

AUTOMATIC INERTIAL CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION (AiCVT) – UM NOVO PARADIGMA DE CVT, SIMPLES, BARATA E EFICIENTE.

Alan Miranda Monteiro de Lima

Kraftmittel Technologies e COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Email: alan@kraftmittel.com

RESUMO

Desde quando foram inventadas as transmissões uma regra básica foi sempre obedecida, o “eixo motor move o eixo movido”. Neste trabalho o eixo movido deixou de ser somente o movido na transmissão e passou a ser também um eixo motor. Esse trabalho apresenta uma inovação no estado da arte para transmissões CVT, possuindo características de ser muito simples, possuir poucos componentes, sem eletrônica, barato de se fabricar e com eficiência média acima dos 95%. As duas principais inovações foram: A introdução de uma engrenagem redução planetária dentro da turbina de um acoplador fluido, acabando com a ineficiência em situações de deslizamento entre a bomba e a turbina; e a bomba motora do acoplador fluido ser movida pelo eixo de saída, sendo esta última característica batizada de Retroalimentação Inercial Instantânea. Com essas 2 modificações torna-se desnecessário qualquer sensor, pois quem muda as relações de marcha é o Momento Linear Instantâneo do veículo, e isso faz com que possua respostas imediatas à solicitação no pedal do acelerador. Não existe limite de torque e nem depende do atrito para transferir potência. Esse sistema também possui embreagem embutida e freio motor customizável.

ABSTRACT

Since when transmissions were invented a basic rule is always obeyed, the "drive shaft moves the driven shaft". In this work the driven shaft is no longer only the driven shaft in transmission and also become a drive shaft. This paper presents an innovation in the art for CVT transmissions, having characteristics of being very simple, have few components, without electronics, cheap to manufacture and average efficiency above 95%. The two main innovations: The introduction of a planetary gear reduction inside the turbine fluid coupler, ending with the inefficiency in slide situations between the pump and the turbine; and motor pump the fluid coupler is driven by the output shaft, the latter feature named Instant Inertial Feedback. With these two changes is unnecessary any sensor, because who changes the gear ratios is the Linear Momentum instantaneous of the vehicle, and have immediate responses to

the request on the gas pedal. There is no torque limit and not depend on friction to transfer power. This system also features built-in clutch and customizable engine brake.

INTRODUÇÃO

Vivemos em um mundo altamente competitivo e qualquer melhoria que se consiga em determinado produto poderá se tornar bem vinda, e fazer parte de um futuro próximo. Esta inovação possui características muito simples e interessantes. É formada por um conjunto de engrenagens redução planetárias, trabalhando em paralelo com um acoplador fluido, ou seja, as planetárias ficam dentro da turbina. Até os dias de hoje os conversores de torque trabalham em conjunto com a transmissão de forma *serial*, ou seja, a potência vem do motor passa pelo conversor de torque e depois entra na transmissão (engrenagens). Com essa configuração qualquer deslizamento entre a bomba e a turbina do conversor de torque há perda de eficiência, pois todo deslizamento é perdido, e quando a potência chega na transmissão, já chega com perdas. Nesta inovação isso não ocorre, pois a potência possui dois caminhos para atravessar a transmissão, através das engrenagens redução planetárias e/ou pelo fluido, pois o conversor de torque (acoplador fluido) trabalha em *paralelo* com as engrenagens, ou seja as engrenagens e o fluido trabalham juntos. Como esse sistema não possui nenhum sensor, quem faz a escolha de por onde a potência vai passar, se pelas engrenagens e/ou pelo fluido, é a natureza do movimento através do Momento Linear instantâneo do veículo. A vantagem é que a natureza sempre escolhe os caminhos mais fáceis e que se gaste menos energia.

Neste sistema as engrenagens redução planetárias e acoplador fluido estão montados de forma paralela, com a bomba do acoplador fluido ligada diretamente (soldada) no eixo de saída. O sistema possui apenas 2 conjuntos de movimentos. 1 - eixo de entrada → redução planetária → eixo de saída; 2 - eixo de saída → bomba → turbina → planetárias → eixo de saída novamente, completando a retroalimentação. Com essa Retroalimentação Inercial Instantânea, qualquer alteração no Momento Linear do veículo é sentida instantaneamente pela transmissão, que faz com que as relações de marcha sejam trocadas continua e instantaneamente para a mais apropriada naquele momento.

É uma transmissão que sempre procura o equilíbrio energético, que ocorre em dois momentos, quando está tudo parado, ou seja, não há movimento no eixo de entrada, ou no momento do acoplamento fluido, onde todas as partes móveis se movem como se estivessem soldadas umas na outras, nessa hora tudo se move como um único eixo, transferindo praticamente 100% da potência de entrada para o eixo de saída.

1 – FUNCIONAMENTO DO SISTEMA AiCVT

Para ilustrar o funcionamento vamos observar as figuras simplificadas 1 e 2 a seguir:

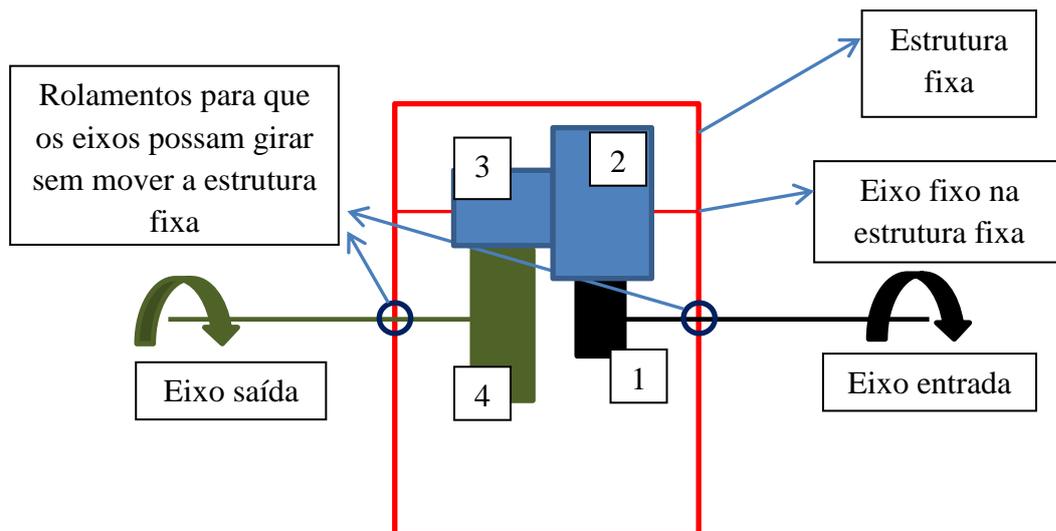


Figura 1: Redução simples

Na figura 1, temos uma redução comum. Os números de 1 a 4 representam engrenagens comuns, onde 1 e 3 possuem, por exemplo, 15 dentes, e 2 e 4 possuem, por exemplo, 30 dentes. As engrenagens 2 e 3 têm movimento solidário. Ao girarmos o eixo de entrada no sentido da seta, o eixo de saída também girará no mesmo sentido com uma rotação 4 vezes menor e com um torque 4 vezes maior do que o eixo de entrada. Pois, como as engrenagens 2 e 4 possuem o mesmo número de dentes, que são o dobro do número de dentes das engrenagens 1 e 3, temos uma redução de 4:1. A eficiência deste sistema de redução é muito alta, por volta de 97%, pois temos apenas 2 contatos de engrenagens transferindo a Potência vinda do motor. Foi considerado perda de 1,5% por contato de engrenagem.

O que o sistema AiCVT fez? Introduziu dentro de um acoplador fluido um sistema de redução planetário retroalimentado pela saída, ou seja, a bomba do acoplador fluido é movida pelo eixo de saída. A turbina possui uma trava contra recuo (não mostrada na figura 2) para não permitir que ela gire no sentido contrário ao do eixo de entrada. Isto aconteceria devido ao giro das planetárias ser contrário ao giro do eixo de entrada, então as planetárias forçariam a turbina a girar em sentido oposto ao eixo de entrada. Observemos a figura 2 a seguir.

