

# BANCADA DE TESTES DIDÁTICA PARA ANÁLISE DINÂMICA DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO VEICULAR TIPO CVT- *Continuously Variable Transmission*

**Marcelo de J. R. da Nóbrega**<sup>1</sup> - [engmarcelocefet@ig.com.br](mailto:engmarcelocefet@ig.com.br)

CEFET/RJ, Departamento de Pós-Graduação em Tecnologia

20271-110-Rio de Janeiro-RJ

**Fernando R. da Silva** - [d4fernan@ime.eb.br](mailto:d4fernan@ime.eb.br)

IME, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

22290-270- Rio de Janeiro-RJ

**Leydervan de S. Xavier**<sup>1</sup> - [xavierls@cefet-rj.br](mailto:xavierls@cefet-rj.br)

**Paulo P. Kenedi**<sup>1</sup> - [pkenedi@cefet-rj.br](mailto:pkenedi@cefet-rj.br)

**Ricardo A.A. de Aguiar**<sup>1</sup> - [raaguiar@cefet-rj.br](mailto:raaguiar@cefet-rj.br)

**Aramis X. Rangel**<sup>1</sup> - [aramis@cefet-rj.br](mailto:aramis@cefet-rj.br)

**Resumo:** *O presente trabalho relata a proposta de integração entre a pesquisa aplicada e o ensino de graduação no CEFET/RJ. O projeto e o desenvolvimento de uma Bancada de Testes Didática, relacionada a uma dissertação de mestrado inserida em uma linha de pesquisa da instituição está sendo utilizada como recurso de ensino e pesquisa para os alunos da graduação em engenharia vinculados ao Projeto SAE Mini Baja. O experimento consiste em instrumentar um sistema de transmissão tipo CVT (Continuously Variable Transmission), obtendo dados de desempenho típico, necessários para o projeto de sistemas veiculares. Foram desenvolvidos modelos dinâmicos baseados na metodologia de caráter multidisciplinar denominada Grafos de Ligação (Bond Graphs) e realizada a análise dos resultados experimentais e numéricos. Este experimento dá sustentação ao desenvolvimento tecnológico dos protótipos seguintes e ao aprendizado de modelos avançados para os futuros engenheiros. Por outro lado, evidencia o compromisso das pesquisas conduzidas no Mestrado em Tecnologia do CEFET/RJ com uma aplicação tecnológica imediata. O referido sistema é capaz de reduzir as emissões veiculares, diminuir o número de componentes e subsistemas do veículo, bem como aumentar o seu rendimento global permitindo assim um menor consumo de energia.*

**Palavras-chave:** *Dinâmica veicular, Grafos de ligação, Modelagem, Otimização.*

## 1-INTRODUÇÃO

O conhecimento relativo a dinâmica do sistema CVT - *Continuously Variable Transmission*, e as respectivas implicações de seu funcionamento tem sido um obstáculo freqüente para os alunos do curso de engenharia que participam do Projeto SAE (Society of Automotive Engineering) Mini Baja nos últimos anos. Praticamente este tipo de transmissão vem sendo utilizada desde 1999, nestas competições que são promovidas anualmente pela PETROBRAS e pela SAE, onde alguns poucos carros possuíam este sistema. Em 2004 a competição, que registrava cerca de 77 equipes de diferentes estados do Brasil, teve 90% destas utilizando a transmissão CVT como parte de sua transmissão.

Dentre as equipes do estado do Rio de Janeiro que utilizavam esta transmissão pode-se destacar: o CEFET/RJ, PUC Rio e UFF, ilustrado na figura 1. Cabe ressaltar que a grande maioria das equipes observadas na presente edição do encontro não obteve bons resultados nas regulagens dos parâmetros do referido sistema de transmissão.



Figura 1- Mini Baja da equipe ZEROVINTEUM do CEFET/RJ

Alguns trabalhos tratam da simulação da dinâmica do sistema CVT, como Albuquerque (2003) e Speranza (2003), ambos referentes a simulações numéricas através do programa comercial MatLab. Entretanto há poucos trabalhos que retratam a parte experimental e as medições das variáveis de desempenho, como em Chen (1996).

