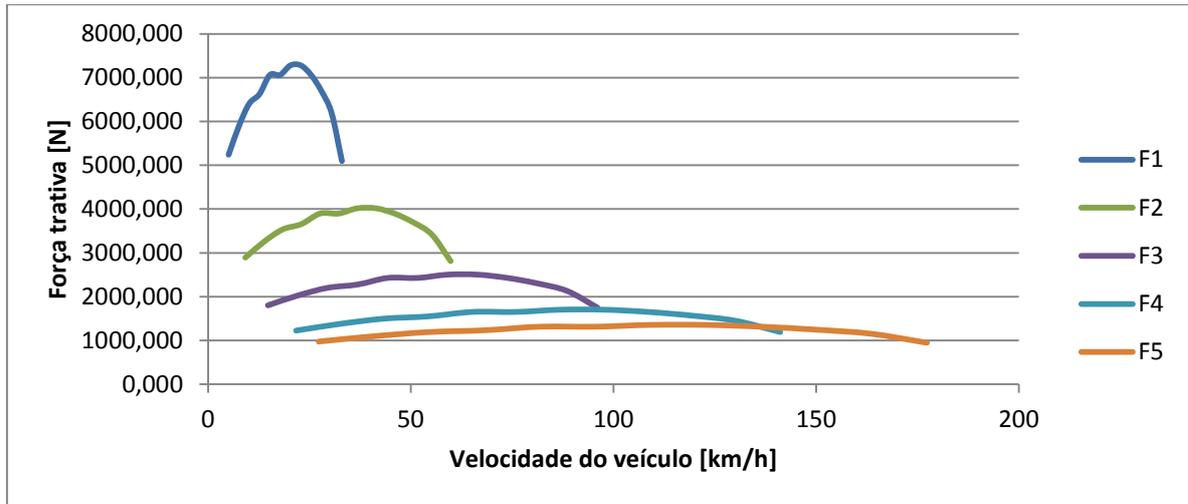
F = força trativa;

P = potência do motor;

n = Rendimento;

v = Velocidade.

Figura 23 – Força trativa pela velocidade.



Fonte: Autor.

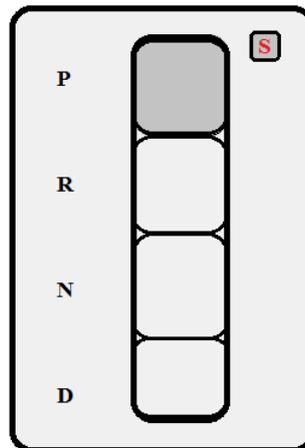
Na Figura 23 verificamos que as funções  $F_i$  representam a força trativa para cada marcha onde  $i$  é o coeficiente da marcha. Nesta curva é possível observar que há de fato um espaço entre as transições de marcha, deixado pelo desacoplamento do eixo do motor com o eixo da transmissão durante o processo de troca de marcha.

### 3.2 Descrição do Sistema de Transmissão

O sistema funcionará selecionando-se as marchas por meio da lógica automática de engrenamento do sistema, sem auxílio externo do condutor. O mesmo encontrará sempre em 3000 RPM, relação a qual foi encontrada para que obtivéssemos o melhor consumo de combustível.

Existirá ainda, um modo de trocas esportivas, selecionada através de um botão. Este modo trocará de marcha na rotação de maior torque (4500 RPM) encontrada a partir da curva de torque do motor no item 4. O modelo de câmbio encontra-se na Figura 24.

Figura 24 – Modelo de manopla de câmbio.



Fonte: Autor.

Ainda, será considerado que o veículo possuirá uma relação final  $i = 0,6$  para que o veículo esteja na velocidade final máxima de 105 km/h na rotação de 3000 RPM. Esta informação encontra-se na Tabela 1. O diferencial será o mesmo usado no veículo de câmbio manual.

Para tanto recalculamos as curvas de força trativa do motor levando em conta que o rendimento mudará de 0,96 do câmbio manual para 0,97 para correias em V para o novo sistema de câmbio CVT, segundo a Tabela 3.