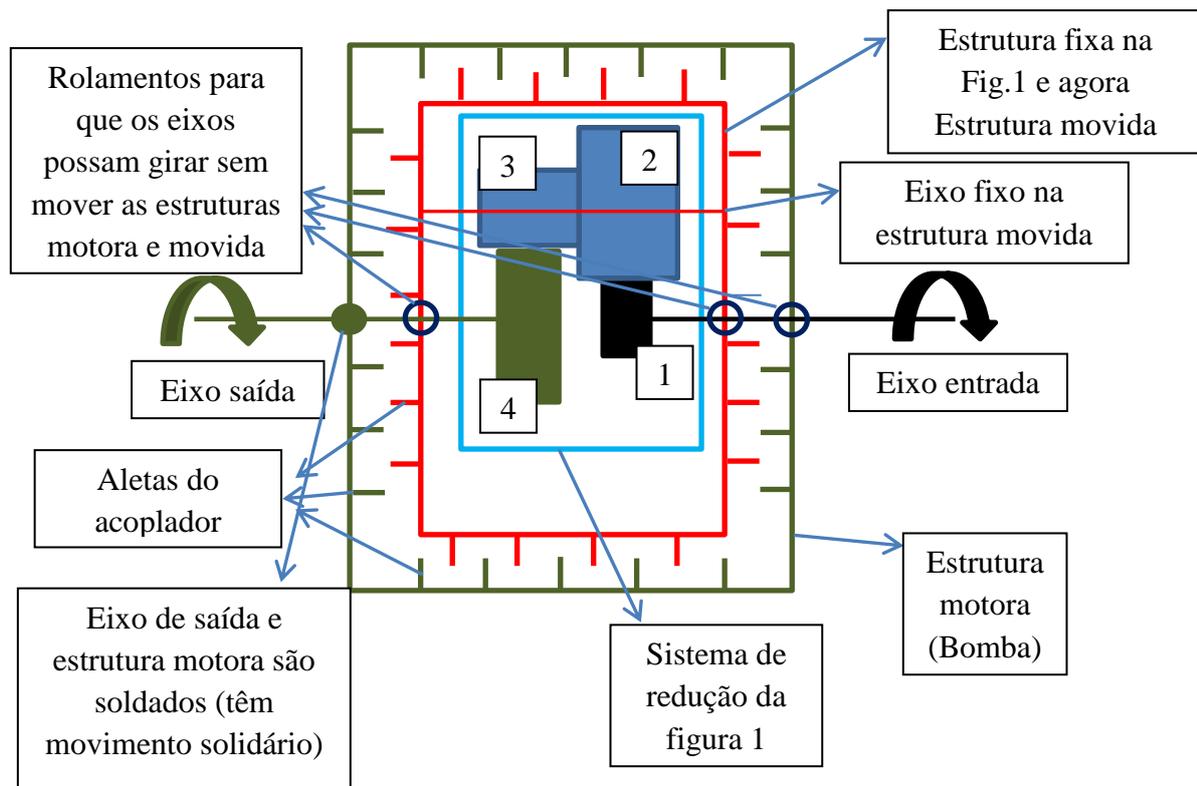


Figura 2: AiCVT. É a Figura 1 acrescentada de um acoplador fluido com a bomba deste soldada no eixo de saída (a caixa externa protetora e a trava contra recuo, que não permite que a turbina gire no sentido contrário ao eixo de entrada, não estão na figura). Elementos da mesma cor possuem movimentos solidários

Observando a figura 2 podemos notar que a parte das reduções da figura 1 se mantém a mesma. Porém a estrutura fixa agora será uma estrutura movida, que é movida pela estrutura motora através do fluido (essa transferência de movimento também pode ser por meios magnéticos). As estruturas motora e movida podem ser vistas como bomba e turbina de um acoplador fluido, respectivamente. Observamos que a bomba e a turbina do acoplador fluido (ou conversor de torque) já estão no eixo de saída, ou seja, a turbina é movida pela força da saída, com outras palavras, a potência transferida (energia) já está na saída, por isso não há perdas em deslizamentos entre a bomba e a turbina, pois ambas estão no eixo de saída.

Com o início do movimento do veículo, a força hidráulica que a estrutura motora (bomba) exerce na estrutura movida (turbina) é pequena (pois o veículo ainda está com pouca velocidade, e a rotação da bomba é a rotação do eixo de saída da transmissão), e a força necessária para mover a estrutura movida (turbina) com a redução dentro é grande, devido à inércia do veículo de estar parado. Com o continuar do movimento, a velocidade do veículo vai aumentando, e conseqüentemente a força hidráulica que a estrutura motora (bomba) exerce na movida (turbina) também aumenta, e paralelamente a força necessária para mover a estrutura movida (turbina) com a redução dentro vai diminuindo, pois o veículo já começou a

se mover, e conseqüentemente sua inércia de estar parado vai diminuindo com a velocidade. Isto equivale à dificuldade de se começar a mover um carro, por isso temos a primeira marcha de força em todos os tipos de veículos, e depois temos marchas com relações mais de velocidade e menos força (torque).

Podemos notar que se estendermos esse raciocínio veremos que esse sistema tende a levar sempre o câmbio para o equilíbrio, ou seja, para a relação 1:1. O sistema funciona de uma forma simples, pois a componente de rotação que surge a mais no eixo de saída, inserida pelo giro da estrutura movida (com as engrenagens redução dentro e conseqüentemente o eixo de saída) se somando à rotação induzida pelas planetárias, nos fornece a rotação necessária para termos trocas infinitas das relações de marcha, até chegarmos à relação de 1:1, quando todos os componentes estarão girando com a mesma rotação, e como se todos os componentes estivessem soldados uns nos outros.

Este sistema também pode ser chamado de sistema de câmbio exponencial, pois a velocidade na saída aumenta exponencialmente. No início do movimento temos pouca força para mover um grande peso, porém com o passar do tempo começamos a aumentar a força motora e diminuir o peso a ser movido, rapidamente vamos ter uma grande força para mover um pequeno peso. Veremos essa curva exponencial nos testes de aceleração de 0 a 100 Km/h, feitos em bancada simulando 4 carros reais na seção 4.

Com isso temos um câmbio CVT (pois o número de velocidades de rotação que a turbina pode ter é infinito) sem a necessidade de sensores, pois todos os sensores foram substituídos pela natureza. Em qualquer situação de velocidade (com exceção se estivermos na rotação máxima do motor), se pressionarmos o pedal do acelerador, teremos respostas imediatas, pois a rotação do motor entra direto nas planetárias, obrigando a haver mudança na relação de marchas (com desacoplamento fluido, pois o eixo de entrada acelera a saída e ao mesmo tempo desacelera a turbina, devido à força exercida pelas planetárias na turbina ser contrária ao movimento, obrigando a haver o desacoplamento fluido) e fazendo as reduções de acordo com o “peso” do pé motorista no acelerador. Porém imediatamente após diminuirmos a taxa de aceleração, o veículo tenderá assintoticamente para a relação de 1:1.

Se começarmos a subir uma serra, por exemplo, o câmbio sentirá imediatamente a dificuldade do movimento (devido à inclinação do piso), e fará as reduções automaticamente sem qualquer intervenção do motorista (havendo o desacoplamento fluido obrigatoriamente), e sempre da forma mais otimizada possível, pois quem faz isso é a natureza do movimento. Essa redução vai ser de acordo com a força do motor, peso do carro, velocidade desejada pelo motorista e inclinação do piso, quanto mais inclinado maior será a redução.