O presente trabalho integra o modelo e as simulações numéricas realizadas através da metodologia dos Grafos de Ligação e o programa comercial MatLab, associando-as ao projeto da bancada de testes didática, de modo que seja possível a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no processo e suas respectivas medições de torque e velocidade angular, a fim de comparar os modelos obtidos numericamente e os resultados experimentais.

## 2-PROJETO DE BANCADA DE TESTES DIDÁTICA

O objetivo principal da bancada de testes didática é proporcionar aos alunos de graduação envolvidos no Projeto SAE Mini Baja uma melhor compreensão da dinâmica do sistema CVT. O desenho esquemático ilustrado na figura 2 representa os principais componentes da bancada de testes didática.

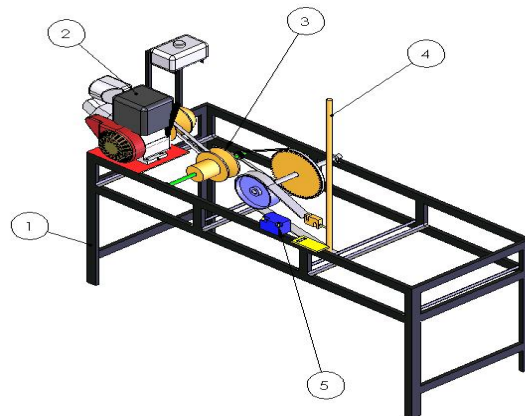


Figura 2- Desenho ilustrativo da Bancada de Testes Didática

De acordo com a numeração apresentada na figura 2, os principais componentes da bancada de testes didática são:

1. Estrutura
2. Motor 8 HP
3. CVT e redução fixa por engrenagens
4. Sistema de freio
5. Instrumentação

### **2.1-Estrutura**

A estrutura foi projetada de modo a permitir a instalação do motor, sistema de transmissão e frenagem juntamente com a instrumentação.

### **2.2 – Motor**

O motor de combustão interna utilizado é o “Briggs & Stratton” de 8 HP, que é similar ao motor utilizado nas atuais competições SAE de Mini Baja, sendo a única diferença a potência nominal do motor que é de 10 HP, ilustrado na figura 3 .



Figura 3-Motor de 10 HP da “Briggs & Stratton”

### **2.3 – CVT e redução fixa por engrenagens**

A CVT utilizada é tipo polia expansiva COMET 780, conforme Figura 3.

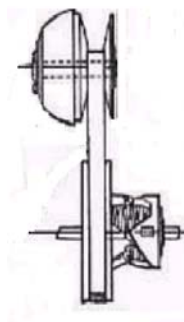


Figura 4 – CVT tipo polia expansiva

As engrenagens utilizadas e correntes utilizadas permitem uma relação de transmissão fixa de 6/1, com intuito de aumentar o torque disponível ao sistema de transmissão.

## 2.4 - Sistema de freio

Este sistema é do tipo freio de cinta acionado manualmente por uma alavanca, conforme Provenza (1990), sendo acoplado à bancada para permitir a realização de medidas de torque disponibilizada ao sistema, conforme apêndice. Foi utilizada uma célula de carga tipo “S” em série à cinta de freio para medição de força, transformada posteriormente em torque, conforme Figura 5 e apresentado na equação 1.

$$T = \frac{F \cdot X_2 \cdot D}{2 \cdot X_1} \quad (1)$$

onde:

T- Torque calculado

F- Força aplicada pelo operador

D- Diâmetro da polia

X1, X2 – Braços da alavanca

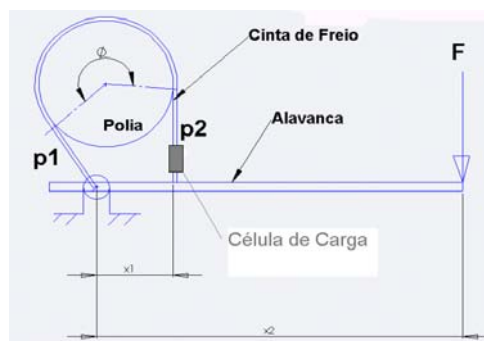


Figura 5 – Sistema de freio da bancada de testes

## 2.5 – Instrumentação

Este sistema de instrumentação foi disposto de modo que seja possível a medição de torque e velocidade angular, conforme figura 6. O sistema é composto basicamente por:

- Bateria 12 V
- Célula de carga tipo “S ”
- Tacômetro a laser
- Multímetro de 3,5 dígitos

