

# SISTEMA DE PROPULSÃO HÍBRIDO COM CVT

**Felipe Guth**

guthfe@gmail.com

**Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni**

salvagni@usp.br

**Resumo.** O presente trabalho apresenta o estudo de um novo dispositivo para a propulsão de veículos híbridos. O dispositivo em questão tem como finalidade substituir a caixa de câmbio CVT dos carros atuais, além disso, o mesmo dispositivo será responsável pela união do motor elétrico ao motor a combustão e pela saída de potência para as rodas. A partir de um modelo equacionou-se a dinâmica do dispositivo, desta forma, pode-se identificar todos os parâmetros que influenciam a dinâmica do mesmo. Com o auxílio da ferramenta computacional MATLAB simulou-se o funcionamento do dispositivo, a fim de se determinar os parâmetros do dispositivo em um primeiro estágio e após estas definições, simulou-se o funcionamento deste em um veículo equipado com um motor a combustão 1.0 e outro elétrico. Com estas análises pode-se demonstrar a efetividade do dispositivo nos objetivos propostos para o mesmo.

**Palavras chave:** Veículo híbrido, CVT.

## 1. Introdução

Carros híbridos são uma nova tendência mundial, pois se utilizam de motores elétricos e motores à combustão para sua propulsão, dessa forma, são mais econômicos e menos poluentes. Os carros também estão utilizando câmbios CVT (continuously variable transmission), pois além de proporcionar uma aceleração contínua, sendo esta mais eficiente, proporcionam uma economia de combustível, pois otimiza a relação de marchas, dado que a sua forma construtiva cria uma relação infinita de marchas. Este conceito foi idealizado por Leonardo Da Vinci em 1490, assim, o desenvolvimento de novas tecnologias para tornar os carros híbridos mais eficientes, além de simplificar os projetos ajuda no avanço dessa nova geração de carros.

## 2. Objetivo

O presente trabalho visa estudar a possibilidade de se acoplar um motor elétrico a um motor à combustão para movimentar um carro, através de um sistema que utilize os princípios de um diferencial e ou um somador de torque baseado em engrenagens planetárias. Além do acoplamento o sistema baseado no diferencial teria por objetivo gerar um sistema de marcha, seguindo os princípios usados em câmbios automáticos CVT, ou seja, através da soma dos torques dos motores se obteria a relação de marchas e não seria necessário um câmbio para se obter a relação de marchas.

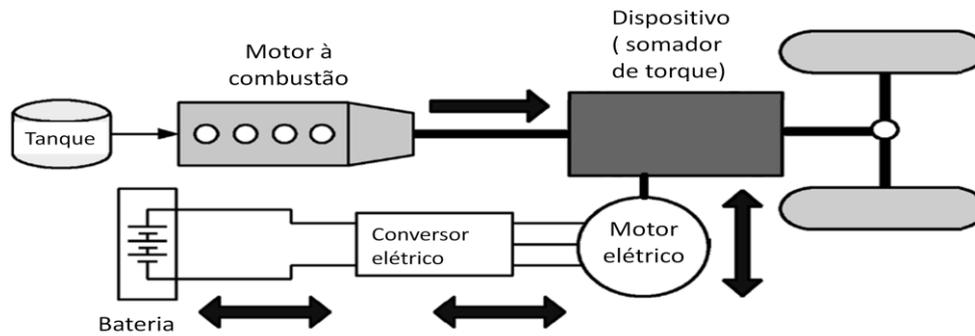
Este dispositivo seria instalado em um veículo urbano híbrido, logo seria um projeto visando um peso baixo e minimização do custo, além de não requerer uma grande potência dado que este tipo de veículo não ultrapassa cerca de 100Km/h.

## 3. Princípio do diferencial aplicado ao problema

O diferencial é uma peça usualmente utilizada quando se pretende movimentar dois eixos que em determinados instantes precisam ter rotações diferentes e nos outros mantenham a mesma rotação. No caso dos carros, este permite que duas rodas acopladas ao mesmo eixo tenham rotações diferentes, e assim, possibilita o carro fazer curvas, pois cada roda percorre uma distância diferente numa curva, e por consequência têm velocidades diferentes e por terem o mesmo tamanho têm rotações diferentes.

No caso de um carro fazendo curva existe o problema da perda de aderência da roda interna, caso o carro esteja em alta velocidade, por esta estar acoplada ao diferencial, para de transmitir torque e o motorista acaba perdendo o controle do veículo por falta de tração, por isto desenvolveu-se o LSD (Limited slip differential), esta tem uma interligação entre os eixos que funciona como uma embreagem limitada, ou seja, permite um escorregamento limitado entre os eixos de saída, de forma que as rodas tenham a diferença de rotação necessária para o carro fazer a curva, mas este não perca potência e aderência.

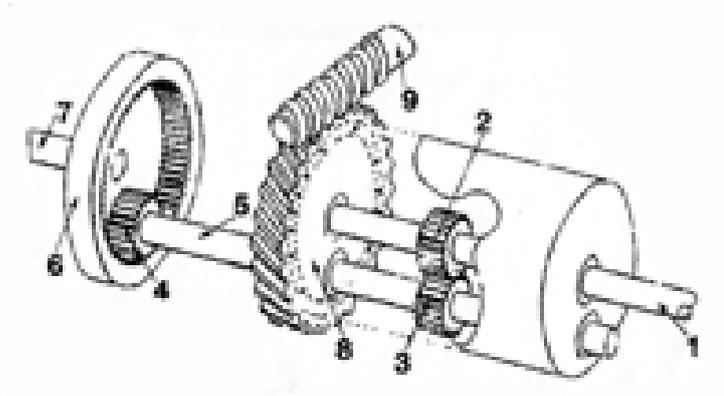
O estudo em questão pretende utilizar o princípio do diferencial de uma forma diferente, ou seja, utilizar 2 de seus eixos como entradas, uma para o motor à combustão e outra para o motor elétrico, e obter a saída através da soma destes torques. Esta idéia está representado na figura 1 abaixo, na qual um ICE (motor à combustão) tem sua potência unida a um motor elétrico através de um sistema de engrenagens que no caso deste trabalho seria um sistema parecido com um diferencial utilizando engrenagens planetárias. Esta arquitetura, no caso de veículos híbridos é conhecida como montagem paralela, pois ambos os motores trabalham juntas, ou até somente um deles pode operar. Como existe infinitas combinações de potência entre os dois motores, teria-se infinitas saídas de potência, dessa forma, este sistema se assemelharia a um CVT dado que se teria várias relações de transmissão de torque. Desta forma, ambos os motores podem ser fontes primárias de potência dependendo da situação.



