

CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE UMA CVT POR POLIAS EXPANSIVAS

55008

Resumo. Apresentam-se as formulações e equações de movimento que representam as interações e os comportamentos dinâmicos dos vários componentes de um sistema de transmissão de um veículo compondo-se de: motor à combustão interna, uma CVT de polias e correia, um planetário, diferenciais, rodas e o veículo propriamente dito.

Palavras-chave: Equações de movimento, CVT, Variadores de velocidade, Comportamento, Funcionamento.

1. INTRODUÇÃO

O crescente mercado das transmissões continuamente variáveis exige que suas características de performance sejam plenamente conhecidas e constantemente incrementadas. Dos vários tipos construtivos existentes optou-se pela modelagem do sistema de polias de diâmetro variável e correia. Sabendo, que as transmissões são parte do trem de força de qualquer veículo, o modelo irá incluir as características de saída do motor, torque e rotação e os principais componentes de uma transmissão automática que utilize CVT's. Neste são incluídos a própria CVT, caixa de planetários, diferencial e rodas. Uma análise dinâmica do sistema é realizada para se conhecer o comportamento dinâmico da transmissão. A partir desta modelagem, pode-se estimar o desempenho de um veículo equipado com esse tipo de transmissão e eventualmente utilizar um programa para determinar valores como velocidade, aceleração e deslocamento. Desta forma pode-se otimizar o aproveitamento de combustível do veículo. Essa otimização de combustível pode ser feita através do mapa de consumo característico de cada motor. A minimização do consumo requer a criação de uma estratégia de controle que determina o comportamento de variação geométrica da CVT e a relação de transmissão da caixa de planetários.

2. MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

A modelagem do sistema de transmissão foi pensada de forma a representar os componentes de um veículo de maneira bem simplificada, mas que sirvam de base para modelos mais complexos. Assim sendo, pode-se conhecer e identificar mais facilmente cada componente e suas respectivas representações matemáticas.

Através do esquema na Fig. (1), podemos ter uma visão geral dos componentes do veículo em estudo e as interações entre estes. Para se dar início ao estudo foi necessário fazer algumas considerações e hipóteses como: na representação simplificada da CVT foi considerado que não há deslizamento nem estiramento da correia; todos os eixos supostos como rígidos; inclusão das inércias equivalentes do conjunto de transmissão-veículo; introdução dos esforços referentes a resistência ao rolamento, resistência aerodinâmica e resistência devido ao acliffe; não há deslizamento nem travamento nos pneus.

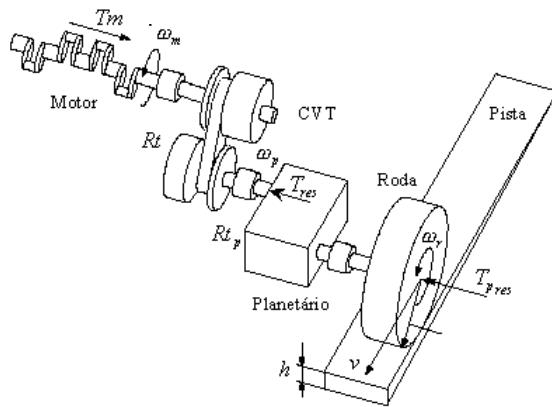


Figura 1. Modelo Físico do Sistema de Transmissão

T_m (Nm) Torque fornecido pelo motor;

ω_m (rpm) Rotação na saída do motor;

Rt Relação de transmissão da CVT;

T_{res} (Nm) Torque resistivo a CVT;

ω_p (rpm) Rotação na saída da CVT, entrada no planetário;

Rt_p Relação de transmissão do planetário;

ω_r (rpm) Rotação da roda do veículo;

$T_{p,res}$ (Nm) Torque resistivo ao planetário e ao deslocamento do veículo;

v (m/s) Velocidade longitudinal do veículo;

h (m) Aclive da pista.

A modelagem dinâmica de cada componente do sistema de transmissão será obtido à partir das variáveis de potência e torque. Assim, o modo (rotação e torque) na entrada da CVT será o da saída do motor, o modo de saída da CVT será o de entrada para o planetário, o modo de saída do planetário será o de entrada para as rodas, o modo de saída das rodas menos o modo da energia dissipada dará o modo do veículo.