Se soltarmos a trava contra recuo (não mostrada nas figuras), ao pararmos em um sinal de trânsito, por exemplo, o câmbio funcionará como embreagem, pois poderá ficar engatado, porém com a saída parada, transferindo o movimento do eixo de entrada para o sistema de reduções, que moverá a estrutura movida (turbina) no sentido contrário ao do eixo de entrada,

devido à força exercida pelas planetárias na turbina ser contrária ao movimento do eixo de entrada. Ou seja, o sistema AiCVT não precisa de embreagem extra, pois possui uma embreagem embutida em seu funcionamento natural.

Para o freio motor (não mostrado nas figuras), deverá existir uma estrutura que freará a estrutura movida (tipo um disco de freio ou um sistema de frenagem regenerativa), que poderá ser automático, ou de acordo com a vontade do motorista pressionando levemente o pedal do freio e reduzindo as marchas. E se a intenção for frear o carro, teremos um freio mais eficiente, pois atuará reduzindo as marchas simultaneamente com o frear das rodas.

A embreagem e o freio motor customizado não foram implementados no protótipo de bancada, pois a única intenção era provar o conceito da Retroalimentação Inercial Instantânea, com as engrenagens redução planetárias dentro da turbina.

2 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA AiCVT COM UM CONVERTOR DE TORQUE COMUM

O sistema AiCVT pode ser confundido com um conversor de torque, e por isso faremos uma comparação de eficiência nos regimes de deslizamentos de ambos a seguir:

O problema no conversor de torque comum é que ele está colocado em *série* com a transmissão, ou seja, a rotação vem do motor passa pelo conversor de torque e depois pela transmissão, e qualquer perda de eficiência no conversor é transferida para a transmissão, diminuindo a eficiência do sistema como um todo. Pois todo deslizamento no conversor de torque é totalmente perdido. Veremos que isso não ocorre no sistema AiCVT, pois a energia tem 2 caminhos para passar (engrenagens redução e/ou fluido) e passa pelo(s) que oferece(m) menor esforço, devido ao conversor de torque (acoplador fluido) trabalhar em *paralelo* com as reduções planetárias.

2.1 – Regimes de operação do conversor de torque (ou acoplador fluido):

- 1 – Deslizamento máximo (Stall) → Eficiência = 0%, pois não temos rotação na saída.
- 2 – Deslizamento intermediário → Eficiência vai depender do grau de deslizamento, quanto mais deslizamento, menos eficiência.
- 3 – Acoplamento fluido perfeito com lock-up → Eficiência ≈ 100%.

2.2 – O sistema AiCVT possui 3 regimes de operação:

- 1 – Deslizamento máximo, bomba girando e a turbina (que contém as engrenagens redução dentro) totalmente parada. Potência = Rotação x Torque, nesse caso a potência passa totalmente pelas engrenagens, então utilizando o exemplo da figura 2 (redução de 4:1), pois vai se comportar exatamente como um redutor simples da figura 1. Então, por exemplo: Rotação de entrada de 6000 RPM com um torque de 100 Nm, teremos que a Potência de entrada é de $P = 6000 \text{ (RPM)} \times 100 \text{ (Nm)} \times \frac{2\pi}{60}$ ($\frac{2\pi}{60}$, constante para

termos a potência em Watts) = 20000π Watts \approx 85 CV. Como a rotação na saída vai ser de $(6000 / 4) = 1500$ RPM e o torque de saída vai ser de $(100 \times 4) 400$ Nm, temos que a Potência de saída vai ser de, $P = 1500 \text{ RPM} \times 400 \text{ Nm} \times 2\pi/60 = 20000\pi$ Watts - 3 % (eficiência de engrenagens com 2 contatos) = 19400π Watts \approx 83 CV. Temos **Potência de entrada \approx Potência de saída**, então eficiência = 97%, mesmo com deslizamento máximo no AiCVT. Notamos que se fosse um conversor de torque comum essa eficiência seria zero.

2 – Deslizamento intermediário \rightarrow Neste caso a Potência vai passar parte pelas engrenagens redução e parte pelo fluido (quem escolhe qual parte da potência vai passar pelas engrenagens e qual parte vai passar pelo fluido é a natureza), porém a eficiência terá que ser próxima dos 100% (entre 97% e 100%), pois se trata de um sistema fechado e a energia obrigatoriamente se conserva, como veremos na seção 5 que trata da eficiência do sistema AiCVT.

3 – Acoplamento fluido \rightarrow Eficiência \approx 100%, com toda a potência passando pelo fluido. Todos os componentes do AiCVT se movendo em movimento solidário.

2.3 – Comparação da eficiência do sistema atual utilizando Conversor de Torque (melhor caso, uso do lock-up) com o sistema AiCVT (pior caso, deslizamento máximo).

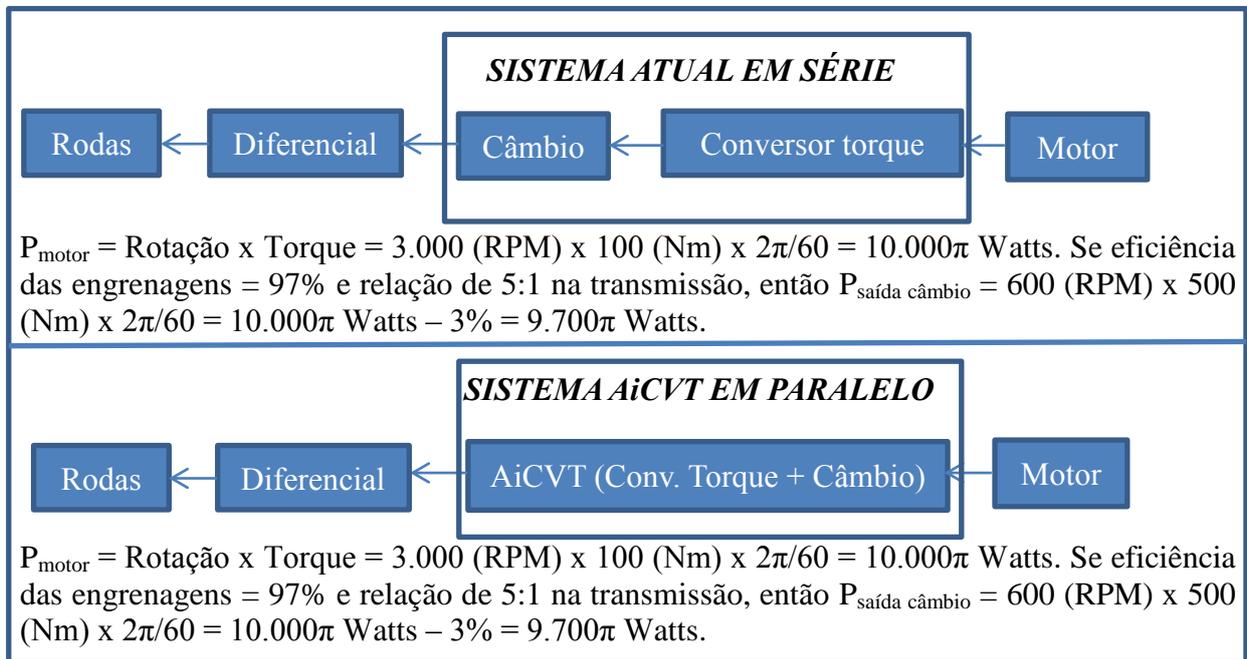


Figura 3: A eficiência no melhor caso do conversor de torque com lock-up (acoplamento total) é igual ao pior caso do sistema AiCVT com deslizamento máximo

3 – Modificações e representações gráficas do sistema AiCVT

As duas modificações básicas que puderam fornecer subsídios para que funcionasse de maneira inovadora, surpreendentemente simples e eficiente foram:

1 – A introdução de engrenagens redução planetárias dentro da turbina de um acoplador fluido, trabalhando em *paralelo* com este, dessa forma toda perda no deslizamento é jogada para as engrenagens, que transferem a potência para a saída, ou seja, *o deslizamento não traz perdas*, fazendo com que a eficiência seja perto dos 100% em qualquer regime de operação, com deslizamentos ou não.