**Figura 1.** Diagrama de união (*Designing Parallel Hybrid Electric Vehicles*, Z. Rahman, 1999).

#### 4. Propostas de solução para o problema

Em 2005, no Texas, um engenheiro enviou um pedido de patente de um dispositivo que se assemelha ao desejado por este trabalho, o dispositivo através de engrenagens planetárias, uni dois eixos de entrada de potência e tem como saída um único eixo, ou seja, o dispositivo consegue somar as potências de entrada e através das relações de engrenamento internas tem uma velocidade de saída apropriada segundo seu projetista.



**Figura 2.** CVT projeto Texas ( Artigo CVT Texas, 2005).

Na figura 2, pode-se observar a montagem deste dispositivo. Este funciona como um trem de engrenagens planetárias epicíclicas, sua principal vantagem está na construção, pois utiliza elementos básicos de mecânica que tem um baixo custo e pouca complexidade de manutenção.

O funcionamento se dá da seguinte forma: o eixo de entrada do motor a combustão gira a engrenagem 2 solidária a este, por vez esta gira a engrenagem 3 que está acoplada a engrenagem 4 interna a planetária, está em movimentada pelo eixo 5 que passa internamente a engrenagem 8. O anel epicíclico 6, é acionada pela rotação do eixo 5 e este aciona o eixo de saída 7 ligado ao diferencial do carro. A engrenagem 8 é acionada através de uma rosca sem fim ligado a um motor elétrico AC, a engrenagem 8 quando rotacionada move o eixo 5 e, desta forma, faz com que a rotação de saída seja aumentada ou diminuída.

Acoplando-se um motor em marcha lenta de 900 rpm ao eixo 1 e um motor elétrico a ponta de rosca sem fim variando a velocidade de 9 a 600 rpm, pode-se cancelar a rotação na engrenagem 4, colocando a caixa em ponto neutro, segundo o projetista. Reduzindo-se a velocidade contrária da engrenagem 8, consegue-se o jogo de marchas, quanto maior a redução da velocidade neste caso, maior é a velocidade do eixo de saída, isto ocorre continuamente, podendo este sistema ser chamado de um câmbio CVT. Este sistema vai fornecendo a relação de marchas até chegar 1:1, para se obter a marcha ré deve-se aumentar a rotação acima de 600rpm do motor elétrico, desta forma, inverte-se a rotação do sistema.

Existe um sistema de ação similar registrado sobre o número de patente US 5800302 nos Estados Unidos, neste caso o motor elétrico seria acoplado a uma engrenagem de dentes retos e esta estaria acoplada a engrenagem externa, fazendo o controle da velocidade de saída.

Ambos os sistemas apresentados até agora possuem um único motor elétrico, voltado somente à propulsão e não a geração de energia elétrica para o veículo, o próximo dispositivo a ser mostrado é utilizado no veículo Toyota Highlander Hybrid-Electric vehicle 2006-2010, a diferença que este possui 2 motores elétricos, sendo um direcionado a inicialmente partida do motor a combustão e posteriormente a produção de energia elétrica para alimentar o outro motor elétrico, esse tem como objetivo a propulsão do carro. O sistema de união entre os 3 motores, consiste de engrenagens

planetárias, este sistema é conhecido como “Power Split Device” que visa recarregar as baterias e transferir potência para o jogo de engrenagens planetárias do eixo de saída.



**Figura 3.** Maquete de demonstração do PSD

O sistema descrito acima é utilizado pela Toyota e é conhecido como um CVT eletromecânico, pois através de engrenagens planetárias e de uma CPU que mede todas as rotações dos motores e faz o cálculo de potência requerida pelo veículo, controla a interação entre os motores elétricos e o motor a combustão. Este sistema, dependendo da potência dos motores e está associado a um sistema de engrenagem câmbio com quatro marchas fixas, a fim de se ter um melhor aproveitamento da potência gerada.

### 5. Estudo do dispositivo escolhido

O dispositivo do Texas mostrado na figura 2 foi escolhido para ser estudado, pois apresenta características distintas dos outros. Segundo o seu idealizador não seria necessário uma caixa de câmbio extra e nem uma embreagem acoplados a ele, dado que o próprio sistema teria a possibilidade de suprir a necessidade de torque do veículo e poderia anular a rotação do motor à combustão através da manipulação do motor elétrico e dessa forma, seria possível deixar o carro em ponto neutro e ao mesmo tempo gerar energia elétrica para recarregar as baterias do veículo. Esse dispositivo usa princípios da soma de torque e os conceitos de engrenagens planetárias.