2.1. Modelagem da CVT

Nas Figuras (2) e (3) pode-se observar o funcionamento e o comportamento da CVT automática de polias e correia de diâmetro variável. A polia motora totalmente aberta em operação fornece máximo torque e tem uma relação de transmissão de 3,71:1. A polia motora totalmente fechada em operação fornece máxima velocidade e tem uma relação de transmissão de 0,69:1. A variação total da relação de transmissão é de 5,38:1.

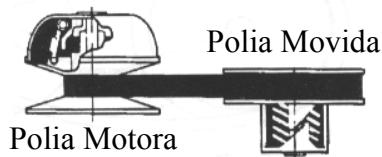


Figura 2. Polia motora totalmente aberta em operação.

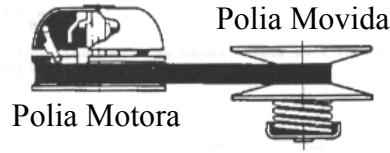


Figura 3. Polia motora totalmente fechada em operação.

A CVT possui uma correia que liga as duas polias expansivas. À medida que os discos das polias se afastam, a correia se aprofunda no sulco entre os discos das polias; com os discos mais próximos, ela sobe e corre superficialmente.

A modelagem dinâmica de cada componente do sistema de transmissão é obtida a partir do torque e da rotação, que somados aos dados referentes ao tipo de acionador e a geometria da polia motora têm-se o posicionamento da correia nesta polia. Pode-se então fazer o cruzamento das informações fornecidas pelo gráfico de demanda do sistema, os dados obtidos pelo tipo de acionador, geometria da polia movida e consequente posicionamento da correia nesta polia, obtendo-se assim os diâmetros referentes a cada posição e a relação de transmissão do CVT propriamente dita.

2.1.1. Estudo do Acionador da Polia Motora

O acionamento da polia motora da CVT se dá quando ocorre a conexão do sistema através do contato da correia com as faces das polias, transmitindo potência aos demais elementos de transmissão do veículo. O contato da correia ocorre devido à força de compressão dos discos das polias sobre a correia que altera ou mantém a correia posicionada em determinado diâmetro conforme foi dito anteriormente. Isso ocorre devido a um sistema de massas dentro do acionador da polia motora que quando em movimento rotacional gera uma força devido à inércia das massas que movimenta o disco no sentido do eixo indo de encontro ao seu par, causando assim a força de compressão na correia, tendo-se então a força de atrito no contato. Esta força de atrito deve ser suficiente para que a correia possa transmitir o torque e a rotação ao restante do sistema, caso isto não aconteça à correia deslizará (patinará) no sulco das polias.

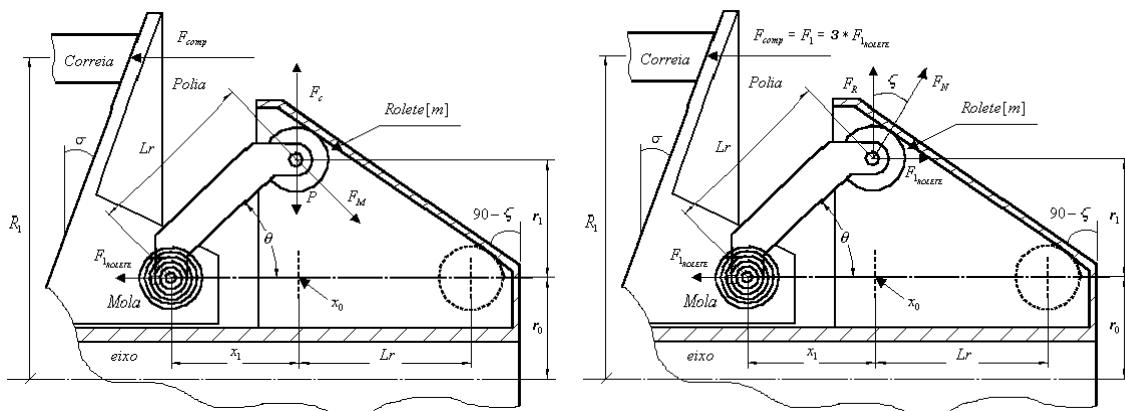


Figura 4. Esboço do Acionamento por Força devido à Inércia das Massas.