2 – Com a Retroalimentação Inercial Instantânea (bomba de óleo na saída) o movido participa ativamente no movimento, e com isso dispensando qualquer tipo de sensor e fazendo com que o veículo sempre esteja na melhor relação de marchas e economizando combustível, pois quem faz a escolha das relações de marcha é o Momento Linear instantâneo do veículo.

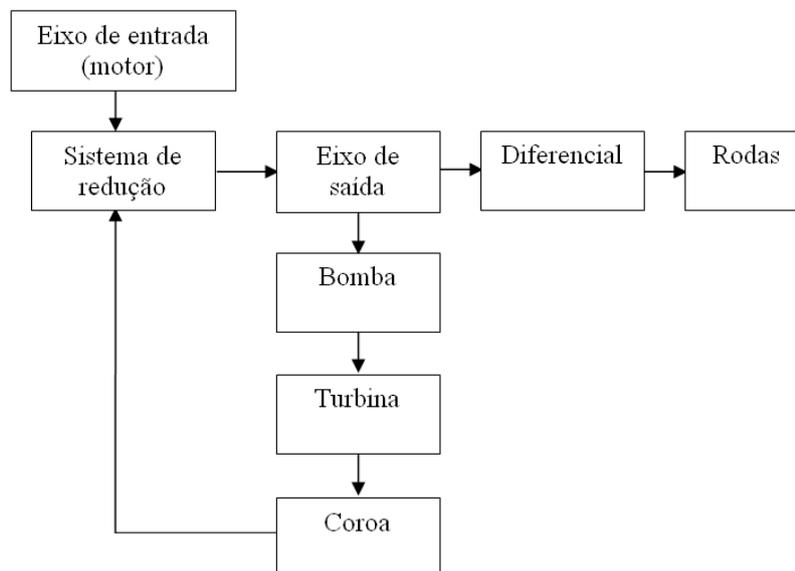


Figura 4: Sistema AiCVT em fluxograma

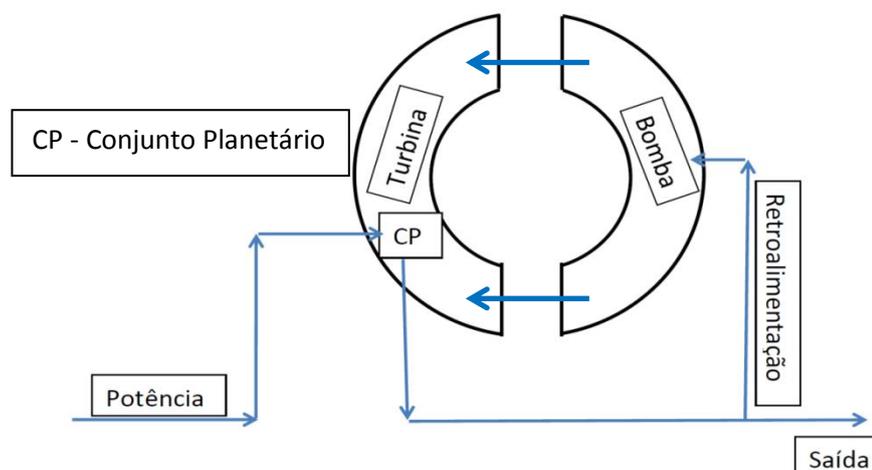


Figura 5: Representação do sistema AiCVT

4 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS EM BANCADA

Uma grandeza que é muito divulgada no desempenho de veículos automotores é o tempo de 0 a 100 Km/h. Baseado nessa grandeza foram executados 4 testes com veículos comuns do mercado. Foram escolhidos os seguintes veículos: Fiat Palio, Audi A1, Honda Civic e Hyundai Veracruz, onde cada um representa uma fatia de mercado; carros populares, esportivo, sedã e um SUV (*Sport Utility Vehicle*), respectivamente.

Foram levadas em consideração grandezas importantes como a relação peso/potência, rotação do motor quando o veículo está a 100 Km/h em quarta marcha (aproximadamente relação de 1:1), relação de diferencial e diâmetro das rodas. O único parâmetro que não foi simulado em bancada foi a resistência do ar. Para tentar compensar a não consideração da resistência do ar aumentamos o peso do volante de inércia utilizado, ou seja, utilizamos uma relação de (peso + um percentual do peso)/potência nos testes realizados.

4.1 – Metodologia utilizada para simular em bancada o comportamento do sistema AiCVT em automóveis reais.

Primeiramente foram escolhidos quatro carros para terem seus dados de aceleração reais comparados com simulações equipadas com o AiCVT. A escolha procurou contemplar automóveis de vários segmentos, portes e com potências variando entre 66 e 270 HP.

Dados reais do Fiat Palio Fire

Potência: 66 HP a 6000 RPM - Peso: 940 Kg – Faz de 0 a 100 Km/h em 20,3 segundos.
Diferencial: 4,067 - peso/potência: 14,24 – em 1:1 a 100 Km/h o motor está a 3852 RPM.
Pneu: 165/70/13.

Dados reais do Audi A1

Potência: 122 HP a 5000 RPM - Peso: 1200 Kg – Faz de 0 a 100 Km/h em 8,9 segundos.
Diferencial: 4,115 (média) - peso/potência: 9,84 – em 1:1 a 100 Km/h o motor está a 3648 RPM.
Pneu: 215/45/16.

Dados reais do Honda Civic

Potência: 140 HP a 6500 RPM - Peso: 1260 Kg – Faz de 0 a 100 Km/h em 8,9 segundos.
Diferencial: 4,29 - peso/potência: 9 – em 1:1 a 100 Km/h o motor está a 3593 RPM.
Pneu: 205/55/16.

Dados reais do Hyundai Veracruz 3.8 V6

Potência: 270 HP a 6000 RPM - Peso: 1965 Kg – Faz de 0 a 100 Km/h em 9,5 segundos.
Diferencial: 3,2 - peso/potência: 7,28 – em 1:1 a 100 Km/h o motor está a 2260 RPM.
Pneu: 245/60/18.

Nas contas e resultados dos testes foi considerado 1 HP \approx 1 CV.

Para estas comparações, foi utilizado um motor elétrico com potência proporcional a um volante de inércia (uma roda livre girante), e este foi acoplado ao eixo de saída do dispositivo, para os testes de bancada.

As relações de peso/potência foram lineares, por exemplo: o volante de inércia acoplado no teste do Honda Civic deveria ter o peso de 18 Kg, devido à relação peso/potência do Honda Civic ser $1260 \text{ Kg}/140 \text{ HP} = 9 \text{ Kg/HP}$ e o motor utilizado ter 2 HP.

Os pesos dos volantes de inércia diretamente proporcionais à relação peso/potência dos carros escolhidos deveriam ser de:

Fiat Palio – 14,24 Kg

Audi A1 – 19,68 Kg

Honda Civic – 18 Kg

Hyundai Veracruz – 14,56 Kg

Volantes de inércia e motores utilizados:

Fiat Palio utilizou um volante de inércia de **18,350 Kg** e um motor elétrico de **1 HP**.

Audi A1 utilizou um volante de inércia de **23,350 Kg** e um motor elétrico de **2 HP**.

Honda Civic utilizou um volante de inércia de **21,350 Kg** e um motor elétrico de **2 HP**.

Hyundai Veracruz utilizou um volante de inércia de **18,350 Kg** e um motor elétrico de **2 HP**.

Para os testes serem conservativos, e em uma tentativa de compensar a não consideração do efeito da resistência do ar, no Fiat Palio utilizamos um volante de inércia com o peso 29% superior ao real. No Audi A1 foi utilizado um volante de inércia com o peso 19% superior ao real. No Honda Civic foi utilizado um volante de inércia com o peso 19% superior ao real. No Hyundai Veracruz foi utilizado um volante de inércia com o peso 26% superior ao real.

