

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de um modelo dinâmico do processo de acoplamento de uma  
embreagem magnética

por

João Paulo Bienert Masiero

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2012.

Desenvolvimento de um modelo dinâmico do processo de acoplamento de uma  
embreagem magnética

por

João Paulo Bienert Masiero

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cintia C. Petry Mazzaferro

Porto Alegre, 15 de junho de 2012.

MASIERO, J. P. B. **Desenvolvimento de um modelo dinâmico do processo de acoplamento de uma embreagem magnética**. 2012. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## RESUMO

Este trabalho trata da simulação computacional de uma embreagem de acionamento eletromagnético presente em uma bancada experimental utilizada em testes de eficiência energética de motores elétricos. A modelagem do sistema de acoplamento passa por três etapas distintas: modelagem teórica magnética, modelagem teórica mecânica e implementação numérica-computacional. Nas duas primeiras etapas, é apresentada toda teoria envolvida no processo de acoplamento, nos âmbitos magnético e mecânico, enquanto na terceira é definida completamente a dinâmica de interação entre as diversas variáveis consideradas no pacote computacional Matlab/Simulink®. Tendo a modelagem sido completada, parte-se para a medição experimental dos diversos parâmetros considerados, para implementação nos referidos modelos. A validação dos modelos teóricos é feita via comparação dos resultados matemáticos com as variáveis intermediárias medidas experimentalmente, enquanto a validação do modelo computacional é feita via comparação do efetivo comportamento do sistema real com os resultados apresentados pelo software. Como resultado final, tem-se que os resultados obtidos nos modelos magnético e mecânico concordam satisfatoriamente com os valores experimentais, e as diferenças encontradas entre o comportamento do modelo computacional e do sistema real aparentam estar relacionadas a problemas na identificação dos parâmetros realizada em trabalhos anteriores, especialmente no que se refere aos momentos de inércia.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem computacional, embreagem magnética, eficiência energética.

MASIERO, J. P. B. **Dynamic model development of a magnetic clutch engaging process.** 2012. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

This work it is about the computational simulation of a electromagnetic clutch actuation present on an experimental stand used on energy efficiency tests of electric motors. The coupling system modeling passed by three distinct stages: theoretical magnetic molding, theoretical mechanic molding and numerical-computational implantation. On the first two stages, all the theory involved on the coupling process is presented, on magnetic and mechanic ambit, as on the third is completely defined the dynamic of interaction between the various variable considered on the computational package Matlab/Simulink®. With the modeling completed, it starts to experiment measurement of the several parameters considerate to implement the referred models. The validation of the theoretical models is made by comparison of the mathematical results with the intermediary variables experimentally measured, while the validation of the computational model is done by comparison of the effective behavior of the real system with the results presented by the software. As the final result, the results obtained on the magnetic and mechanic model agree satisfactorily with experimental values and the differences founded between the behavior of the computational model and the real system, appearing to be related to problems on the identification of the parameters accomplished on previous works, especially referring at the inertial moments.

**KEYWORDS:** Computational modeling, magnetic clutch, energetic efficiency.

## ÍNDICE

|   | Pág. |
|---|------|
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 1    |
| 2. OBJETIVOS .....  | 1    |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....  | 2    |
| 4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO - METODOLOGIA .....  | 3    |
| 4.1. MODELAGEM TEÓRICA .....  | 3    |
| 4.1.1. MODELO MAGNÉTICO .....   | 3    |
| 4.1.2. MODELO MECÂNICO .....  | 4    |
| 4.2. INVESTIGAÇÃO E OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ASSOCIADOS .....  | 5    |
| 4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO ELETROIMÃ .....  | 5    |
| 4.2.1.1. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE VOLTAS DO ENROLAMENTO .....  | 6    |
| 4.2.1.2. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO NÚCLEO .....   | 6    |
| 4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DA PARTE MECÂNICA .....   | 8    |
| 4.2.2.1. COEFICIENTE DE ATRITO .....  | 9    |
| 4.3. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA – INTEGRAÇÃO COM O MODELO DO MOTOR .....  | 10   |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 10   |
| 5.1. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM MAGNÉTICA .....   | 10   |
| 5.2. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM MECÂNICA .....  | 11   |
| 5.3. AVALIAÇÃO DO MODELO INTEGRADO .....  | 12   |
| 6. CONCLUSÕES .....   | 13   |
| 6.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....  | 14   |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 14   |
| APÊNDICE I – SIMULAÇÕES CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE ORDEM DE GRANDEZA PARA O MOMENTO DE INÉRCIA DO ACOPLAMENTO ..... | 16   |
| APÊNDICE II – VISÃO GERAL DO DIAGRAMA DE BLOCOS EM MATLAB/SIMULINK® .....   | 17   |

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem computacional de sistemas complexos vem ganhando força nas últimas décadas. Com a evolução no poder de processamento dos computadores e popularização dessa tecnologia, é crescente o número de softwares que se propõem a fazer a simulação dos mais variados sistemas, não só na área de engenharia como nas demais ciências exatas, biológicas, humanas, economia, geofísica, ciências ambientais, entre outras áreas de interesse.