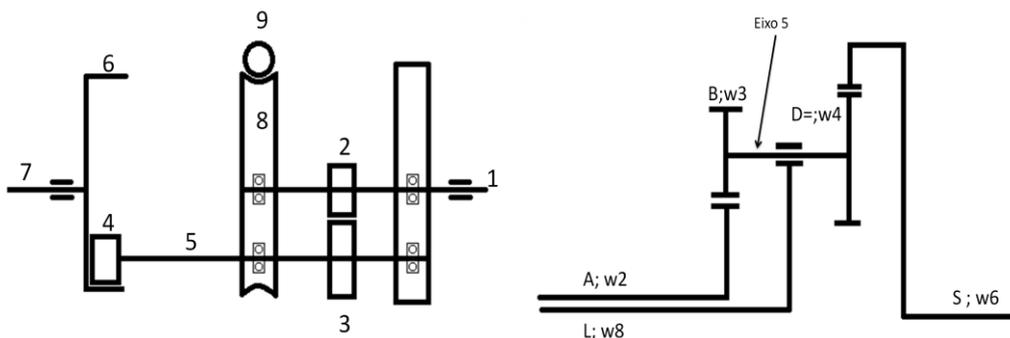
Para o presente estudo adotou-se as seguintes hipóteses iniciais:

- O veículo seria urbano ( não ultrapassaria o limite de 100 Km/h).
- Inicialmente o custo do dispositivo não foi levado em consideração, mas dado que ele utiliza peças já produzidas no mercado, só que num arranjo diferente, isto não impediria a produção de tal item.
- Também desconsiderou-se a inicialmente a possibilidade de anulação da rotação para somente ser observada a viabilidade do dispositivo, assim o carro estudado possui embreagem.

Além disso, deve-se considerar as situações de maior exigência do sistema motor, como aclives com inclinações de até 20%. O peso do veículo por ser urbano e de pequeno porte foi considerado em torno de 1000 kg com distribuição de peso equilibrada entre o eixo dianteiro e traseiro, a fim de facilitar as hipóteses.

#### 5.1 Modelos do dispositivo

A partir da descrição do dispositivo feita anteriormente criou-se o seguinte modelo representativo que visa mostrar de forma mais prática o seu funcionamento:



**Figura 4.** Modelo representativo do dispositivo; Modelo simplificado do dispositivo

A entrada de potência do motor à combustão é feita através do eixo 1, este move a engrenagem 2 que dado o acoplamento move a engrenagem 3 fixa à engrenagem 4 através do eixo 5. A entrada de potência do motor elétrico é feito através do parafuso sem-fim 9 que está engrenado em 8, como visto no desenho o eixo 5 passa através de da engrenagem 8. Logo quando a engrenagem 8 rotaciona sobre o eixo 1 ela faz com o eixo 5 rotacione também só que este esta deslocado, criando assim uma trajetória circular em torno do eixo 1, dessa forma, a engrenagem 8 funciona como um braço de um sistema planetário.

O modelo apresentado acima foi modificado gerando, no qual o eixo S é o eixo de saída para a caixa do diferencial, dado que está acoplado ao anel externo da engrenagem planetária.

O eixo L representa a rotação gerada pela engrenagem 8 que está acoplada ao parafuso sem-fim 9 que é movido pelo motor elétrico, este braço move o eixo 5 em torno do eixo central.

O eixo A está acoplado com o motor a combustão este passa pela redução entre a A e B que representa a redução da engrenagem 2 para a engrenagem 3 do dispositivo, a engrenagem B está acoplada rigidamente a engrenagem D como no dispositivo que a engrenagem 3 pertence ao eixo 5 e aciona a engrenagem 4.

Assim usando o modelo simplificado representado acima e o modelo real equacionou-se o sistema, afim de se saber quais eram os parâmetros que influenciariam a relação entre as duas entradas e a saída.

### 5.1.1 Análise do parafuso sem-fim

A relação desse tipo de dispositivo depende de dois fatores, a quantidade de caminhos do parafuso e o número de dentes da engrenagem associada a ele, assim a relação de transmissão entre o parafuso e a engrenagem é:

$$i_8 = \frac{w_9}{w_8} = \frac{z_8}{z_9} * \frac{1}{\tan\beta} \quad (1)$$

$z_8$  é o número de dentes da engrenagem 8 e  $z_9$  é o número de caminhos do parafuso sem-fim, os  $w$  são as rotações e  $\beta$  é o ângulo de inclinação do dente. O motor elétrico será acoplado diretamente ao parafuso sem-fim, dessa forma, a rotação do parafuso será a rotação do motor elétrico.

### 5.1.2 Análise da entrada de potência do motor à combustão

O eixo 1 está acoplado a princípio diretamente a saída do motor à combustão que está acoplado ao eixo 2, logo

$$w_2 = w_1 = w_{\text{motor à combustão}} \quad (2)$$

A engrenagem 2 faz par com a engrenagem 3, assim:

$$\frac{w_3}{w_2} = \frac{z_2}{z_3} = i_{2,3} \quad (3)$$

$z_2$  número de dentes da engrenagem 2 e  $z_3$  número de dentes da engrenagem 3.

A engrenagem 3 é fixa ao eixo 5 que esta ligado à engrenagem 4, assim esta tem a mesma rotação que engrenagem 4. O modelo apresentado tem a seguinte restrição construtiva,

$$z_2 + z_3 + z_4 = z_6 \quad (4)$$

Para se obter a relação entre as duas entradas e a saída utilizou-se o seguinte método de equacionamento:

- 1) Primeiro deve-se escrever o índice de redução do planetário considerando este fixo.

$$r_f = (\pm) \frac{\text{Número de dentes da engrenagem motora}}{\text{Número de dentes da engrenagem movida}}$$

Quando duas engrenagens externas estão em contato existe uma mudança de sinal, pois a direção de rotação é alterada. Quando o contato é feito entre uma engrenagem externa com uma engrenagem interna (anel) ambos giram no mesmo sentido, logo o sinal é positivo dado que não a mudança de sentido.

- 2) A engrenagem/eixo de entrada é considerada como (x) e a engrenagem/eixo de saída é considerada como (y).