Quando for selecionada a opção de troca automática (posição “D”), e o botão de troca esportiva não for acionado o sistema sempre buscará o menor consumo de combustível o qual representa o funcionamento em 3000 RPM.

Após o início do movimento a transmissão estará com relação fixa ( $i = 4,167$ ) até o ponto de melhor consumo em 3000 RPM com velocidade  $V_1$ . A partir desta rotação, a relação irá automaticamente mudando caso seja necessário o aumento da velocidade até a velocidade  $V_5$  de 105 km/h. As velocidades são determinadas pela equação 4.

$$V_i = 2\pi \cdot W_{motor} \cdot r \cdot \frac{3,6}{60 \cdot i_{dif} \cdot i_i} \quad (4)$$

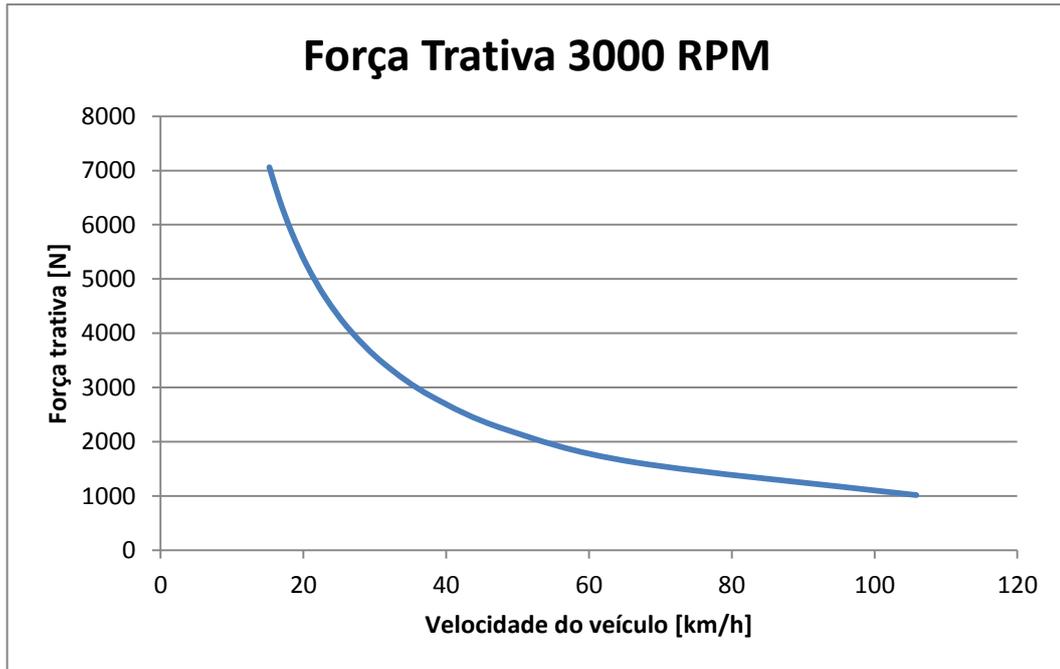
Assim obtemos as velocidade, sendo  $V_1 = 15,24$  km/h e  $V_5 = 105,86$  km/h, sendo que o raio dinâmico ( $r$ ) continua sendo 0,2768 m.

A partir destas informações obtemos a Figura 25, a qual representa a curva de forças trativas do motor. Utilizando a equação 5.

$$F = T * i_{dif} * \frac{i_i}{r} \quad (5)$$

Onde o valor de torque (T) é fixo para a rotação desejada.

Figura 25 – Força Trativa em 3000 RPM.



Fonte: Autor.

Pode-se perceber olhando para a curva de força trativa do câmbio CVT, comparada a curva trativa do câmbio manual (Figura 5) que o a curva para o câmbio CVT não possui picos de força e nem variações, pois mantém sempre a mesma rotação do motor portanto o mesmo torque.