Na Figura (4) pode-se ver o acionador da polia motora e a interação das forças num único rolete, na qual a força provocada pela inércia das massas (no caso 3 roletes dispostos a 120°) devido a rotação do motor faz com que estas se desloquem variando num ângulo θ a medida que vence a força da mola F_M na base do braço do rolete, (a força peso do rolete P é desprezada, pois variam o sentido e direção a cada instante durante a rotação do disco) a força da mola da polia movida F_{Mola} , a força do camo $F_{2,CAMO}$ e as forças de reação da correia contra o disco da polia

geradas por forças resistivas externas ao acionador, causando um deslocamento longitudinal x_1 e x_2 , respectivamente na polia motora e movida. Este deslocamento longitudinal (x_1) é o quanto que o disco da polia motora se movimenta no sentido axial comprimindo e forçando a correia a manter ou a mudar sua posição, deslocando longitudinalmente (x_2) o disco da polia movida ou não e assim mudando ou mantendo a relação de transmissão. O deslocamento radial do rolete (r_1) varia da posição de origem (r_0) que é o raio mínimo de posicionamento do rolete (distância) até a linha de centro do eixo da polia.

k_r - Constante elástica da mola torsional localizada na base do braço do rolete;

m - Massa do rolete;

g - Aceleração da gravidade;

r_1 - Deslocamento radial do rolete;

F_C - Força devido à inércia da massa do rolete;

F_M - Força da mola localizada na base do braço do rolete;

F_{Mola} - Força da mola na polia movida;

P - Força peso do rolete;

F_{comp} - Força de compressão na correia;

L_r - Comprimento do braço do rolete;

r_0 - Raio origem da posição do rolete;

r_1 - Deslocamento radial do rolete;

θ - Ângulo de deslocamento do rolete;

σ - Ângulo de inclinação dos discos das polias;

ζ - Ângulo complementar ao de inclinação do camo da polia motora;

x_1 - Deslocamento do disco da polia motora;

R_1 - Deslocamento da correia na polia ou raio nominal da polia motora;

ω_m - Rotação do motor;

μ - Coeficiente de atrito;

F_R - Força resultante atuante sobre cada rolete;

F_N - Força normal a superfície de contato do rolete;

$F_{1_{ROLETE}}$ - Força de compressão devido a cada rolete;

F_1 - Força de compressão da correia pelo disco da polia motora.

Tendo-se assim o raio nominal da polia motora a cada posicionamento da correia, pelo deslocamento do disco móvel da polia motora e a força de compressão na correia pelo coeficiente de atrito (borracha-metal), pode-se obter uma força tangencial transmissível na correia proveniente do acionador e o torque transmissível na polia motora que é a capacidade que o conjunto acionador – polia motora tem de transmitir torque a cada instante e a cada circunstância.

$$F_{1_{Tan}} = \frac{F_1 \cdot 2 \cdot \mu}{\cos \sigma} \quad (1)$$

$$T_{Tm1} = F_{1_{Tan}} \cdot R_1 \quad (2)$$

Se o torque transmissível na polia motora for menor que o torque do motor, a CVT funcionará como uma embreagem permitindo que a correia patine na polia motora e transmita parte do torque

do motor fornecendo apenas o torque transmissível para o restante do sistema. Assim sendo, o torque transmitido (T_{T_1}) é o torque transmissível na polia motora (T_{m1}). Quando a correia patina, o torque perdido ($T_{perdido}$) acelera o motor aumentando sua rotação.

$$T_{perdido} = T_m - T_{T_1} \quad (3)$$

$$a_{m1} = \frac{T_{perdido}}{I_m} \quad (4)$$

a_{m1} - Aceleração do motor devido à patinação da correia na polia motora;

I_m - Inércia do Motor.

Se o torque transmissível na polia motora for maior que o torque do motor ($T_{m1} \geq T_m$), a CVT transmitirá o torque integral fornecido pelo motor ao restante do sistema. O torque transmitido é o torque do motor ($T_{T_1} = T_m$).