Os testes foram feitos em bancada e, para efeito de simulação, desprezou-se o atrito da carroceria com o ar. As curvas foram interpoladas linearmente, pois o tacômetro utilizado nos fornecia os valores das rotações de 1 em 1 segundo, ou seja, as interpolações foram lineares dentro da variação de 1 segundo. A rotação máxima utilizada no protótipo foi de 5000 RPM devido a limites de segurança do protótipo, e mesmo assim os resultados foram superiores ao esperado.

Tempo de 0 a 100 Km/h – Real versus AiCVT

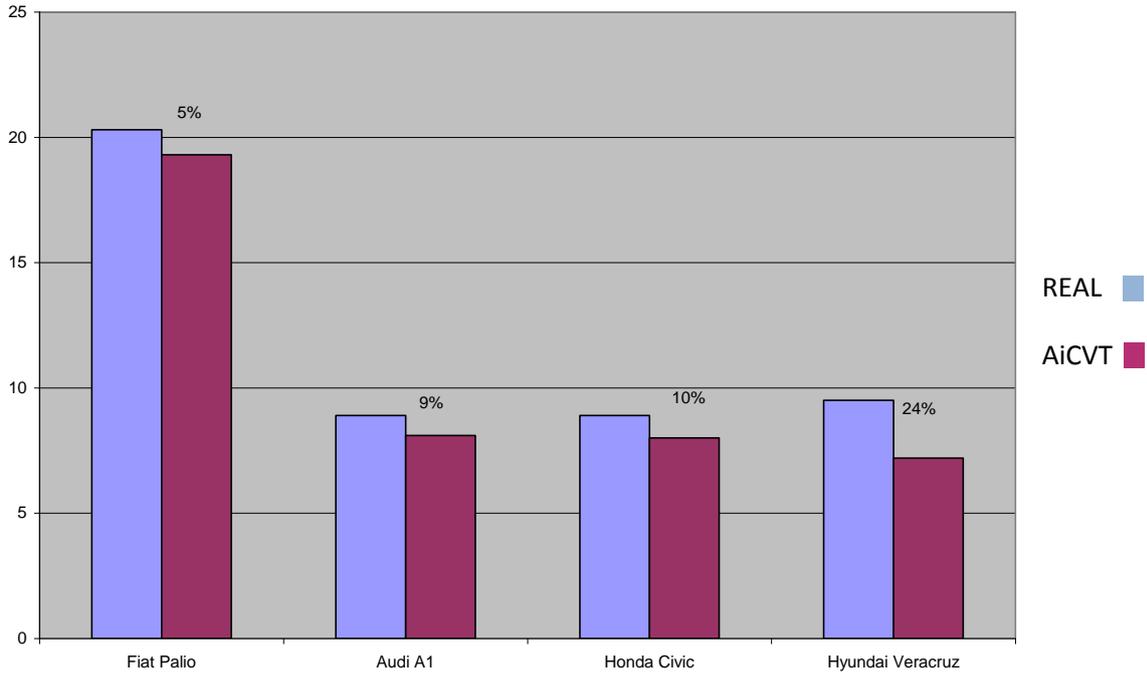


Figura 6: Resultado dos testes das simulações nos tempos de 0 a 100 Km/h, onde os percentuais acima das barras são os ganhos do sistema AiCVT

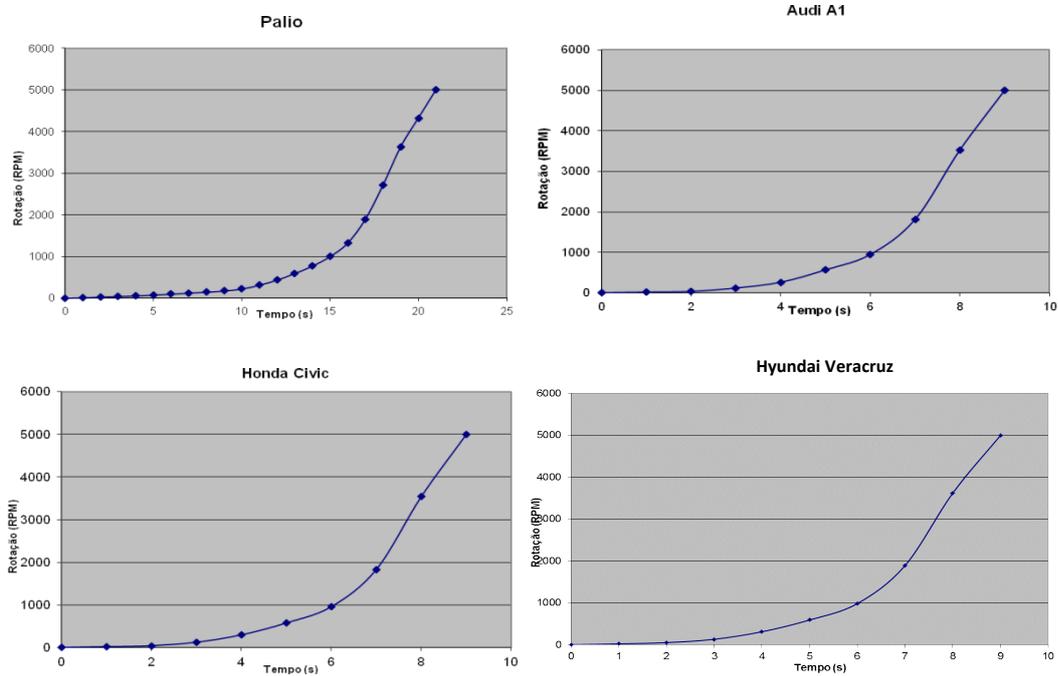


Figura 7: Gráficos do comportamento da aceleração das 4 simulações nos tempos de 0 a 100 Km/h

Podemos observar, na figura 7, que nos 4 gráficos existe um ponto de inflexão por volta da rotação de 3500 RPM. Para um perfeito funcionamento do AiCVT esse ponto de inflexão deverá ficar acima da rotação máxima utilizada pelo veículo em questão, pois nas rotações utilizadas pelos veículos este gráfico deverá ser um gráfico similar a uma exponencial. Porém todos os testes foram feitos com o mesmo óleo (óleo de direção hidráulica comum) no acoplador fluido, e acredita-se que se for utilizado algum outro óleo mais apropriado ou se mudarmos a inclinação das aletas do acoplador fluido, esse ponto de inflexão surgirá em rotações mais elevadas. Pois acreditamos que este ponto de inflexão está relacionado com a eficiência do sistema acoplador fluido.

O ganho no Hyundai Veracruz foi muito superior aos ganhos dos outros veículos testados, e acredita-se que esse fato se deva ao Hyundai Veracruz se tratar de um SUV e ter uma área de atrito com o ar superior aos demais veículos, e esse fato pode explicar tal ganho, pois não foi considerado o atrito aerodinâmico.

5 – EFICIÊNCIA DO SISTEMA AiCVT

No gráfico abaixo temos uma simulação da eficiência, levando em consideração que a eficiência das engrenagens planetárias de redução seja de 97% (com 2 contatos entre as engrenagens) e que a primeira marcha possui a relação de 4:1.