O presente trabalho está sendo desenvolvido como parte de um projeto de pesquisa em andamento no Laboratório de Mecânica Aplicada e Experimental (LAMAE), filiado ao Departamento de Engenharia Mecânica desta Universidade, que tem por fim estudar as melhores condições de acoplamento mecânico entre motores e cargas sob o ponto de vista da eficiência energética. Em particular, este trabalho pode ser entendido como uma extensão do estudo iniciado por Bonilha, 2011, que construiu um sistema de acoplamento entre um motor elétrico de indução e um conjunto variável de cargas inerciais, com o fim de avaliar as melhores condições de fracionamento da carga no instante da partida do motor.

Com o fim de estabelecer critérios gerais que determinem as condições mais adequadas de acoplamento dos motores em estudo a suas respectivas cargas de forma a aprimorar seus níveis de eficiência energética, o objetivo principal do projeto em que este trabalho se insere é o de desenvolver um modelo teórico-numérico para simulação destes processos de acoplamento.

Dando continuidade à mesma linha de pesquisa e vislumbrando possibilidades de trabalhos futuros, este trabalho se propõe a modelar o mecanismo de acoplamento por embreagem eletromagnética adaptada de um compressor de ar condicionado automotivo utilizada em Bonilha, 2011, com base nos fenômenos mecânicos e eletromagnéticos que regem o funcionamento da mesma. Dessa forma, espera-se contribuir para a obtenção do modelo geral do processo em estudo, de modo a facilitar os próximos estágios da pesquisa em andamento no LAMAE – UFRGS.

## 2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que represente o processo dinâmico de acoplamento de uma embreagem magnética destinada à utilização em uma bancada experimental para estudos de eficiência energética de motores elétricos. O modelo será desenvolvido teoricamente com base nas leis fundamentais da mecânica e do eletromagnetismo e implementado numericamente por meio do pacote computacional Matlab/Simulink®. Uma vez formulado, o modelo será avaliado por comparação com resultados experimentais, obtidos por medição direta na referida bancada experimental. De uma maneira geral, os objetivos parciais do desenvolvimento a que se propõe este trabalho podem ser enumerados da seguinte forma:

- Modelagem dos efeitos magnéticos
- Modelagem dos efeitos mecânicos
- Levantamento experimental/investigação dos parâmetros considerados
- Implementação numérica – integração com o modelo do motor elétrico desenvolvido em um trabalho anterior, também realizado no âmbito do LAMAE-UFRGS (Vechia, 2011)
- Validação – comparação da resposta simulada com a do sistema real

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As embreagens, segundo o conceito sugerido por Oliveira, 1963, são elementos que tem como função principal unir dois corpos com movimento rotativo coaxial, sendo que o fluxo de potência pode ser interrompido a qualquer momento através de condições pré-determinadas ou através do comando humano. No trabalho de Generoso, 2009, encontram-se informações sobre os tipos de acionamento e as aplicações desses sistemas, além de uma classificação das embreagens em seus principais tipos. Andrade, 2012, observa diferentes utilizações para embreagens: “permitem que uma carga de alta inércia seja movimentada por um motor elétrico menor que o que seria necessário se esta fosse diretamente conectada” e “pode ser utilizada como dispositivo de emergência, separando o eixo do motor no caso de emperramento de uma máquina”. Também classifica estes acoplamentos por forma de atuação, forma como transferem energia, além de dar subsídios para o dimensionamento, seleção e especificação destes componentes. Duque, 2005, observa ainda outra função dos sistemas de embreagem atuais, principalmente na área automotiva: o isolamento de vibrações torcionais no processo de combustão. Santos et alli, 2006, desenvolvem um trabalho em torno dos principais cuidados a serem tomados durante o desenvolvimento de um sistema de acionamento de embreagem automotiva, com enfoque principal no conforto e vida útil do conjunto. Finalmente Shigley, 1984, em seu material clássico sobre elementos de máquinas, apresenta toda metodologia de cálculo referente a freios e embreagens, tópicos relacionados à seleção de materiais, além de fazer considerações sobre energia dissipada nesses componentes.