A velocidade relativa entre a engrenagem de entrada e o braço de sustentação do planeta é dada por  $= w_x - w_L$

A velocidade relativa entre a engrenagem de saída e o braço de sustentação do planeta é dada por  $= w_y - w_L$

- 3) Logo a seguinte relação é utilizada para resolver trens de engrenagens planetárias.

$$r_f = \frac{w_y - w_L}{w_x - w_L} \quad (5)$$

Utilizando o modelo representado na figura 4 e o método de equacionamento obteve-se:

$$r_f = \left(-\frac{z_2}{z_3}\right) * \left(\frac{z_4}{z_6}\right) = -\frac{z_2 z_4}{z_3 z_6} \quad (6)$$

Passo 2, a velocidade relativa entre a engrenagem de entrada e o braço de sustentação do planeta é dada por  $= w_6 - w_{braço}$ . A velocidade relativa entre a engrenagem de saída e o braço de sustentação do planeta é dada por  $= w_1 - w_{braço}$ . Passo 3, logo o equacionamento do sistema fica:

$$r_f = \frac{w_6 - w_{braço}}{w_1 - w_{braço}} \quad (7)$$

Assim igualando as duas equações e isolando a saída de  $w_6$  que é a tomada de rotação para as rodas, tem-se:

$$w_6 = -\frac{z_2 z_4}{z_3 z_6} * w_1 + \frac{1}{i_8} * \left[ \frac{z_2 z_4}{z_3 z_6} + 1 \right] * w_9 \quad (8)$$

Assim, pode-se observar como a saída de rotação do dispositivo depende da rotação de entrada do motor à combustão  $w_1$  e da rotação do motor elétrico  $w_9$ .

## 6. Análise preliminar

A saída da caixa de transmissão não esta conectada diretamente às rodas do veículo. O powertrain do veículo é composto pelo motor, caixa de transmissão e um diferencial, neste ocorre mais uma redução de rotação, mas a função principal do diferencial é permitir que o veículo consiga fazer curvas, como foi mostrado na introdução do presente trabalho. O diferencial pode ser instalado na parte traseira do veículo, denominando-se assim, veículo de propulsão traseira, ou pode estar acoplada a caixa de transmissão na parte dianteira do veículo, denominando-se, veículo de propulsão dianteira.

As diferentes configurações influenciam na dinâmica do veículo, pois no veículo de tração traseira, existe um ganho de torque, já no veículo de tração dianteira existe um ganho de dirigibilidade, além desses fatores, existe a questão dos momentos inércias, dado que o veículo de tração traseira precisa de uma árvore de transmissão, além da questão do rendimento mecânico de todo o powertrain. Como o presente trabalho visa o estudo do dispositivo que substituiria a caixa de transmissão, não se levou em grande consideração o posicionamento do diferencial, mas sim o seu índice de redução, pois como será demonstrado a seguir, o valor de redução do diferencial tem uma influência considerável sobre a dinâmica de resposta do veículo.

A rotação de entrada nas rodas considerando o diferencial na linha de powertrain do veículo é dada pela equação:

$$w_{roda} = w_6 * i_{Diferencial} \quad (9)$$

$i_{Diferencial}$ : índice de redução do diferencial

O índice de redução do diferencial varia de carro para carro, pois depende do powertrain e do tipo do veículo, neste trabalho pretende-se trabalhar com veículos de pequeno porte (urbanos), logo para as diversas simulações utilizar-se-á um faixa entre 2,5 e 4,0 de redução.

Unindo a equação de rotação do veículo com diferencial (9) e a equação de funcionamento do dispositivo (8) obteve-se a equação final de rotação da roda do veículo (10), sabe-se que conhecendo o raio da roda do veículo e a rotação da mesma, pode-se calcular a velocidade do veículo através da equação (11) abaixo,

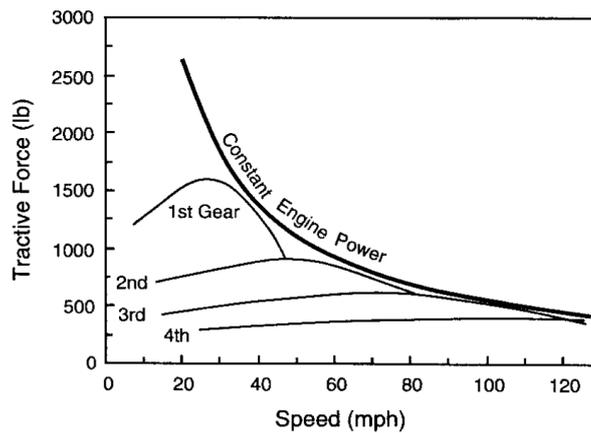
$$\left[ \frac{km}{h} \right]; w_{roda} = i_{Diferencial} * \left\{ -\frac{z_2 z_4}{z_3 z_6} * w_1 + \frac{1}{i_8} * \left[ \frac{z_2 z_4}{z_3 z_6} + 1 \right] * w_9 \right\} \quad (10)$$

$$V = \frac{w_{roda} * \pi * r_{roda}}{30} * 3,6 \quad (11)$$

Dessa forma, utilizando a equação que avalia a rotação que chega às rodas do veículo (11) e a equação da velocidade (12) do mesmo, é possível obter a resposta do veículo para variações nas entradas de rotação, tanto do motor elétrico quanto do motor à combustão.

Outra questão que deve ser considerada é o princípio de funcionamento do câmbio CVT, ou seja, este procura sempre estar na relação ótima de transmissão através da variação contínua da relação de transmissão, assim, busca-se acompanhar a curva de potência máxima disponibilizada pelo motor, ou seja, pretende-se trabalhar sempre no ponto ótimo. Como pode-se observar na figura 5 abaixo retirada de GILLESPIE, a linha de transmissão do veículo foi projetada, a fim deste trabalhar o mais próximo da potência máxima. Como pode ser observado isto não é possível

devido à alguns fatores como índices de redução fixos, inércias rotacionais a serem vencidas e perdas de energia pelo sistema.