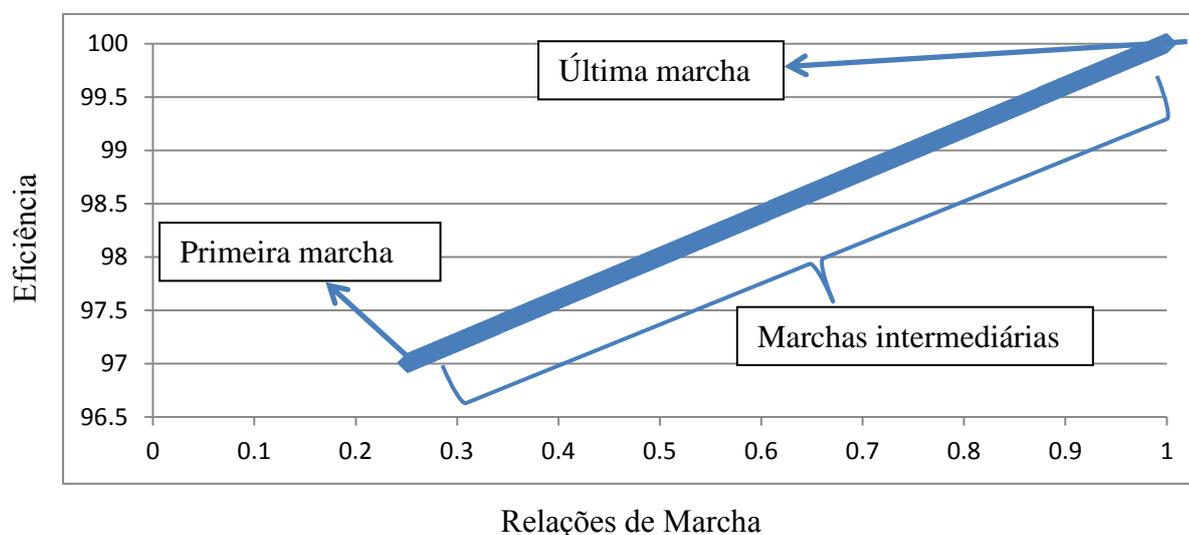


Figura 8: Simulação da eficiência do sistema AiCVT

Porque a eficiência sobe juntamente com as relações de marcha?

Na primeira marcha temos toda potência passando pelas engrenagens planetárias, e como a eficiência das engrenagens é de 97% (com 2 contatos entre as engrenagens, um entre sol/planetária e o outro entre planetária/corona), temos que a eficiência do sistema AiCVT na primeira marcha é de 97%. Então, todo deslizamento não é perdido, é transferido para as planetárias, e estas passam a potência para o eixo de saída. ***Uma característica importante do***

sistema AiCVT é que qualquer deslizamento entre a bomba e a turbina não traz nenhuma perda de eficiência, as únicas perdas são nas engrenagens. Esta afirmação poderá causar estranheza para especialistas da área, porém com o entendimento do sistema essa estranheza se transformará em um novo paradigma para transmissões.

Se por exemplo, estivermos com metade da potência sendo transferida pelas planetárias e a outra metade sendo transferida pelo fluido, teremos:

Os 50 % que passam pelo fluido não têm perdas. E os 50% das planetárias têm 3 % de perdas (no caso de apenas dois contatos entre as engrenagens). Nesta hora teremos a eficiência total de $50\% + (50\% - 3\%) = 50\% + 48,5\% = 98,5\%$. Esse raciocínio vale para qualquer percentual de transmissão de potência pelas engrenagens e/ou fluido.

Todas as “perdas” que aconteceriam pelo deslizamento entre a bomba e a turbina são transferidas pelas planetárias ao eixo de saída, ou seja, o fluido não tem perdas, pois a bomba e a turbina estão no eixo de saída. No sistema AiCVT as únicas perdas são na transferência de potência pelas engrenagens. Por isso sua eficiência média fica entre a eficiência de primeira marcha (97%) e a eficiência de última marcha (100%). Se considerarmos a eficiência média uma média aritmética entre as eficiências da figura 8, teremos que a eficiência média fica por volta dos 98,5%.

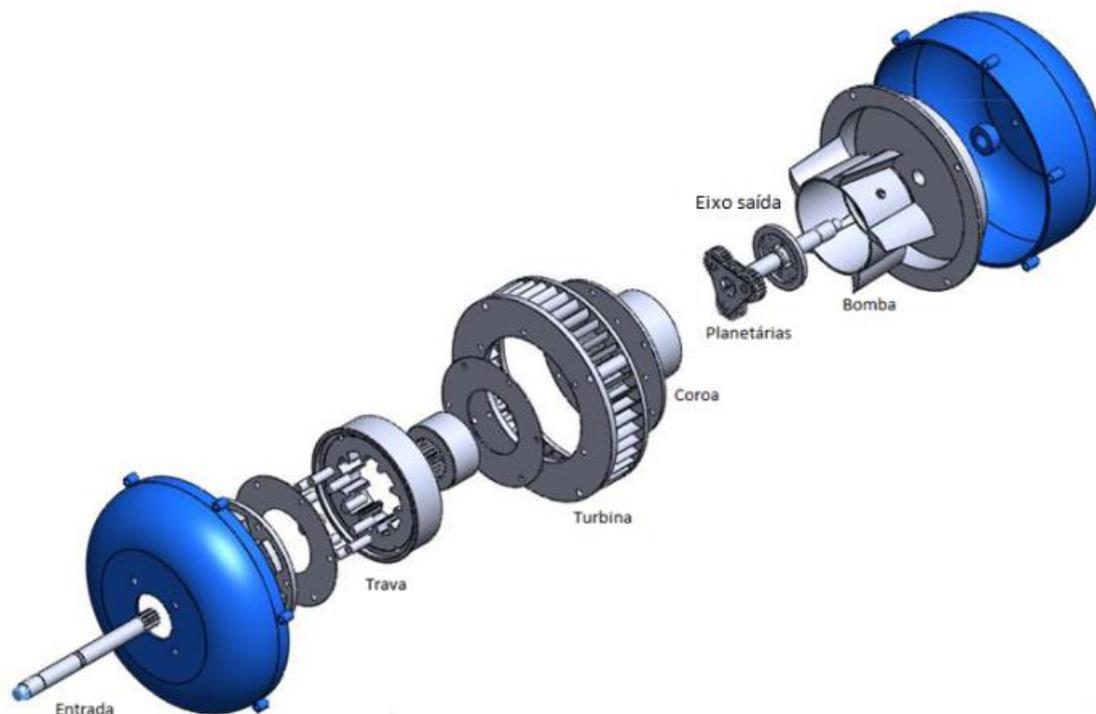


Figura 9: 3D do Protótipo de bancada do sistema AiCVT

6 – ANÁLISE FÍSICA DAS ROTAÇÕES E TORQUES DE TODOS OS COMPONENTES GIRANTES DO SISTEMA AiCVT

Faremos algumas considerações na análise vetorial das grandezas envolvidas utilizando Física básica. Esta análise foi feita sobre o conjunto de engrenagens que está no protótipo real da figura 9. O sentido positivo foi considerado o sentido de giro do eixo de entrada, anti-horário.

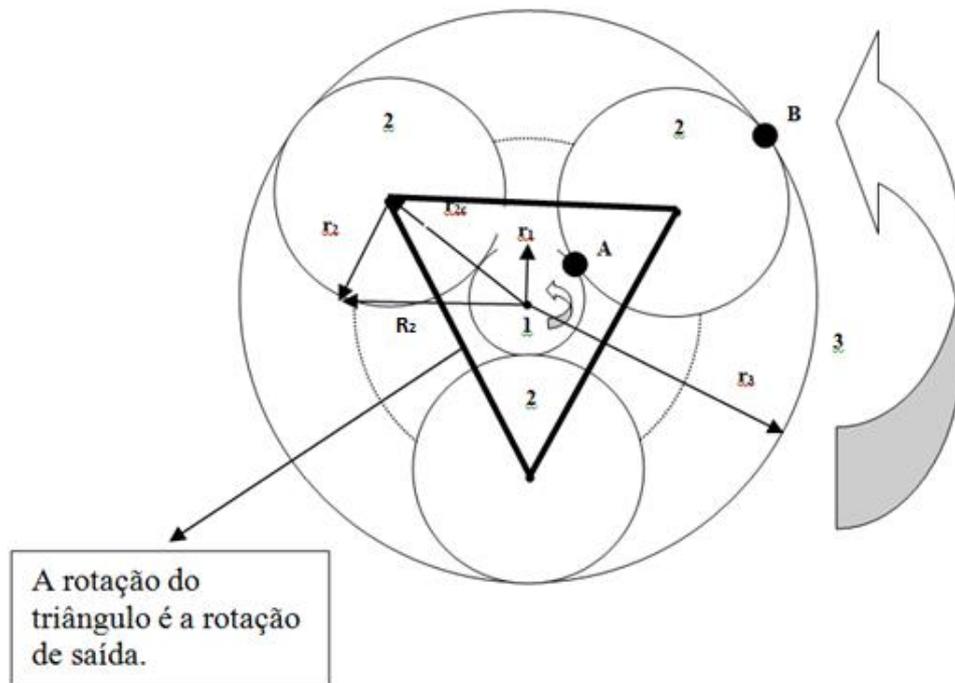


Figura 10: Esquema da redução do sistema AiCVT, correspondente às planetárias e coroa da figura 9.