Mais especificamente com relação à modelagem de sistemas de acoplamento desta natureza, Lhomme et alli, 2008, desenvolvem uma comparação entre diferentes métodos de modelagem de trens de potência na simulação computacional de sistemas de embreagem e suas características e Serrarens et alli, 2007, apresentam a modelagem de um sistema de embreagem automotiva, objetivando o desenvolvimento de um controle com foco na otimização e suavização do momento de acionamento.

Justificando a escolha pelo desenvolvimento deste trabalho em específico, o contexto deste trabalho se dá, como já mencionado, como parte de um projeto de pesquisa em andamento no Laboratório de Mecânica Aplicada e Experimental da UFRGS, que tem por fim estudar, do ponto de vista da eficiência energética, as melhores condições de acoplamento mecânico entre motores e cargas. Em suma, este trabalho pode ser entendido como uma continuação do estudo iniciado por Bonilha, 2011, que construiu um sistema de acoplamento entre um motor elétrico de indução e um conjunto variável de cargas inerciais, com o fim de avaliar as melhores condições de fracionamento da carga no instante da partida do motor. O sistema de acoplamento consiste basicamente de uma embreagem eletromagnética adaptada de um compressor de ar condicionado automotivo. Os testes realizados no referido trabalho apontam para uma redução em até 25% da energia consumida em função da escolha adequada do método de fracionamento, mas essa constatação foi obtida exclusivamente por meios empíricos, de modo que os estudos realizados até o momento no âmbito do LAMAE – UFRGS ainda carecem de fundamentação teórica adequada, que ajude a prever tais níveis de economia de forma generalizada. Ainda dentro do contexto do mesmo projeto, Vechia, 2011, fez uma modelagem simplificada do motor elétrico e seu sistema de acionamento, levando em consideração fatores tanto elétricos quanto mecânicos. No entanto, o mesmo autor encontrou grandes dificuldades para a realização da validação experimental do modelo proposto, de modo que o mesmo não pode ser considerado como plenamente validado. Citando outros trabalhos realizados recentemente no mesmo laboratório e dentro da mesma linha de pesquisa, Magalhães, 2011, levantou curvas de rendimento de um sistema de transmissão mecânica fazendo variar dois parâmetros de interesse: a relação de transmissão e o alinhamento axial da corrente. Também Aguiar, 2011, fez um estudo dos efeitos da lubrificação num sistema de transmissão por corrente.

## 4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO - METODOLOGIA

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho passa por três etapas: equacionamento do modelo teórico (modelagem magnética e mecânica), investigação dos parâmetros considerados e implementação numérica/integração com o modelo do motor. As atividades a serem realizadas nas diferentes fases do estudo são descritas a seguir:

### 4.1. MODELAGEM TEÓRICA

O desenvolvimento teórico do modelo é dividido em duas partes principais: modelagem magnética e modelagem mecânica. A parte magnética abrange toda a parte das variáveis do eletroímã, culminando na obtenção da força de atração magnética  $F_m$ . A parte mecânica do modelo parte desta força que é trabalhada no sentido da obtenção da velocidade de rotação dos discos da embreagem  $\omega_{emb}$ .

O desenvolvimento passo-a-passo do modelo teórico é exposto nas próximas seções.

#### 4.1.1. MODELO MAGNÉTICO

Em geral, a determinação da força de atração entre dois corpos magnetizados é um problema de complexidade significativa, pois depende de fatores como a distribuição espacial do campo magnético e das propriedades dos materiais de que esses corpos e seus contornos são compostos, dentre outros [Guedes, 1983]. Assim, a solução analítica desse problema só pode ser obtida para casos específicos, onde seja possível fazer simplificações baseadas em propriedades de simetria e/ou homogeneidade dos elementos estudados. Para casos mais gerais, deve-se recorrer a métodos numéricos para que uma solução seja obtida, ainda que, conforme Nogueira, 2009, “o cálculo de forças a partir de campos eletromagnéticos é considerado um dos problemas mais difíceis da computação eletromagnética”.

O eletroímã estudado neste trabalho é basicamente um solenoide dotado de um núcleo de ferro. Esta configuração apresenta alto grau de simetria, pois o solenoide é composto de um grande número de espiras de mesmo raio médio, dispostas lado a lado e muito próximas umas das outras. Além disso, tanto o núcleo do solenoide como os discos de inércia a serem acoplados são feitos de aço, um material de permeabilidade magnética  $\mu$  significativamente maior que a permeabilidade do vácuo  $\mu_0$ . Desta forma, o campo magnético gerado pode ser considerado como inteiramente confinado e com intensidade uniforme em todos os pontos no interior de seu núcleo ferromagnético, tal como ilustrado na figura 4.1 [Hawkins, 1914].