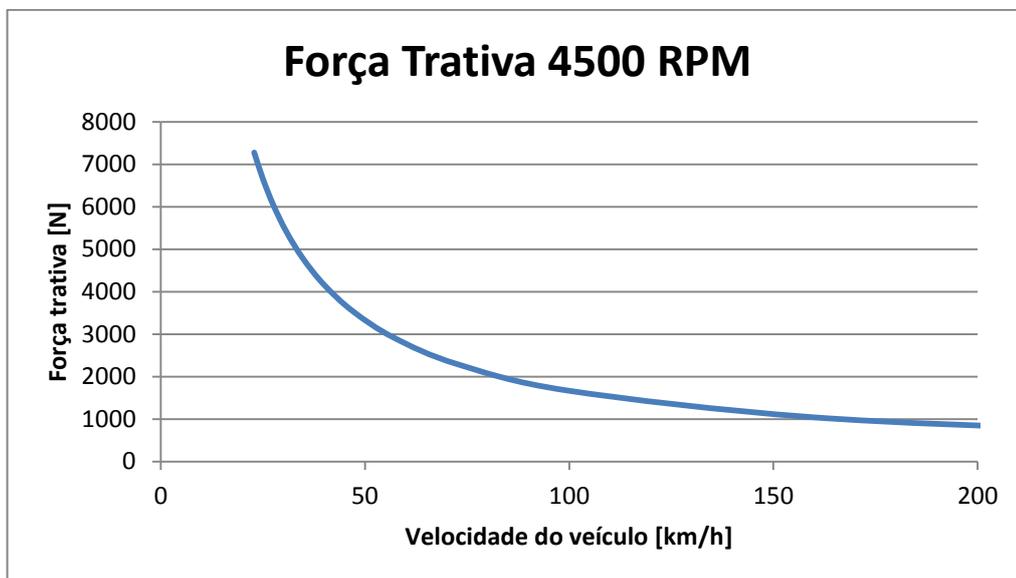
A informação de torque constante é o principal fator para a escolha do câmbio CVT para os veículos, fazendo com que o motor trabalhe quase que de forma estacionária, priorizando assim o consumo e a longevidade do mesmo.

Quando acionamos o botão de trocas esportivas mudamos a rotação de troca de marcha para 4500 RPM, assim temos que recalculas as velocidades e forças trativas, apropriando-se das mesmas equações usadas acima. Portanto obtemos o valor de  $V_1 = 22,86$  km/h e  $V_5 = 158,88$  km/h.

Pode-se perceber que as forças trativas são levemente maiores, pois o torque é maior para esta rotação, priorizando a potência do veículo.

Também a velocidade máxima vai para acima dos 200 km/h. Este valor é passado para a Figura 26, pois é a velocidade máxima do veículo para uma relação de engrenamento  $i = 0,600$  na rotação máxima do motor de 6500 RPM, levando em consideração que uma vez que o condutor selecionar o modo esportivo sua atuação será de acelerar o veículo ao máximo. Este valor de velocidade não será alcançado, pois as resistências ao movimento continuaram sendo as mesmas. Segundo estimativa feita, o mesmo não ultrapassará os 177 km/h.

Figura 26 – Força Trativa em 4500 RPM.



Fonte: Autor.

É possível observar neste gráfico de força de tração que existe uma suavidade em relação à continuidade de relação de transmissão de forças pelo câmbio CVT. Esta característica é fundamental para o baixo consumo de combustível, segundo Pellizzari (2002).

### 3.3. Dimensionamento das Polias e Correia

O propósito da síntese do CVT é projetar de acordo com raios nominais extremos (máximos e mínimos) das polias inicialmente propostos pelo usuário tendo-se as relações de transmissão para suas necessidades e sabendo-se assim ser viável ou não para uma dada distância entre centros dos discos. A síntese calcula o comprimento da correia e escolhe um comprimento padrão que se adeque aos raios nominais das polias inicialmente fornecidos e

que são recalculados e ajustados para este comprimento padrão de correia. Com os raios nominais ajustados para esta correia padrão têm-se suas posições em relação aos raios dos discos das polias e o quanto que elas abrem e fecham, e assim a correia atuará transmitindo potência de acordo com a rotação, o torque do motor e torque resistivo, tendo-se assim a relação de transmissão do CVT.