- 1 – Engrenagem solar (entrada) – raio (r) = 10 mm
- 2 – Engrenagem planetária – raio (r) = 20 mm
- 3 – Engrenagem coroa externa – raio (r) = 50 mm

OBS: Consideramos o sistema AiCVT do protótipo, com 3 engrenagens planetárias (2) e com a saída em um pinhão fixo (não mostrado na figura 10) no triângulo planetário, ou seja, a rotação de saída é a rotação do triângulo que suporta as planetárias, representado pelo triângulo em negrito ligando os 3 centros das planetárias (2) na figura 10. Os vértices do triângulo foram chamados de ω_{2c} , que são os centros das engrenagens planetárias (2). Com esses valores dos raios (proporcionais ao número de dentes) de (1), (2) e (3) a redução desta planetária é de 6:1.

Utilizando as relações da figura 10 acima temos:

Em relação ao centro da engrenagem solar (1):

Engrenagem (1): $\vec{R}_1 = \vec{r}_1$

Engrenagem (2): $\vec{R}_2 = \vec{r}_{2c} + \vec{r}_2$

Engrenagem (3) (coroa): $\vec{R}_3 = \vec{r}_3$

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$, são as velocidades angulares das engrenagens (1), (2) e (3), respectivamente.

ω_{2c} = Velocidade angular do centro das planetárias (2) e também a velocidade angular do eixo de saída.

$\vec{V} = \vec{\omega} \times \vec{r} \rightarrow$ Vetorial

$V = \omega r \rightarrow$ Escalar

Velocidades:

$$\vec{V}_1 = \frac{d\vec{R}_1}{dt} = \frac{d\vec{r}_1}{dt} = \vec{\omega}_1 \times \vec{r}_1$$

$$\vec{V}_2 = \frac{d\vec{R}_2}{dt} = \frac{d\vec{r}_{2c}}{dt} + \frac{d\vec{r}_2}{dt} = \vec{\omega}_{2c} \times \vec{r}_{2c} + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_2$$

$$\vec{V}_3 = \frac{d\vec{R}_3}{dt} = \frac{d\vec{r}_3}{dt} = \vec{\omega}_3 \times \vec{r}_3$$

Analisando o caso no momento em que $\vec{R}_1 = \vec{R}_2 \rightarrow \vec{r}_1 = \vec{r}_{2c} + \vec{r}_2 \rightarrow |\vec{r}_1| = |\vec{r}_{2c} + \vec{r}_2| \rightarrow r_1 = r_{2c} - r_2$ (módulo).

Se $\vec{r}_1 = \vec{r}_{2c} + \vec{r}_2$ no ponto de contato **A**, temos:

$$\frac{d\vec{r}_1}{dt} = \frac{d\vec{r}_{2c}}{dt} + \frac{d\vec{r}_2}{dt}$$

$$\vec{\omega}_1 \times \vec{r}_1 = \vec{\omega}_{2c} \times \vec{r}_{2c} + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_2 \rightarrow \boxed{\vec{\omega}_1 r_1 = \vec{\omega}_{2c} r_{2c} - \vec{\omega}_2 r_2}, \text{ relação das engrenagens (1) e (2).}$$

E ainda teremos no ponto **B**:

$$\vec{R}_3 = \vec{r}_3 = \vec{r}_{2c} + \vec{r}_2 \rightarrow \frac{d\vec{r}_3}{dt} = \frac{d\vec{r}_{2c}}{dt} + \frac{d\vec{r}_2}{dt}$$

$$|\vec{r}_3| = |\vec{r}_{2c} + \vec{r}_2| \rightarrow r_3 = r_{2c} + r_2 \text{ (módulo)}$$

$$\vec{\omega}_3 \times \vec{r}_3 = \vec{\omega}_{2c} \times \vec{r}_{2c} + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_2 \rightarrow \boxed{\vec{\omega}_3 r_3 = \vec{\omega}_{2c} r_{2c} + \vec{\omega}_2 r_2}, \text{ relação das engrenagens (2) e (3).}$$

$$\boxed{\begin{cases} \vec{\omega}_1 r_1 = \vec{\omega}_{2c} r_{2c} - \vec{\omega}_2 r_2 \\ \vec{\omega}_3 r_3 = \vec{\omega}_{2c} r_{2c} + \vec{\omega}_2 r_2 \end{cases}}$$

Essas 2 equações acima regem todas as rotações do sistema de planetárias proposto na figura 9, destacado na figura 10, e que foi utilizado no protótipo de bancada.

6.1 – Análise das rotações do sistema AiCVT nos regimes de primeira e última marcha, utilizando as engrenagens da figura 10 e com a rotação da engrenagem de entrada (solar) de 6000 RPM, por exemplo.

Rotação no Caso 1: $\omega_3 = 0$, a turbina (e consequentemente a coroa) está parada, caso da relação de primeira marcha (redução de 6:1).

$$\begin{cases} \vec{\omega}_1 r_1 = \vec{\omega}_{2c} r_{2c} - \vec{\omega}_2 r_2 \\ 0 = \vec{\omega}_{2c} r_{2c} + \vec{\omega}_2 r_2 \rightarrow \vec{\omega}_{2c} r_{2c} = -\vec{\omega}_2 r_2, \text{ logo,} \\ \vec{\omega}_1 r_1 = \vec{\omega}_{2c} r_{2c} - (-\vec{\omega}_{2c} r_{2c}) \rightarrow \vec{\omega}_1 r_1 = 2\vec{\omega}_{2c} r_{2c} \end{cases}$$

Como $\vec{r}_{2c} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2$, teremos:

$$\vec{\omega}_{2c} = \frac{r_1}{2r_{2c}} \vec{\omega}_1 = \frac{r_1}{2(r_1 + r_2)} \vec{\omega}_1 = \frac{10}{2(10+20)} \times 6000 = 1000 \text{ RPM, resultado condizente}$$

com a redução de 6:1, pois ω_{2c} é a rotação de saída.

e

$$\vec{\omega}_2 = -\frac{r_{2c}}{r_2} \vec{\omega}_{2c} = -\frac{r_{2c}}{r_2} \frac{r_1}{2r_{2c}} \vec{\omega}_1 = -\frac{r_1}{2r_2} \vec{\omega}_1 = -\frac{10}{2 \times 20} \times 6000 = -1500 \text{ RPM}$$

Então temos que as rotações em primeira marcha serão de:

ω_1 (eixo de entrada) = 6000 RPM, ω_2 (planetárias) = -1500 RPM, ω_3 (coroa) = 0 RPM, ω_{2c} (eixo de saída) = 1000 RPM.

Rotação no Caso 2: caso em que $\omega_1 = \omega_{2c} = \omega_3$, última marcha (acoplamento fluido), lembrando que ω_{2c} é a rotação do eixo de saída.