**Figura 5.** Curvas de esforço trativo para um veículo manual

No caso do câmbio CVT com a variação contínua do índice de redução consegue-se acompanhar a curva de máxima potência do motor, mas como em todo sistema mecânico existem perdas de energia devido ao rendimento dos componentes mecânicos a curva de esforço trativo por velocidade do veículo está deslocado um pouco abaixo da de máxima potência devido às perdas.

Outro fator limitante é a rotação que tanto o motor à combustão quanto o motor elétrico podem atingir. No caso do motor elétrico procurou-se na literatura e adotou-se a rotação máxima de 9.000 rpm, sendo que este valor é utilizado no veículo Prius da Toyota, mas recomenda-se não ultrapassar a faixa de 7.000 a 7.500 rpm, pois estas rotações são tidas como a máximas para operação, pois acima destes valores o motor começa a sofrer um desgaste excessivo que não é desejado. Logo para as simulações adotou-se o mesmo motor do Prius com as seguintes características: motor AC síncrono de ímã permanente, Max. Tensão de 650V, Max. Pot. 82hp/60kW e máx. torque 207Nm.

Quando ao motor à combustão adotou-se um motor de pequeno porte 1.0 (1000cm<sup>3</sup> cilindradas). A partir dos gráficos de potência e torque por rotação de dois motores 1.0, sendo um do Celta 1.0 e outro do Ford Ka 1.0, pode-se entender melhor a faixa de trabalho de um motor dessa categoria.

Pode-se observar que em ambos os gráficos que a máxima potência do motor foi atingida a uma rotação de 6000rpm, logo este valor foi imposto como máxima rotação ao motor à combustão, mas pretende-se trabalhar numa faixa mais baixa, pois é sabido que a esta rotação a emissão de gases poluentes é elevada, além do alto consumo de combustível do veículo.

Comparando a curva de potência com a curva de torque pode-se observar que o máximo torque é atingido entre 3.000 e 3.500 rpm no motor 1.0 do Celta e entre 3.500 a 4.000 no motor do Ford Ka, assim adotou-se uma faixa ótima de trabalho, ou seja, que o carro tenha disponível o máximo torque com um valor de potência razoável entre 3.000 e 3.750 rpm, sendo o ponto de máximo torque em 3.500 rpm, este ponto também foi adotado como ponto ótimo, no qual o veículo possível um melhor desempenho com o mínimo consumo de combustível e baixa emissão de poluentes.

Procurou-se impor limites razoáveis tanto para a potência quanto para a faixa de trabalho dos motores, mas sempre levando em consideração a aproximação com a realidade, a fim de se obter simulações próximas do real.

## 7. Resultado das simulações

Utilizou-se os programas Excel e MATLAB para simular o sistema utilizando as equações mostradas acima, com o objetivo de se avaliar a possibilidade real de funcionamento do dispositivo. Primeiramente simulou-se o sistema impondo os seguintes valores para os parâmetros do sistema, sendo que as engrenagens têm dentes inclinados com ângulo de  $\psi$  de 20° e módulo real de 2,25:

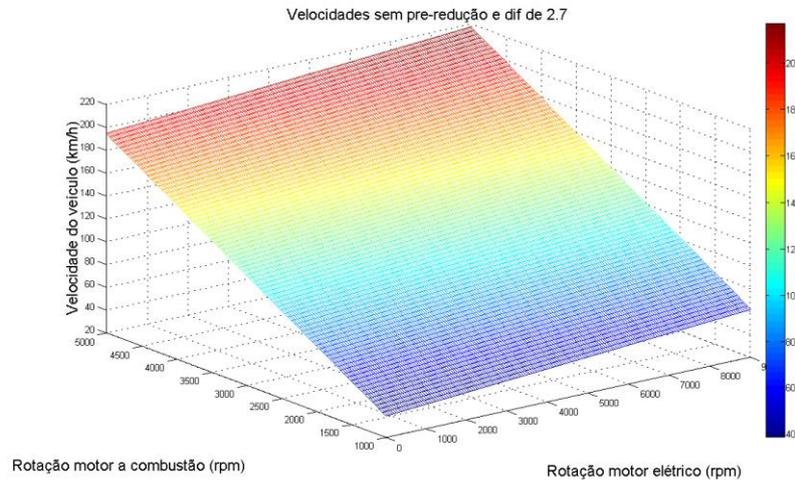
$$z_2 = 84 ; z_3 = 20 ; z_4 = 42 ; z_6 = z_2 + z_3 + z_4 = 146$$

A entrada do motor elétrico é feita através do parafuso sem-fim com duplo canal, ou seja,  $z_9 = 2$ , o diâmetro da engrenagem 8 é de 280 mm e o módulo igual a 5, logo  $z_8 = 56$ . Tentou-se simular o sistema com o parafuso de só um canal, só que o veículo ficou muito lento, por isso nesta e nas próximas simulações será utilizado 2 canais. Assim,

$$i_{23} = \frac{84}{20} = 4,2 ; i_{46} = \frac{42}{146} = 0,2876 ; i_8 = \frac{56}{2} = 28$$

No caso considerou-se um veículo com raio de roda de 230 mm que é equivalente a um pneu 195/65 R15. A equação (11) permite relacionar a velocidade no veículo com a rotação das rodas trativas. Assim, pode-se obter gráficos que mostram como o veículo se comporta nas diferentes posições de funcionamento do motor à combustão em relação as variações de rotação por parte do motor elétrico.