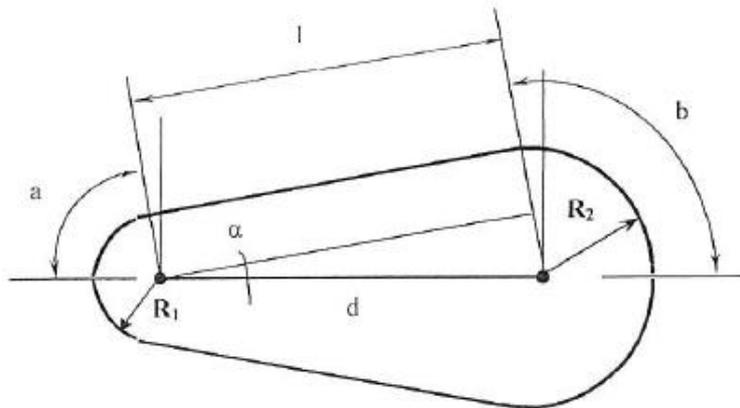
Para uma transmissão por correia, com uma determinada relação de engrenamento, pode-se determinar o comprimento total da correia em função dos raios dinâmicos das polias e do entre eixos.

O comprimento total da correia segue a equação 5:

$$L = 2 * (a + l + b) \quad (5)$$

Onde os coeficientes podem ser vistos na Figura 27.

Figura 27 – Transmissão por correia com polias.



Fonte: Pellizzari (2002)

Utilizando-se de razões trigonométricas para determinar o comprimento \$L\$ da correia, chega-se na equação 6.

$$L = 2 * [R_2 * \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + \sqrt{(d^2 + (R_1 + R_2)^2} + R_1 * \left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)] \quad (6)$$

No caso da transmissão CVT, os raios são variáveis de acordo com a lógica do controle do mesmo. Usando valores conhecidos de entre eixos (\$d = 170\$ mm) e descrevendo um raio inicial de \$92,39\$ mm, pode-se, a partir da relação de engrenamento inicial (\$i = 4,17\$), descobrir o segundo raio e destes valores calcular o comprimento da correia. Pela equação 7:

$$i = \frac{R_1}{R_2} \quad (7)$$

Portanto, o valor de  $R_2$  torna-se 22,17 mm. Com a equação do comprimento da correia foi encontrado os seguintes valores expressos na Tabela 5:

Tabela 5 – Valores de comprimento da correia.

Relação	i Polia	R <sub>1</sub> Polia Motora	R <sub>2</sub> Polia Movidada	Correia
1 <sup>a</sup> marcha	4,17	92,39 mm	22,17 mm	769,92 mm

Fonte: Autor.

Este comprimento de correia condiz com o mesmo calculado pela tese de Pellizzari (2002).