2.1.2. Estudo do Acionador da Polia Movida

Durante o acionamento a relação de transmissão varia, indo do valor máximo ao valor mínimo da relação de transmissão oferecida pela CVT, de acordo com a rotação e torque do motor, com o equilíbrio (balanço) das forças na polia motora e movida, e conforme o torque resistivo imposto ao sistema também a cada instante. Por meio das equações do comprimento da correia e dos ângulos de abraçamento pode-se calcular o raio da polia movida (r_2) respectivo ao raio da polia motora (R_1) e assim ter-se as relações de transmissão da CVT. A Figura (5) mostra de forma simplificada como se dão o funcionamento do acionador da polia movida e a interação das forças geradas pelo torque resistivo imposto ao sistema.

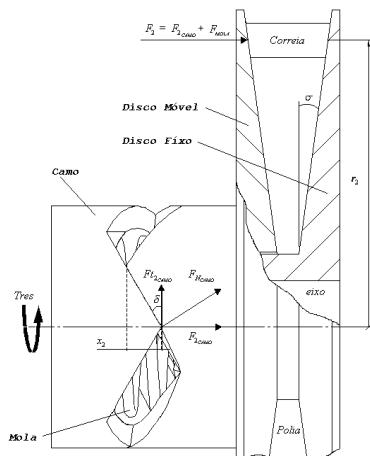


Figura 5. Esboço do acionamento da polia movida.

A força de compressão da correia pelo disco da polia movida (F_2) é a resultante da somatórias das forças do acionador.

$$F_2 = F_{2_{CAMO}} + F_{Pré} + F_{MOLA} \quad (5)$$

Então a força de compressão da correia pelo disco da polia motora F_1 tende a ser igual à força de compressão da correia pelo disco da polia movida F_2 buscando o equilíbrio das forças. Variações dessas forças desequilibram o sistema e fazem com que a correia mude sua posição até que ela estabilize numa nova posição no instante em que estas forças e o sistema como um todo entrarem em equilíbrio novamente ($F_1 = F_2$).

2.2. Modelagem Dinâmica do Veículo

A Figura (6) mostra o veículo em estudo em movimento e as forças que agem nele em oposição ao movimento. Estas resistências ao movimento são:

- Aer – Resistência do ar;
- Rol – Resistência ao rolamento;
- Sub – Resistência ao acliffe.

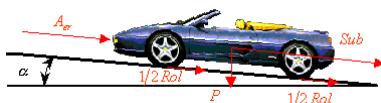


Figura 6. Forças agindo no veículo em movimento.

A partir da somatória de todas as resistências, tem-se a resistência total equivalente Tot que se opõe ao movimento do veículo. A Eq. (6) representa esta resistência usada no modelo.

$$Tot = Are + Rol + Sub \quad (6)$$

2.2.1. Cálculo do Torque Resistivo

A Equação (6) dá a carga total nas rodas do veículo como força. Para ser usado no modelamento deve ser convertido em um torque aplicado no eixo de saída. A equação do torque é representada na Eq. (7) e onde R é o raio dos pneus achatados devido a rolagem.

$$T_{resv} = Tot \cdot R \quad (7)$$

A Tabela (1) resume os valores numéricos adotados para os parâmetros descritos acima, de um veículo experimental em condições especiais, usados no desenvolvimento do modelo.

Tabela 1. Características do Modelo.

| Parâmetros | Valores |
|-------------------------------|---------|
| Diâmetro das Rodas (m) | 0,63 |
| Massa do Veículo (kg) | 200 |
| Relação de Redução/Planetário | 7,125:1 |

$$F_{2Tan} = \frac{F_2 \cdot 2 \cdot \mu}{\cos \sigma} \quad (8)$$

$$T_{Tm2} = F_{2Tan} \cdot R_1 \quad (9)$$

Se o torque transmitido na polia motora multiplicado pela relação de transmissão da CVT for menor que o torque transmissível na polia movida ou menor que o torque resistivo que chega ao eixo de saída da CVT, a CVT funcionará como uma embreagem permitindo que a correia patine na polia motora e transmita apenas o torque transmissível na polia motora multiplicado pela relação de

transmissão da CVT para o restante do sistema. Quando a correia patina, o torque perdido na polia motora ($T_{perdido}$) acelera o motor aumentando sua rotação.

$$T_{perdido2} = T_{T2} - (T_{T1} \cdot Rt) \quad (10)$$

$$a_{m2} = \frac{T_{perdido2}}{I_m} \quad (11)$$

a_{m2} - Aceleração do motor devido à patinação da correia na polia motora;

I_m - Inércia do Motor.