Os planos foram levantadas da seguinte maneira, variava-se a rotação de entrada do motor à combustão em valores pré-determinados e então se variava a rotação de entrada do motor elétrico de 0 a 9.000 rpm.



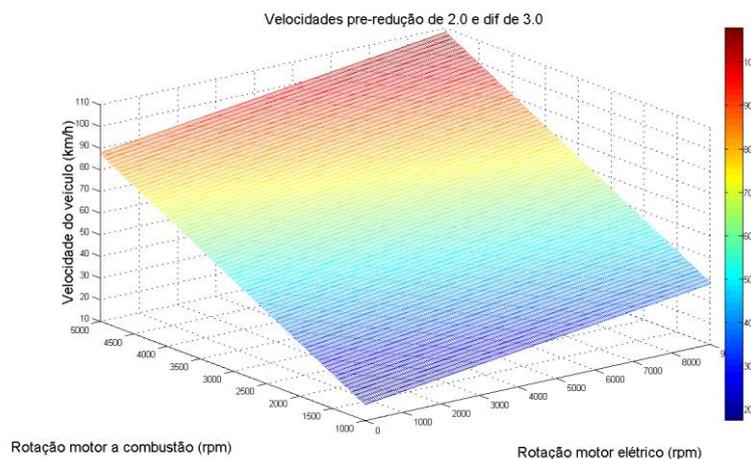
**Figura 6.** Curvas de velocidade sem pré-redução do motor à combustão

Observando a figura 6 percebe-se que o veículo atinge velocidades muito altas, ou seja, passa em muito da velocidade máxima desejada entorno de 90km/h, além do dispositivo atingir rotações elevadas internamente que podem causar danos. Além disso, a força trativa atinge um valor máximo de 4000N, mas na sua faixa de operação normal fica entorno de 3000N que foi considerado um valor baixo. A fim de refinar a solução do problema, colocou-se uma pré-redução na entrada do motor à combustão, esta solução foi escolhida por ser de simples implementação e ter apresentado resultados satisfatórios. Outra solução possível seria aumentar o valor de  $i_{23}$  só que nesse caso os valores necessários seria muito altos, extrapolando os valores recomendados de uma relação máxima de redução de 6.

Assim, toda a rotação do motor à combustão passa por uma redução inicial de índice 2, ou seja, a rotação de entrada é dividida por dois e consequentemente o torque dobra.

Com esta modificação refez-se a simulação utilizando os mesmos parâmetros apresentados anteriormente, só que agora existe um índice de pré-redução da rotação de  $w_1$  igual a 2. Abaixo esta apresentada a resposta do sistema utilizando um diferencial com índice de redução de 3,0.

Simulou-se para diferentes índices de redução tanto do diferencial quanto da pré-redução e escolheu-se uma configuração intermediária com diferencial com redução de índice 3. Assim, para este caso obteve-se todos os pontos de operação, bem como o gráfico de torque e força trativa do veículo.

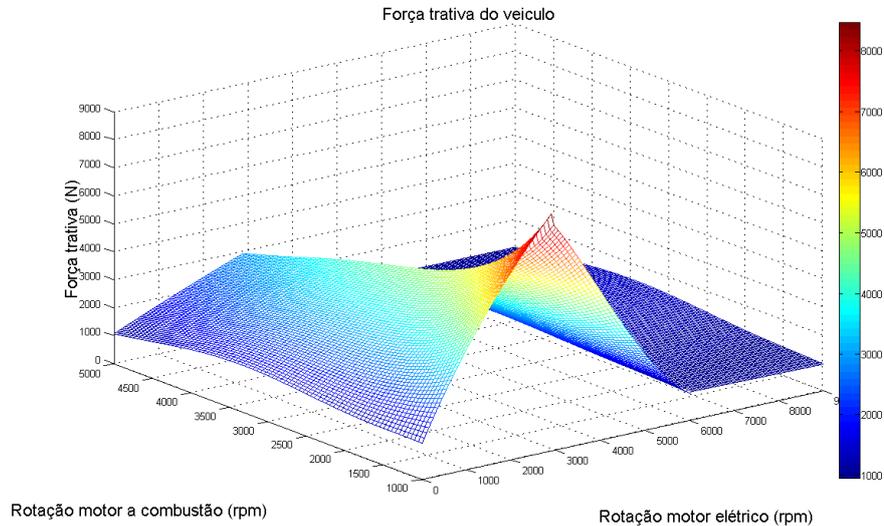


**Figura 7.** Curvas de esforço trativo para um veículo manual

Observando o gráfico de velocidades gerado, pode-se perceber que o veículo atinge velocidade máxima entorno de 110 km/h, mas considerando os limites de operação de ambos o motores o veículo poderia atingir cerca de

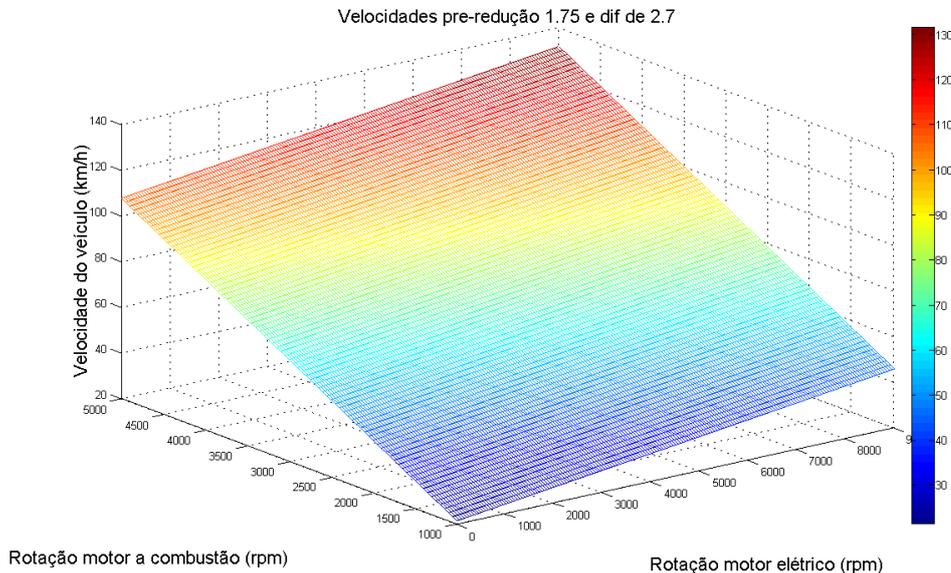
100km/h. Considerando que a proposta de trabalho é um veículo urbano que visa o baixo consumo energético, além da melhor utilização do espaço, ou seja, um veículo compacto que não ocupe muito espaço nas vias já congestionadas da cidade, esta solução atinge os seus objetivos iniciais, agora deve-se analisar a figura 8 que mostra a força trativa.