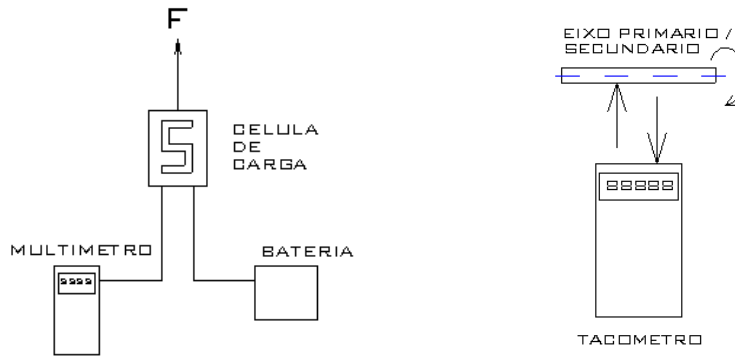


Figura 6 – Funcionamento da instrumentação da bancada de testes

### 3-METODOLOGIA

A metodologia utilizada para obtenção dos modelos matemáticos foi a de Grafos de Ligação. Aplicando a notação, segundo Karnopp (1983), no modelo físico do sistema mecânico da bancada de testes, ilustrado na figura 7a, chega-se ao seguinte Grafo de Ligação do sistema, conforme figura 7b

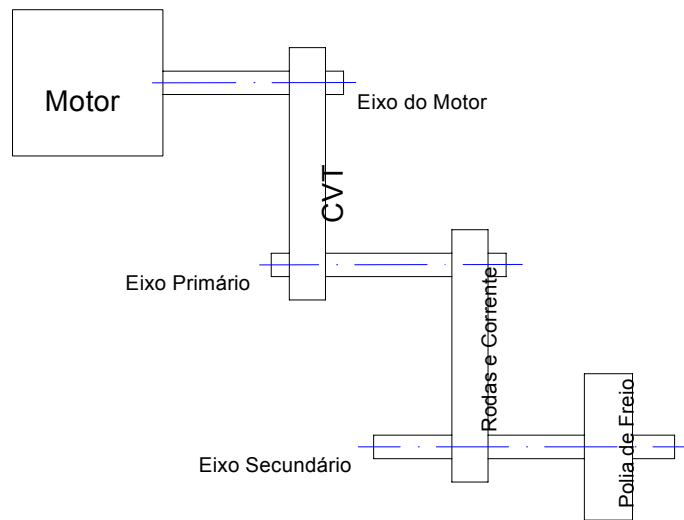


Figura 7a – Modelo físico do sistema mecânico da Bancada de Testes

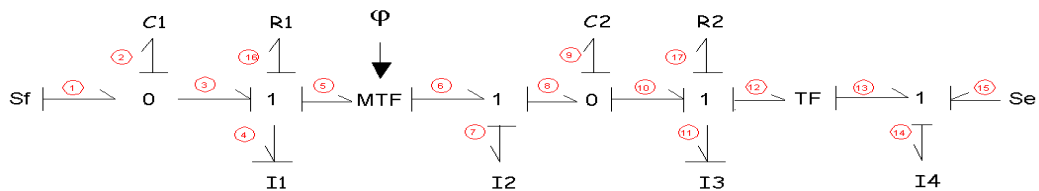


Figura 7b – Grafo de Ligação do sistema mecânico da Bancada de Testes

Onde:

Sf – Fonte de fluxo, representando o motor de combustão interna de 8 HP.

C1 e C2 – Capacitores, representando o efeito de rigidez dos eixos.

I1, I2, I3 e I4 – Inércias, representando o efeito das inercias das rodas dentadas e polias.

R1 e R2- Resistência imposta pelos mancais de rolamento

$\varphi$  – Relação de transmissão, representa a relação de transmissão variável da CVT. Adotando a relação de transmissão ( $\varphi_{cvt}$ ) segundo SPERANZA(2003), tem-se a equação 2:

$$\varphi_{cvt} = \begin{cases} 0 & \text{para } rpm < 800 \\ 0.333 + \left( \frac{1.1(rpm - 800)}{2800} \right) & \text{para } 800 < rpm < 3600 \\ 1.433 & \text{para } rpm > 3600 \end{cases} \quad (2)$$

TF – Transformador, representa a relação fixa entre as rotações.