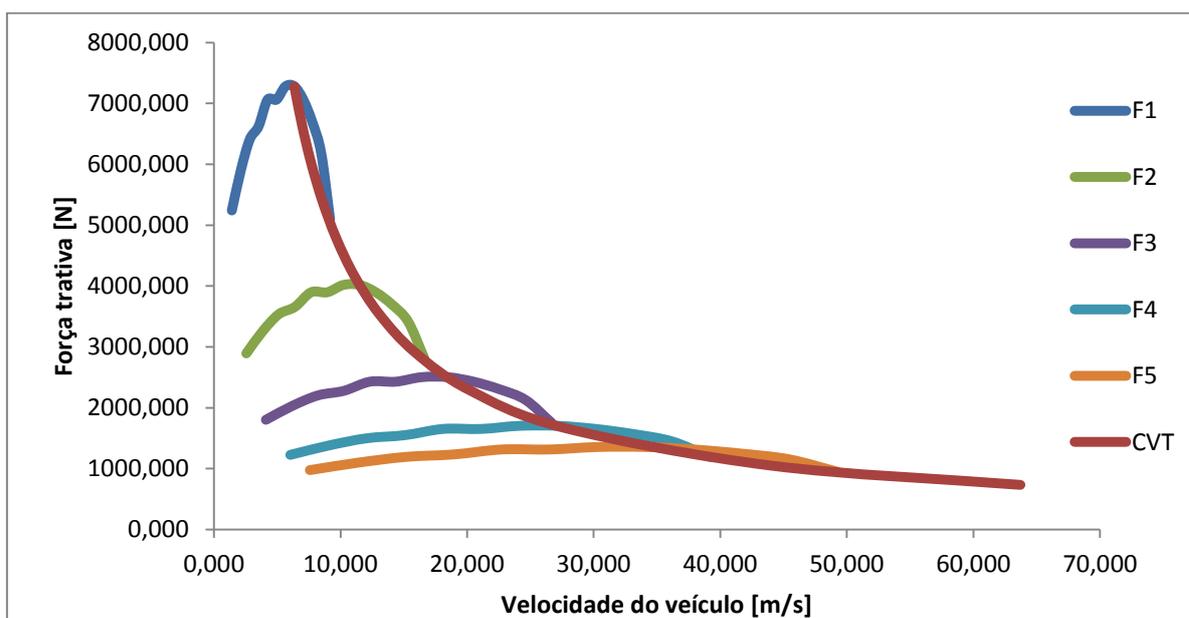
No próximo capítulo é possível observar a comparação entre os sistemas de transmissão manual e CVT calculados. Esta comparação é em relação às dimensões e gráficos de força de tração. Após uma análise de custos retirada da tese de Pellizzari (2002) em relação ao projeto e implementação do novo produto proposto.

#### 4. ANÁLISE DE RESULTADOS E CUSTOS

A partir dos resultados obtidos é possível uma verificação do estudo apresentado. Obtiveram-se diversas curvas de força trativa, sendo que para o câmbio manual a curva apresenta espaços entre as trocas de marcha, mas para o a transmissão CVT a mesma apresenta uma função suave que segundo Pellizzari (2002) é melhor caracterizada como uma função hiperbólica.

Como o estudo de mercado apresentado demanda cada vez mais itens de conforto em veículos do segmento popular, este estudo apresentou uma alternativa de transmissão continuamente variável que representa, segundo as ilustrações referentes à força trativa, conforto para o motorista, pois o condutor não sente as trocas de marcha, que ainda, são feita pela central de comando do veículo permitindo ao mesmo trocar de marcha sem auxílio externo. Esta relação suave comparada com a relação de trocas de marcha do câmbio manual é observada na Figura 28. Neste gráfico é comparada a força de tração do veículo com câmbio manual com o mesmo veículo com câmbio CVT para a configuração de maior desempenho (4500 RPM).

Figura 28 – Comparação de forças de tração do câmbio manual e CVT.



Fonte: Autor.

Com base na Figura 28 é possível observar a comparação entre os dois tipos de transmissão apresentados, sendo a CVT mais suave e confortável do ponto de vista de trocas de marcha.

Segundo informação obtida junto a Volkswagen Brasil, o tamanho da caixa de câmbio manual do veículo Gol 1.0 mede aproximadamente 50 centímetros de comprimento e a engrenagem da primeira marcha possui 20 centímetros de diâmetro. Os dados de dimensionamento da caixa foram pedidos junto à própria empresa e validados por medição no veículo real.

Verificando com os cálculos feitos sobre o dimensionamento da correia e das polias foi possível obter os resultados de 19 centímetros de diâmetro da polia e comprimento de aproximadamente 30 centímetros do conjunto polias mais correia. Pode-se observar na Tabela 5 os valores dimensionais básicos da comparação entre o câmbio CVT e o câmbio manual.

Tabela 5 – Comparação dimensional das transmissões

Tipo de transmissão	CVT	Manual
Comprimento do sistema	300 mm	500 mm
Diâmetro da engrenagem/polia	190 mm	200 mm

Fonte: Autor.