Analisando o gráfico de forças trativas que considera uma perda de 20 % da energia gerada nas mais diversas formas, este número pode parecer exagerado, mas considerando as inércias rotacionais, bem como a falta de exatidão dos dados aferidos sobre os propulsores este valor é razoável, desta forma, o veículo atinge valores de força trativas satisfatórias e bem próximas de um veículo de linha.



**Figura 8.** Curvas de força trativa.

Como na questão da velocidade havia-se atingido muito em cima os 100 km/h, resolveu-se estudar uma configuração diferente, considerada mais veloz. Esta configuração possui um índice do diferencial de 2,7 e pré-redução de 1,75 para uma análise mais profunda plotou-se os gráficos de velocidade, curvas de torque e força trativa.

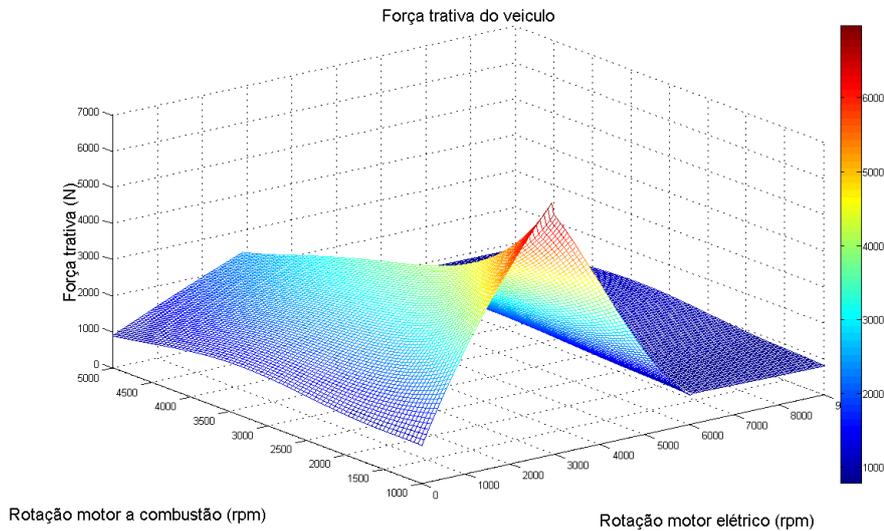


**Figura 9.** Gráfico de velocidade do veículo (pré-redução 1,75 e diferencial 2,7).

Levando-se em consideração o objetivo principal do trabalho, estudar um dispositivo para um carro híbrido, utilizaram-se os dados de um carro de linha como base, ou seja, o veículo desenvolvido precisa atingir níveis próximos de torque, força trativa e potência. Assim, resolveu-se comparar os resultados obtidos para uma dada parametrização do dispositivo com do Gol Power 1.6, comparou-se a força trativa da parametrização utilizada na simulação do veículo com uma pré-redução de 1.75 e índice de redução do diferencial de 2.7 que foi escolhida como a mais eficiente para os requisitos adotados. Pode-se perceber que o veículo projetado consegue atingir níveis próximos de força trativa do Gol Power, assim, o dispositivo se mostra passível de construção. Para o dispositivo ser funcional é necessário um estudo mais complexo da topologia de torque e força, pois a partir destes estudos é necessário se construir um sistema de controle. Este sistema deve levar em consideração a potência requerida e através do conhecimento da topologia do

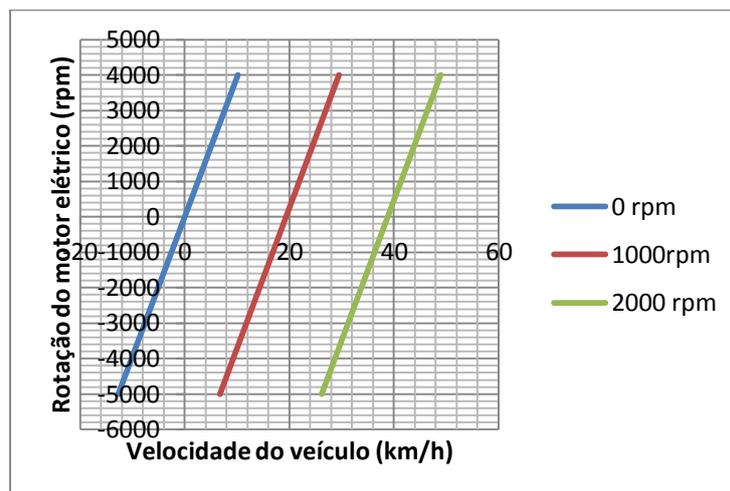
veículo escolher um ponto, ou seja, a rotação do motor a combustão e do motor elétrico. Além disso, o veículo híbrido deve buscar sempre o ponto de máximo desempenho de ambos os motores e de menor gasto energético.