Se o torque transmitido na polia motora multiplicado pela relação de transmissão for maior que o torque resistivo ($T_{T1} \cdot Rt > Tres$), a CVT transmitirá o torque integral fornecido pelo motor ao restante do sistema e o veículo acelerará. Se o torque transmitido na polia motora multiplicado pela relação de transmissão for igual ao torque resistivo ($T_{T1} \cdot Rt = Tres$), o veículo terá aceleração zero e velocidade constante.

O torque resistivo ao movimento do veículo ($Tresv$) passará pelo planetário (Rtp) que tem relação de transmissão 7.125:1 e será convertido para um torque resistivo em relação a CVT ($Tres$), conforme Eq. (12).

$$Tres = Tresv / Rtp \quad (12)$$

$$T_{total} = T_{T2} - Tres \quad (13)$$

A Equação (14) mostra como se calcula a aceleração do veículo a partir da diferença do torque fornecido pelo motor que chega a roda do veículo e do torque resistivo na roda do veículo.

$$a = \frac{T_{total} \cdot Rtp}{R \cdot M} \quad (14)$$

3. RESULTADOS

Para o estudo do comportamento da CVT introduziu-se algumas variações com relação à inclinação da pista para que fosse possível melhor visualizar a variação da relação de transmissão da CVT. Por exemplo, a Fig. (7), no instante de 1 segundo após o veículo dar início ao deslocamento ele encontra uma descida de -2° , após 3 segundos passa para um plano de 0° , após 4 segundos encontra uma subida de 2° e após 5 segundos passa novamente para um plano de 0° de inclinação. O estudo do comportamento da CVT foi limitado no intervalo de tempo de 0 a 10 segundos.



Figura 7. Variação da inclinação da pista.

Na Figura (8) pode-se ver o funcionamento da CVT em relação ao motor e os torques resistivos (torques em oposição ao funcionamento do sistema) que chegam no motor. Fornecendo-se então

um torque resistivo, conforme é mostrado na Fig. (7) devido, por exemplo, a variações do ângulo de inclinação do percurso do veículo, pode-se ver o comportamento da CVT.

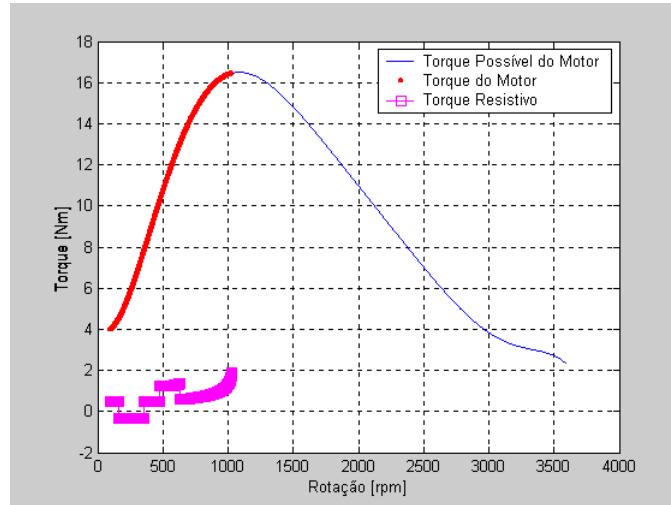


Figura 8. Gráfico do Torque do Motor e Resistivo pela Rotação do Motor.

A Figura (9) mostra a relação de transmissão da CVT diante deste torque resistivo e como ela se ajusta para que o torque do motor seja maior (suficiente) para vencer este torque resistivo. Porém, como o torque do motor é maior que o torque resistivo, a CVT simplesmente não muda sua relação de transmissão até que algo aconteça que mude esta condição (por exemplo, o veículo encontra um desnível que tenha inclinação tal que varie significativamente o torque resistivo). E pode-se ver o instante em que o veículo encontra um desnível que pode ser positivo (subida) ou negativo (descida) em relação ao plano da superfície (pista) e como a CVT muda sua relação de transmissão, desde que o conjunto polias-correia estejam fortemente conectados, isto é sem a patinação da correia nas polias.