Fazendo $\omega_1 = \omega_{2c} = \omega_3 = \omega_{total}$, temos:

$$\begin{cases} \vec{\omega}_{total} r_1 = \vec{\omega}_{total} r_{2c} - \vec{\omega}_2 r_2 & (1) \\ \vec{\omega}_{total} r_3 = \vec{\omega}_{total} r_{2c} + \vec{\omega}_2 r_2 & (2) \end{cases}$$

Fazendo (2) - (1), temos:

$$(r_3 - r_1) \vec{\omega}_{total} = 0 + 2\vec{\omega}_2 r_2 \rightarrow \vec{\omega}_2 = \frac{(r_3 - r_1) \vec{\omega}_{total}}{2r_2} \rightarrow \vec{\omega}_2 = \frac{(50 - 10) \times 6000}{2 \times 20} = 6000 \text{ RPM.}$$

Então temos que as rotações de última marcha serão de:

ω_1 (eixo de entrada) = 6000 RPM, ω_2 (planetárias) = 6000 RPM, ω_3 (coroa) = 6000 RPM, ω_{2c} (eixo de saída) = 6000 RPM. Nessa hora é como se todas as engrenagens do sistema AiCVT estivessem soldadas umas nas outras, e o AiCVT trabalhará como um eixo único transmitindo potência.

6.2 – Análise dos torques de todos os componentes girantes do sistema AiCVT.

Relação de transmissão de torque em um par de engrenagens:

$$R_{par} = \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{saída}} = \frac{n_{saída}}{n_{entrada}}$$

$$\frac{T_{saída}}{T_{entrada}} = e \times R_{par}$$

Onde:

R_{par} = Relação de transmissão do par de engrenagens, $\omega_{entrada}$ = Rotação de entrada, $\omega_{saída}$ = Rotação de saída, $n_{saída}$ = Número de dentes da engrenagem de saída, $n_{entrada}$ = Número de dentes da engrenagem de entrada, $T_{saída}$ = Torque de saída, $T_{entrada}$ = Torque de entrada, e = Eficiência.

Foi considerado que o raio das engrenagens é proporcional ao número de dentes destas. Com essa relação de torque e rotações, e com as rotações calculadas anteriormente, podemos calcular todos os torques envolvidos utilizando a relação abaixo:

$$T_{saída} = T_{entrada} \times \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{saída}} \times e$$

Consideramos a eficiência $e = 1$ nos cálculos abaixo.

Torque no Caso 1: $\omega_3 = 0$, a turbina está parada, caso da relação de primeira marcha (6:1), e considerando que o torque do motor é de 200 Nm à 6000 RPM, por exemplo.

$$T_{saída} = T_{entrada} \times \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{saída}}$$

Então temos que as rotações e os torques em primeira marcha (relação de 6:1) serão de:

ω_1 (rotação de entrada) = 6000 RPM e T_1 (torque de entrada) = 200 Nm.

ω_2 (rotação na planetária) = -1500 RPM e T_2 (torque na planetária) = 200 x 6000 / (-1500) = - 800 Nm.

ω_3 (rotação na coroa) = 0 RPM e T_3 (torque na coroa) = 0 Nm.

ω_{2c} (rotação na saída) = 1000 RPM e T_{2c} (torque na saída) = -800 x (-1500) / 1000 = 1200 Nm.

Torque no Caso 2: caso em que $\omega_1 = \omega_{2c} = \omega_3 = \omega_2$, lembrando que ω_{2c} é a rotação do eixo de saída, situação da relação de marchas 1:1.

$$T_{saída} = T_{entrada} \times \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{saída}}$$

Então temos que as rotações e os torques em última marcha serão de:

ω_1 (rotação de entrada) = 6000 RPM e T_1 (torque de entrada) = 200 Nm.

ω_2 (rotação na planetária) = 6000 RPM e T_2 (torque na planetária) = $200 \times 6000 / 6000 = 200$ Nm.

ω_3 (rotação na coroa) = 6000 RPM e T_3 (torque na coroa) = $200 \times 6000 / 6000 = 200$ Nm.

ω_{2c} (rotação na saída) = 6000 RPM e T_{2c} (torque na saída) = $200 \times 6000 / 6000 = 200$ Nm.

Na figura 9, a engrenagem coroa (3) (e a turbina também, pois ambas têm movimento solidário) é girada pela bomba (que tem movimento solidário ao eixo de saída), e como essa velocidade de giro da engrenagem coroa pode ser qualquer uma dentre as rotações impostas pelo eixo vindo motor, então temos que as relações de marcha são contínuas. As análises feitas para a primeira e última marchas valem para todas as outras infinitas relações de marchas, pois ω_3 (rotação da engrenagem coroa) pode variar de zero até a rotação máxima do motor.

6.3 - Balanço de potência do protótipo nos casos de primeira e última marcha do exemplo das seções 6.1 e 6.2.

Caso 1 – primeira marcha:

$$\text{Potência}_{\text{Entrada}} \rightarrow P = T \times \omega \rightarrow 200 \text{ (Nm)} \times 6000 \text{ (RPM)} \times (2\pi/60) = 40.000\pi \text{ Watts}$$

$$\text{Potência}_{\text{Saída}} \rightarrow P = T \times \omega \rightarrow 1200 \text{ (Nm)} \times 1000 \text{ (RPM)} \times (2\pi/60) = 40.000\pi \text{ Watts}$$

Neste caso temos que descontar a eficiência das engrenagens, que foi considerada 100%, mas que na realidade fica em torno de 97%. Então temos que Potência de entrada = 40.000π Watts e potência de saída = 38.800π Watts.

Caso 2 – última marcha

$$\text{Potência}_{\text{Entrada}} \rightarrow P = T \times \omega \rightarrow 200 \text{ (Nm)} \times 6000 \text{ (RPM)} \times (2\pi/60) = 40.000\pi \text{ Watts}$$

$$\text{Potência}_{\text{Saída}} \rightarrow P = T \times \omega \rightarrow 200 \text{ (Nm)} \times 6000 \text{ (RPM)} \times (2\pi/60) = 40.000\pi \text{ Watts}$$

Neste caso não há passagem de potência pelas engrenagens, então não temos nenhuma perda de eficiência. Temos que Potência de entrada = Potência de saída = 40.000π Watts, com eficiência $\approx 100\%$.

7 – ESTUDOS FUTUROS A SEREM CONSIDERADOS

Estudo de um sistema de arrefecimento de óleo (radiador de óleo) que, mesmo em situações de deslizamento demorado (subidas de serras muito íngremes em relações de marcha que não

cheguem em 1:1, e conseqüentemente sem haver o acoplamento fluido) consiga manter a temperatura do óleo dentro de valores de operação, para evitar perda de eficiência. E um acoplador fluido que acople e desacople em altas rotações sem haver desgaste das aletas.

8 – CONCLUSÕES FINAIS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA AICVT:

- Está criando um novo paradigma de transmissão de potência, onde o movido tem papel importante no movimento, sendo movido e também motor.
- Possui um custo de fabricação muito inferior aos seus concorrentes automáticos e CVT.
- Funciona sem nenhuma eletrônica.
- Possui eficiência acima de 95%, em qualquer regime de operação.
- Possui embreagem embutida.
- Possui freio motor customizável.
- Possui respostas imediatas às solicitações no acelerador.
- Possui somente peças simples e duráveis.
- Manutenção simples e barata.
- Pode ser construído com quaisquer relações iniciais e finais de marcha.

9 – INFORMAÇÕES ADICIONAIS

As patentes nacional e internacionais do sistema AiCVT foram solicitadas e estão em fase de análise pelos órgãos competentes. A Kraftmittel está à procura de parceiros na indústria automobilística que se interessem pela ideia, para que possamos desenvolver esse novo paradigma de CVT mais simples, mais barata e mais eficiente.

Agradecimentos: Ao Engenheiro Thales Sardinha Garcia Souza por sua ajuda na elaboração deste artigo.