MTF – Transformador modulado, representa a relação variável entre os fluxos (velocidades).

Se – Fonte de esforço, representando o torque resistivo imposto as rodas e/ou resistência aerodinâmica do veículo.

Com este Grafo de Ligação obtém-se o sistema de equações (3) de estado do sistema.

$$\begin{aligned} \dot{q}_2 &= f_1 - \left( \frac{1}{I_1} \right) p_4 \\ \dot{q}_9 &= \left( \frac{1}{\varphi_{cvt} I_1} \right) p_4 - \left( \frac{1}{I_3} \right) p_{11} \\ \dot{p}_4 &= \frac{I_1}{I_2 \varphi_{cvt}^2 + I_1} \left[ \left( \frac{1}{C_1} \right) q_2 - \varphi_{cvt} q_9 \right] - \frac{R_1}{(I_2 \varphi_{cvt}^2 + I_1)} p_4 \\ \dot{p}_{11} &= \frac{I_3 R_4^2}{I_4 R_3^2 + I_3 R_4^2} \left[ \left( \frac{1}{C_2} \right) q_9 - \left( \frac{R_3}{R_4} \right) e_{15} \right] - \frac{R_2 R_4^2}{(R_3^2 I_4 + R_4^2 I_3)} p_{11} \end{aligned} \quad (3)$$

As variáveis de saída de interesse são as velocidades angulares dos eixos primário e secundário e o torque do eixo secundário.

O procedimento utilizado para as medições relativas à parte experimental se baseiam nas grandezas de velocidade angular e torque, realizadas com tacômetro a laser e célula de carga tipo “S” acoplada à cinta de freio, respectivamente.

Sendo assim serão fixados alguns valores de velocidades angulares do motor e realizadas as medições nos eixos da polia movida e também da polia de freio, sendo esta ultima acoplada a célula de carga tipo “S” para medições de força que disponibilizada pelo motor a partir desta leitura calcular o torque na polia, uma vez que já é conhecido o raio.

## 4-RESULTADOS

Os resultados numéricos foram divididos em três casos. O caso 1 estabelece uma relação de transmissão igual a zero. O caso 2 retrata uma situação intermediária e por fim o caso 3 relata a maior relação de transmissão obtida no modelo adotado para a CVT. Com isto é possível observar as diferentes respostas das rotações dos eixos primário e secundário do sistema de transmissão.

### Caso 1 -Rotação do motor $f_1$ de 70 rad/s

A figura 7a ilustra a rotação do motor ( $f_1$ ) de 70 rad/s que é constante em relação ao tempo, com isto foi possível calcular a relação de transmissão ( $\phi_{cvt}$ ) segundo SPERANZA (2003), sendo esta relação nula, conforme ilustrado na figura 7b. Portanto neste caso a CVT não está transmitindo velocidade ou torque para o sistema.

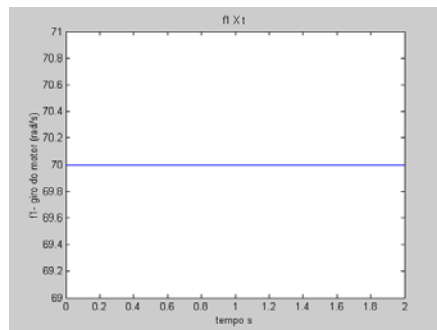


Figura 7a-  $f_1$  X t

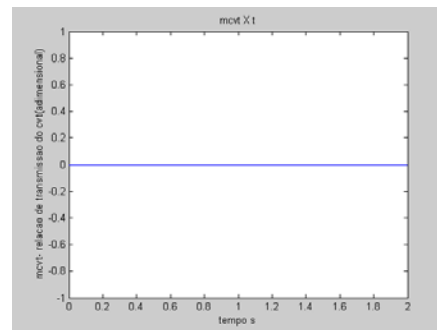


Figura 7b-  $\phi_{cvt}$  X t

A figura 7c ilustra a rotação ( $f_6$ ) do eixo primário da polia movida. A figura 7d apresenta a rotação no eixo secundário ( $f_{13}$ ), tendo encontrado para esta um valor próximo de zero.