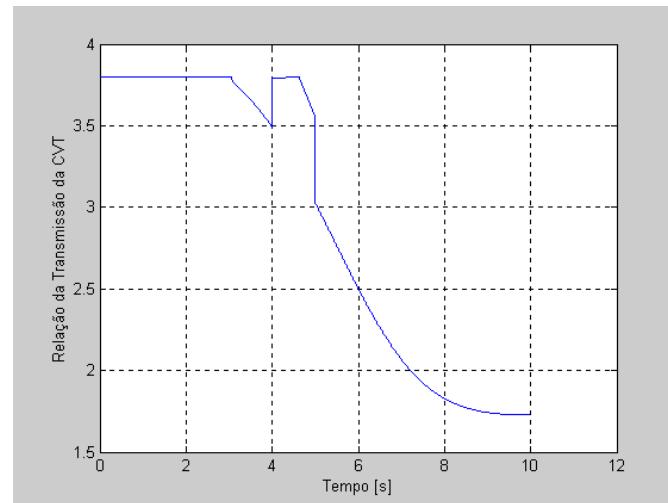


Figura 9. Gráfico da Relação de Transmissão pelo Tempo.

Percebe-se que inicialmente a correia está fixa numa posição, pois ela está patinando na polia motora (efeito embreagem). Essa reação da CVT em mudar sua relação de transmissão se dá por um balanço de forças que ocorre internamente na CVT e das variações dos torques do motor e resistivo e das variações da rotação do motor e da velocidade do veículo de acordo com as condições externas. Até que as forças F1 e F2 se encontrem, que é o caso do contato total da correia com as polias ou o conjunto fortemente conectado (polia motora com a polia movida e

correia) transmitindo o torque total para o restante do sistema, a relação de transmissão permanece inalterada. Pode-se ver também, que no instante $t = 4.6\text{s}$ a correia e as polias estão conectados fortemente, sem patinação da correia.

3.1 - Alterando Componentes do Acionador da CVT

Alterando-se os componentes do acionador da CVT pode-se estudar o novo comportamento da CVT e conhecer qual a melhor montagem para cada situação desejada. E assim qual teria o melhor rendimento e economia no consumo de combustível. Para exemplificar neste trabalho mostrou-se apenas a variação da constante elástica da mola de compressão na polia movida (K).

3.1.1 - Variando o Coeficiente Elástico da Mola da Polia Movida

Inicialmente usou-se uma mola de constante elástica igual a 37061 N/m . Em seguida estudou-se o comportamento da CVT para novas constantes de molas da polia movida. Variando-se o coeficiente elástico da mola varia-se a força da mola, muda a resultante das forças, muda a posição dos discos e a relação de transmissão – Fig.(10) – e consequentemente o torque de saída.

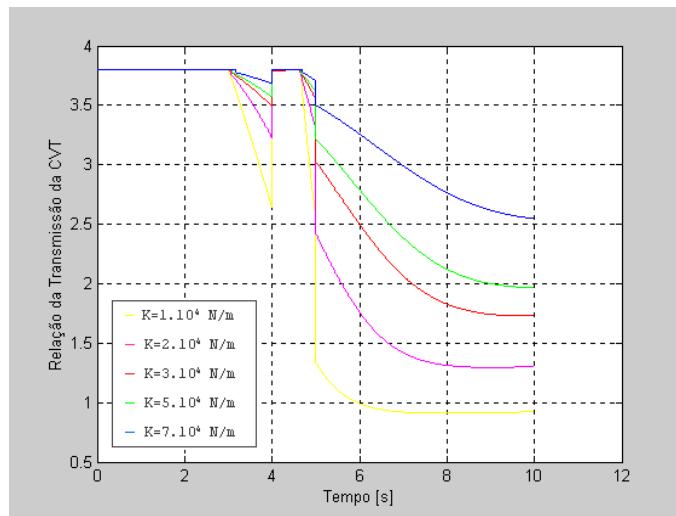


Figura 10. Relação de transmissão da CVT variando-se o K da mola da polia movida.