Lembrando que os valores são aproximados, porém muito próximos da realidade.

Com base nestes dados é possível dizer que o câmbio CVT se torna mais compacto do que seu equivalente manual, deixando evidente a superioridade dimensional do mesmo.

#### 4.1 Estimativa de preço final do veículo

Segundo Pellizzari (2002), o produto a ser substituído (transmissão manual) tem custo de produção de R\$ 810,00. Já o câmbio CVT representa um valor de 40% a mais totalizando R\$ 2310,00.

Dados retirados do website da marca Volkswagen apresentam o valor de R\$ 30930,00 para o veículo Gol 1,0 litros com caixa de câmbio manual. Estimando que o valor da transmissão CVT seja 40% mais cara que a transmissão manual, o valor final do veículo seria R\$ 32430,00. Este custo não contempla os custos de projeto vistos no capítulo 2. Para uma amortização a longa data do projeto o valor de R\$ 5.000,00 a mais no preço original do

veículo seria suficiente e não estaria fora do mercado nacional de veículos que apresentam a configuração de câmbio de trocas automáticas no mercado brasileiro.

## 5. CONCLUSÃO

O projeto da transmissão CVT realizado levou em conta as necessidades do mercado consumidor para veículos de pequena motorização (1,0 litro). As necessidades têm como principal fator de ponderação o valor de compra do veículo, porém houve um aumento significativo para que além do preço ser um fator importante, a quantidade de opcionais também surge como característica principal.

Foi apresentada uma solução para estas necessidades com uma modalidade de transmissão automática pouco utilizada em veículos no país, geralmente empregada em automóveis de segmentos maiores do que os populares. Esta transmissão tem operação similar às automáticas, todavia com construção e controle menos complexas.

Os objetivos do trabalho foram cumpridos, uma vez que, houve o estudo da aplicação do câmbio CVT em um veículo de pequeno porte e comprovada a viabilidade desta configuração de transmissão.

Primeiramente foi feita uma revisão das principais transmissões utilizadas no mercado automotivo, posteriormente, um estudo das configurações, manual e CVT, e por fim foram analisados os resultados de viabilidade econômica, dimensional e comprovado que o câmbio CVT possui uma curva de força trativa suave, sem trancos.

O foco do trabalho foi apresentar um procedimento comparativo de viabilidade da transmissão do tipo CVT, desde um do câmbio manual respectivo até a implementação do projeto CVT. Outro objetivo foi a apresentação de uma revisão bibliográfica do conteúdo de transmissões, apresentando as mais utilizadas em automóveis atualmente.

As ferramentas de dimensionamento utilizadas permitiram o projeto do conjunto de transmissão, atendendo as características de utilização e segurança, sempre levando em conta os casos críticos de uso como rotações e torque.

O estudo apresentado teve como objetivo apresentar e projetar este novo produto a fim de demonstrar a efetividade do mesmo para que o mercado consumidor seja melhor atendido no segmento popular de veículos de rua. Os próximos passos a serem desenvolvidos são:

- Verificação do modelamento matemático e certificação do modelo apresentado;
- Determinação do sistema de controle e dos parâmetros de controle;

- Construção dos desenhos técnicos do produto
- Construção do protótipo;
- Empregar o projeto em um veículo real.