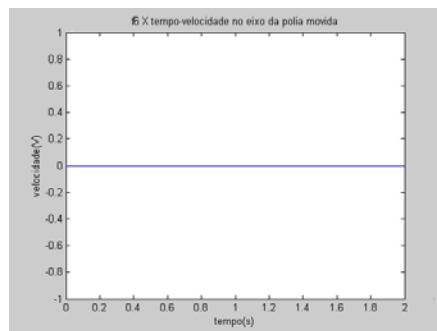


Figura 7c-  $f_6$  X t

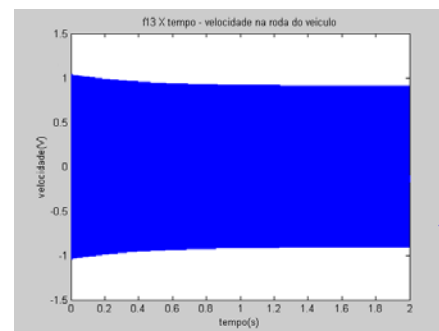


Figura 7d-  $f_{13}$  X t

## Caso 2 -Rotação do motor f1 de 180 rad/s

A figura 8a ilustra a rotação do motor (f1) de 180 rad/s, que é constante em relação ao tempo, com isto foi calculado a relação de transmissão ( $\phi_{cvt}$ ) segundo SPERANZA (2003), sendo esta igual 0.73 conforme ilustrado na figura 8b. Portanto, neste caso a CVT está transmitindo parte da energia para o sistema.

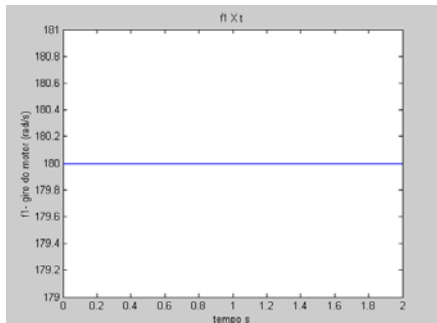


Figura 8a- f1 X t

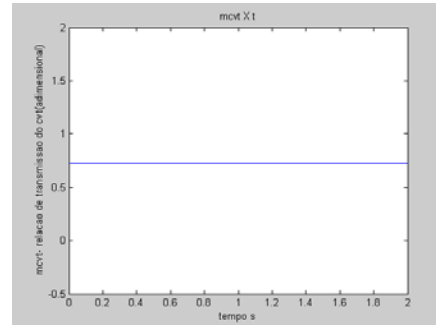


Figura 8b-  $\phi_{cvt}$  X t

A figura 8c ilustra a rotação (f6) do eixo primário da polia movida e a figura 8d apresenta a rotação no eixo secundário (f13).

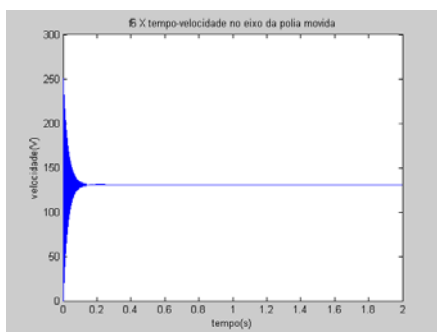


Figura 8c- f6 X t

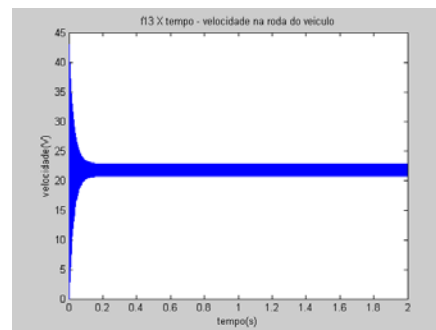


Figura 8d- f13 X t

## Caso 3 -Rotação do motor f1 de 360 rad/s

Nesta configuração a figura 9a ilustra a rotação do motor (f1) de 170 rad/s, que é constante em relação ao tempo. Baseado nisto calculou-se a relação de transmissão ( $\phi_{cvt}$ ), segundo SPERANZA (2003), sendo esta igual 1.43 conforme ilustrado na figura 9b. Portanto neste caso a CVT está com a maior relação de transmissão permitida.