Além de avaliar as forças trativas, ainda fez-se uma avaliação do ponto de vista da potência que o veículo conseguiria gerar, esta avaliação não leva em consideração as perdas por forças resistivas, mas serve para dar uma idéia da potência média que o veículo teria. Pode-se concluir que o dispositivo seria efetivo em seu objetivo, pois atinge níveis de potência comparáveis com os carros de linha e ainda tem a possibilidade de escolha do ponto de operação.



**Figura 10.** Gráfico de força trativa do veículo (pré-redução 1,75 e diferencial 2,7).

Procurou-se ainda estudar se seria possível inverter os motores, ou seja, o motor elétrico entrar através do eixo e o motor à combustão entrar através do parafuso sem fim 8, o resultado obtido foi que o veículo conseguiria para qualquer rotação atingir as velocidades desejadas, mas o motor elétrico não consegue suprir por si só a necessidade de potência e torque do veículo, ou seja, seria um veículo muito pouco ágil que dependendo da solicitação não conseguiria ter resposta, este trabalharia sempre no limite do motor elétrico. Assim, esta hipótese foi descartada. Estudou-se também a parte de manobra em baixas velocidades, isto foi feito utilizando os parâmetros utilizados na primeira simulação, a diferença foi que o motor elétrico pode ter rotações negativas, ou seja, inversão de sentido de rotação. A figura 11 representa as curvas obtidas.



**Figura 11.** Curvas com inversão de rotação do motor elétrico para manobras

Como pode-se perceber o veículo consegue atingir velocidades razoáveis para manobra sem utilizar o motor à combustão, além disso, não simulou-se para as velocidades máximas de rotação do motor elétrico. Outro ponto importante que deve ser levado em consideração é que até determinada velocidade não é necessário o funcionamento do motor à combustão, dado que os motores elétricos costumam ter alto torque em baixa rotação. Logo este sozinho poderia suprir a necessidade de potência, e assim, o veículo pode funcionar com um sistema que em baixas velocidades desligasse o motor à combustão e com o aumento da velocidade ou da necessidade de potência do veículo este é religado, isto já é utilizado em veículos mais modernos a fim de se economizar combustível.

## 8. Conclusão

Os resultados obtidos através do equacionamento do sistema e posterior simulação em Excel e MATLAB mostram que o dispositivo é plausível conforme constatado na parte de resultados. A partir das simulações realizadas é possível observar que existem diversas configurações para montagem do dispositivo, a escolha de uma delas seria feita com base no tipo do veículo que se deseja construir, bem como o tipo de terreno que o mesmo necessitaria enfrentar.

Caso o dispositivo fosse construído seria necessário um estudo mais profundo, a fim de estudar o consumo de combustível, além da possibilidade de acoplar um regenerador de energia para recarregar as baterias a partir da energia da frenagem. O presente trabalho também mostrou que o dispositivo pode ser construído, mas a forma construtiva não necessariamente precisa respeitar a utilizada neste trabalho, mas deve ser algo próximo, pois a disposição utilizada é muito eficiente para a união de diferentes motores e já é utilizada pela indústria em diferentes situações.

A partir desse trabalho, novas propostas de trabalhos futuros podem ser apontadas. Uma primeira proposta de trabalho seria o estudo mais profundo na área de consumo energético, este refinamento é necessário para se saber quais são os pontos de operação de maior rendimento energético e conseqüentemente definir qual seria a faixa ótima de operação para os motores. Este trabalho também viabilizaria um segundo estudo na área de controle, pois para o bom funcionamento do dispositivo é necessário o desenvolvimento de uma linha de controle que a partir da potência requerida escolha o ponto de operação mais apropriado em vista do consumo e desempenho.

## 9. Referências

- ARTIGO TECH TALK, “Um CVT diferente com engrenagens”, maio de 2005, edição 177, encontrado em <http://www.techtalk.com.br>.
- ARTOBOLEVSKY, Ivan I. “Mechanisms in Modern Engineering Design Volume III”, Mir Publishers Moscow, 1977.
- BOSCH “Automotive Handbook” 6ª edição, SAE.
- ERDMAN, Arthur G. e Sandor, George N. “Mechanism Design: Analysis and synthesis, Volume 1”, New Jersey, Prentice-Hall, 1984.
- GILLESPIE, Thomas D. 1992. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. s.l. : SAE International, 1992.
- JONASSON, Karin “Analysing Hybrid Drive System Topologies”, Lund University SWEDEN, Licenciate Thesis, 2002.
- OTAMR BITSCHKE; Guenter Gutman, “Systems for hybrid cars”, Journal of Power Sources, 2004.
- Z. RAHMAN; K.L.Butler, M. Ehsani, “ Designing Parallel Hybrid Electric Vehicles Using V-ELPH 2.01”, Proceeding of the American Control Conference, San Diego, California , Junho 1999.
- [http://www.leapcad.com/Transportation/Toyota\\_Prius\\_Model\\_Specifications.pdf](http://www.leapcad.com/Transportation/Toyota_Prius_Model_Specifications.pdf)

## 10. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### HYBRID PROPULSION SYSTEM WITH CVT

**Felipe Guth**

[guthfe@gmail.com](mailto:guthfe@gmail.com)

**Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni**

[salvagni@usp.br](mailto:salvagni@usp.br)

**Abstract.** This paper presents the study of a new device for hybrid vehicles propulsion. The device was developed to replace the regular CVT gearbox and moreover, it will be the union mechanism of electric motor with the combustion engine. A model was created to establish the device dynamic and to identify all the parameters of influence. Using the software MATLAB, simulation has been made to define the parameters and to analyze the behavior of the device in a vehicle equipped with a combustion engine power 1.0 and a electric motor. The analyses helped to demonstrate the effectiveness of the device for hybrid propulsion.

**Keywords:** Hybrid vehicle, CVT.