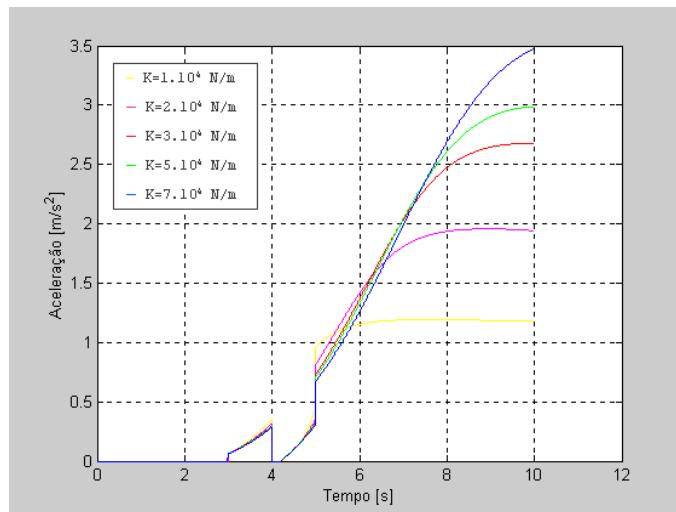


Figura 11. Gráfico da aceleração do veículo variando-se o K da mola da polia movida.

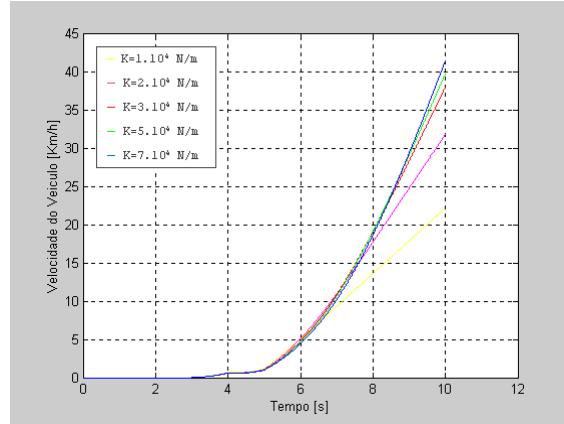


Figura 12. Gráfico da velocidade do veículo variando-se o K da mola da polia movida.

Verificou-se que diminuindo o coeficiente elástico da mola na polia motora, a CVT é acionada mais rapidamente e o conjunto polias-correia é conectado transmitindo mais torque do que quando usou-se molas com coeficiente elástico maiores, fica menos sujeito a patinação da correia nas polias, pois diminui F2 e havendo o equilíbrio das forças F1 e F2 mais rapidamente, o veículo se desloca mais e a velocidade aumenta mais rapidamente devido ao melhor aproveitamento do torque fornecido pelo motor. Aumentando-se o coeficiente elástico da mola o sistema CVT fica mais sensível as variações internas e externas das forças e torques no sistema.

4. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. A.. “Caracterização da Resposta Dinâmica de uma CVT por Polias Expansivas”, Unicamp, Dissertação de Mestrado, Julho de 2003.

MORAIS, R. F.. “Simulação de Desempenho Veicular Utilizando a Metodologia Holmes”, Unicamp, Trabalho de Graduação, Janeiro de 2001.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído este trabalho.

CHARACTERIZATION OF THE DYNAMIC ANSWER OF A CVT FOR EXPANSIVE PULLEYS

Alfredo Alves de Albuquerque

UNICAMP - State University of Campinas - Post office 6051 - Campinas - SP - 13083-970,
alfredosan@fem.unicamp.br

Franco Giuseppe Dedini

UNICAMP - State University of Campinas - Post office 6051 - Campinas - SP - 13083-970,
dedini@fem.unicamp.br

Abstract. The formularizations and equations of motion are presented that represent the interactions and the dynamic behaviors of the some components of a system of transmission of a vehicle composing itself in: engine to the internal combustion, a CVT of pulleys and leather strap, a planetarium, differentials, wheels and the vehicle properly said.

Keywords. Equations of motion, CVT, Variators of speed, Behaviour, Functioning.