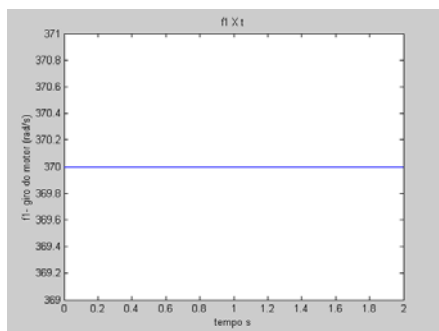


Figura 9a- f1 X t

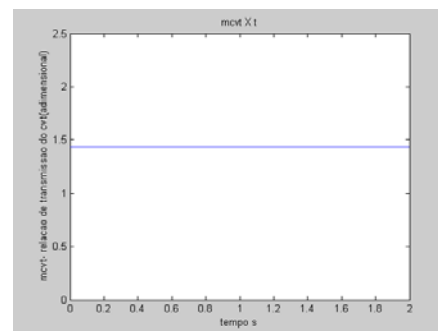


Figura 9b-  $\phi_{cvt}$  X t



A figura 9c ilustra a rotação ( $f_6$ ) do eixo primário da polia movida e a figura 9d apresenta a rotação no eixo secundário ( $f_{13}$ )

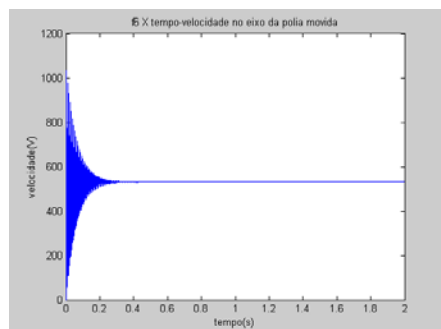


Figura 9c-  $f_6$  X t

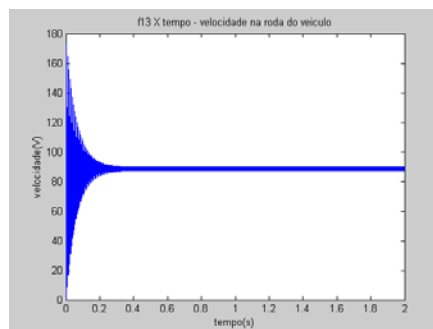


Figura 9d-  $f_{13}$  X t

Os resultados experimentais esperados nas medições de velocidade angular e torque devem apresentar um desvio de 10 a 15% da simulação numérica obtida, devido ao elevado número de fatores que exercem influência sobre o modelo dinâmico proposto, tais como:

- o Fator de fricção  $f$  adotado é fixo e igual a 0,3, de acordo com um valor médio segundo Albuquerque(1974).
- o O equacionamento simplificado do sistema de freio não leva em consideração, dentre outros aspectos, a deformação da cinta de freio.
- o O ângulo de abraçamento  $\theta$  varia conforme a aplicação de carga, o que é tratado no modelo estático como sendo constante.
- o A vibração proveniente do motor de combustão interna dificulta a medição de rotação com o tacômetro a laser

## 5-CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Através dos resultados obtidos para o caso 1 conclui-se que não houve transmissão de velocidades ou torques pela CVT. Entretanto a rotação observada no eixo secundário é fruto do torque aplicado na polia e o efeito de rigidez dos eixos.

O caso 2 apresenta o funcionamento da CVT parcialmente, o que permite constatar que houve transmissão de movimento pela CVT. O eixo primário apresentou um transiente da ordem de 0,1 segundo e após este instante se manteve constante. Já no eixo secundário houve este mesmo transiente, mas a partir de 0,1 segundo observa-se uma estabilização do sistema em torno de 22 rad/s.

No caso 3 a CVT está funcionando com a relação de transmissão que disponibiliza ao sistema o torque máximo.

Observa-se, portanto, a relevância tanto da metodologia de Grafos de Ligação em sistemas mecânicos para formação do futuro engenheiro, quanto para o aprendizado proporcionado pela respectiva bancada de testes.

O trabalho realizado para o projeto desta Bancada de Teses Didática é fruto dos esforços dos alunos de graduação do curso de Engenharia do CEFET/RJ e dos autores do trabalho, o que mostra a integração do curso de Mestrado em Tecnologia do CEFET/RJ com os alunos do Projeto Mini Baja para a realização de pesquisas aplicadas.