## REFERÊNCIAS

- AMBROSINI, Silvio. **CVT, UM CÂMBIO FOTOGÊNICO**. 2010. Disponível em: <<http://gaspoint.blogspot.com.br/2010/04/cvt-um-cambio-fotogenico.html>>. Acesso em: 16 maio 2015.
- AUDI (Alemanha). **MULTITRONIC**. Disponível em: <<http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/layer/technologien/multitronic.html>>. Acesso em: 16 jul. 2015.
- BRAIN, M. **COMO FUNCIONAM AS TRANSMISSÕES MANUAIS**. In: how stuff works: como tudo funciona. Disponível em: <<http://carros.hsw.uol.com.br/transmissoes-manuais.htm>>. Acesso em: 07 nov 2014.
- BULLETIN (Org.). **CONTINUASLY VARIABLE TRANSMISSION**. 2014. Disponível em: <<http://boards.straightdope.com/sdmb/archive/index.php/t-713076.html>>. Acesso em: 16 jul. 2015.
- BUSSINESS, Automotive. **MERCEDES-BENZ LANÇA CÂMBIO AUTOMÁTICO DE 9 VELOCIDADES**: Tecnologia equipará motor E 350 BlueTEC e chega ao mercado em setembro.. 2013. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/10648-mercedes-benz-lanca-cambio-automatico-de-9-velocidades](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/10648-mercedes-benz-lanca-cambio-automatico-de-9-velocidades)>. Acesso em: 01 jun. 2015.
- COSTA, Paulo G.. **DIFERENCIAL**. 2002. Disponível em: <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=97>>. Acesso em: 15 maio 2015.
- DANTAS, Andre. **PRESSÃO MÉDIA EFETIVA: ECONOMIA, POTÊNCIA E ALGUMAS COISINHAS A MAIS**. 2011. Disponível em: <<http://autoentusiastas.com.br/2011/08/pressao-media-efetiva-economia-potencia-e-algumas-coisinhas-a-mais/>>. Acesso em: 01 jun. 2015.
- HARRIS, William. **COMO FUNCIONAM AS CVTS**. 2005. Disponível em: <<http://carros.hsw.uol.com.br/cvt.htm>>. Acesso em: 20 mar. 2015.
- HEISLER, H. **HYDROKINETIC FLUID COUPLINGS AND TORQUE CONVETERS**. In: HEISLER, H. Advanced vehicle technology. 2.ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002. p. 98-116.
- MECCIA, Carlos. **CARROLL SHELBY, A APOLOGIA DO TORQUE**. 2014. Disponível em: <<http://autoentusiastas.com.br/2014/09/carroll-shelby-a-apologia-do-torque/>>. Acesso em: 02 maio 2015.

- JATCO. **NEW RELEASE JATCO** 2011. Disponível em: <<https://www.jatco.co.jp/ENGLISH/NEWS/2011/111122E.html>>. Acesso em: 16 jul. 2015.
- JOST, K. **THE NEED FOR SPEEDS**. Revista AEI, Julho 2004. p. 24 – 36.
- MELCONIAN, S. **ELEMENTOS DE MÁQUINAS**. 9. ed. São Paulo: Erica, 2009.
- NAUNHEIMER, H., BERTSCHE, B., RYBORZ, J., NOVAK, W. **AUTOMOTIVE TRANSMISSIONS, FUNDAMENTALS, SELECTION, DESIGN AND APPLICATION**. Springer. Friedrichshafen. Germany, 2011.
- NORTON, R. L. **PROJETO DE MÁQUINAS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA**. Porto Alegre: Editora Artmed, 2004.
- NICE, K. **HOW AUTOMATIC TRANSMISSIONS WORK**. Disponível em: <<http://auto.howstuffworks.com/automatic-transmission.htm>>. Acesso em 20 jan. 2015.
- NICE, K. **COMO FUNCIONAM OS CONVERSORES DE TORQUE**. In: how stuff works: como tudo funciona. Disponível em: <<http://carros.hsw.uol.com.br/conversores-de-torque2.htm>>. Acesso em: 11 nov 2014.
- PAULO, Sergio. **NOVO HONDA FIT 2015: FOTOS, DESEMPENHO E TABELA DE PREÇOS**. 2015. Disponível em: <<http://www.car.blog.br/2014/04/novo-honda-fit-2015-fotos-desempenho-e.html>>. Acesso em: 04 maio 2015.
- PELLIZZARI JUNIOR, W S. **PROJETO BÁSICO DE UMA TRANSMISSÃO AUTOMÁTICA COM RELAÇÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL PARA AUTOMÓVEL DE PEQUENO PORTE**. 2002. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Automotiva, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.