Os trabalhos futuros devem apresentar de forma quantitativa uma comparação entre os resultados experimentais proporcionados pelas medidas realizadas e as simulações computacionais provenientes da metodologia dos Grafos de Ligação.

Conforme ilustrado na figura 2, os elementos da instrumentação foram considerados como ideais, o que pode ser alterado em um próximo trabalho, pois a metodologia dos Grafos de Ligação pode incorporar um modelo dinâmico para a avaliação do respectivo sistema. Outros trabalhos também poderão trazer a contribuição para o ensino e pesquisa, como uma simulação realizada em programa comercial de caráter dinâmico, que podem ser utilizados para caracterizar as respostas desta bancada de testes.

## **6-REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

ALBUQUERQUE, A. A. **Caracterização das Respostas Dinâmicas de uma CVT com Polias Expansivas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas.

ALBUQUERQUE, O. A.L P., **Dinâmica das Máquinas**. McGRAW-HILL.1974.

CHEN, T.F., LEE, D.W., SUNG, C.K., **An Experimental Study on Transmission Efficiency of a Rubber V-Belt CVT**. Mechanism and Machine Theory. 1996.

NETO, M. S. **Desenvolvimento de uma bancada para testes de um sistema com Transmissão Continuamente Variável**. SAE.2003

PROVENZA, Francesco. **Protec – Projetista de Máquinas**. F Provenza, 1990.

ROSENBERG, R.C. e KARNOPP, D.C.. **Introduction to Physical Dynamics**, McGraw Hill, 1983.

## 7-APÊNDICE-Sistema de Freio da Bancada de Testes

### Princípios de Funcionamento

O acionamento do sistema de freio de cinta da Bancada de Testes é representado pela Figura A-1 a seguir, onde se observa que o acionamento é feito por uma pessoa.

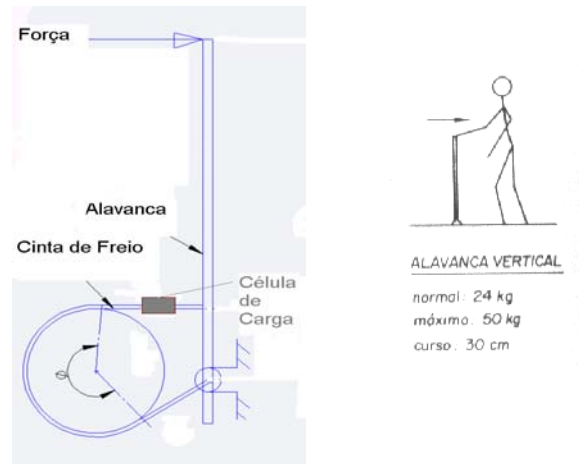


Figura A-1- Esquema de funcionamento do sistema de freio de cinta e esforços exercidos pelo operador do sistema de frenagem

Para a configuração imposta para o acionamento existe uma recomendação de esforços nos comandos, conforme PROVENZA(1990) ilustra na Figura A-1, sendo assim estabelecido como condição de operação que a força não ultrapasse 500 N um curso de 30 cm.

**DIDACTIC TESTS BENCH FOR DYNAMIC ANALYSIS OF A VEHICULAR  
TRANSMISSION SYSTEM WITH CVT -  
*Continuously Variable Transmission***

**Abstract:** *The present work tells the integration proposal between the applied research and the graduation teaching in CEFET/RJ. The project and development of a Didactic Tests Bench, related to a Master's Degree dissertation inserted in a line of research of the institution, are being used as teaching and research resources for graduation engineering students linked to the SAE Mini Baja Project. The experiment consists in implementing a system of transmission type CVT (Continuously Variable Transmission), obtaining data of typical acting, necessary for the project of vehicular systems. Dynamic models based on methodology of multidisciplinary character denominated Bond Graphs were developed and analysis of experimental and numeric results were realized. This experiment gives support to technological development of the following prototypes and learning of advanced models for the future engineers. On the other hand, it evidences the commitment of the researches driven in the Master's Degree in Technology Course of CEFET/RJ with an immediate technological application. The referred system is capable of reducing the vehicular emissions, decreasing the number of components and subsystems of the vehicle, as well as increasing its global efficiency allowing a smaller consumption of energy.*

**Keywords:** *Vehicular dynamics, Bond Graphs, Modelling, Optimization.*