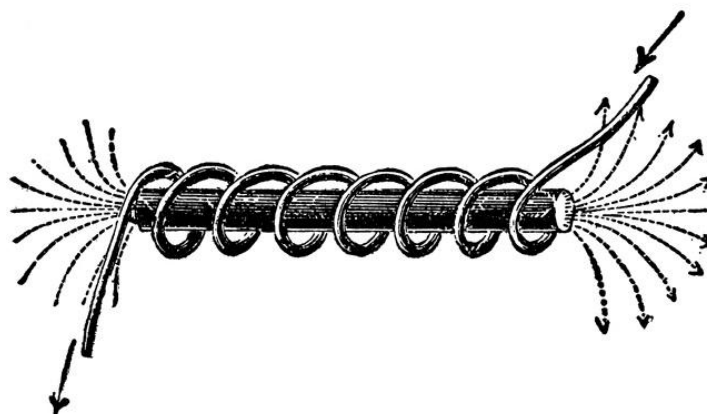


Figura 4.1 - Representação clássica de solenoide ideal [Hawkins, 1914].



Tendo sido essa simplificação realizada, pode-se calcular a densidade de campo magnético  $B$  conforme Nussenzveig, 1997:

$$B = \mu i_0 \frac{N}{L} \quad (4.1)$$

Onde  $B$  é a densidade de campo magnético,  $\mu$  é a permeabilidade do núcleo,  $i_0$  é a corrente de alimentação das espiras,  $N$  é o número de espiras e  $L$  é o comprimento do solenoide.

Com o valor de  $B$  obtido, obtém-se a magnitude da força magnética  $F_m$  segundo o princípio do trabalho virtual, que enuncia que “o trabalho feito por uma força para deslocar um objeto de uma distância  $dl$  é armazenado em forma de energia” [Wentworth, 2006]. Este consiste em deslocar um dos discos da embreagem de um comprimento diferencial  $dl$ , e relacioná-lo a um trabalho diferencial  $dW$  conforme a eq. 4.2:

$$dW = F_m dl \quad (4.2)$$

Considerando também que os discos sejam deslocados entre si à distância  $dl$  e com o eletroímã acionado, existe energia magnética entre eles, definida como [Wentworth, 2006]:

$$W_M = \frac{1}{2} \int B \times H dv \quad (4.3)$$

Onde  $H = B/\mu_0$  é a intensidade do campo magnético na região entre o núcleo do solenoide e o disco secundário da embreagem, cuja substituição na equação anterior resulta:

$$W_M = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dv \quad (4.4)$$

O volume diferencial no integrando da eq. 4.4 pode ser tratado como  $Adl$ . Então, diferenciando-se a mesma expressão, obtém-se:

$$dW_M = \frac{B^2}{2\mu_0} Adl \quad (4.5)$$

Este trabalho é também igual a  $F_m dl$ . Igualando as eqs. 4.2 e 4.5, tem-se expressão da força magnética:

$$F_m = \frac{B^2}{2\mu_0} A \quad (4.6)$$

Esta é a força de atração entre os discos da embreagem, que desloca longitudinalmente o disco secundário em direção ao primário, no sentido do acoplamento.

#### 4.1.2. MODELO MECÂNICO

Tendo sido obtido o valor da força de atração entre os discos da embreagem e conhecendo também o coeficiente de atrito entre eles  $\mu_a$ , o modelo de Coulomb permite determinar a intensidade da força de atrito  $F$  como sendo:

$$F = -\mu_a F_m \text{sgn}(v) \quad (4.7)$$

Onde  $F_m$  é a força magnética já calculada,  $\mu_a$  o coeficiente de atrito entre os discos e  $\text{sgn}(v)$  é a função sinal da velocidade relativa de deslizamento entre os discos. Combinando-se esta

expressão com o do raio efetivo do sistema  $r_e$ , obtém-se o torque de acoplamento entre os discos primário e secundário da embreagem  $T$  conforme equação 4.8 (o raio efetivo é a média entre raio externo e interno do contato entre os discos):

$$T = Fr_e \quad (4.8)$$

Finalmente, a velocidade de rotação da carga acoplada ao secundário é o resultado da integração no tempo da aceleração angular, definida como a razão entre o torque de acoplamento e o momento de inércia da mesma carga, isto é:

$$\omega_{emb} = \int \frac{T}{J} dt \quad (4.9)$$

## 4.2. INVESTIGAÇÃO E OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ASSOCIADOS

A efetiva representação física do modelo computacional depende da correta obtenção da magnitude dos diversos parâmetros associados. Nesse capítulo, são ilustrados os procedimentos de medição das variáveis consideradas.

### 4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO ELETROIMÃ

O eletroímã é caracterizado basicamente por três parâmetros: (i) o comprimento  $L$  do solenoide (que não deve ser confundido com comprimento total  $l$  do fio que compõe o enrolamento); (ii) o número de espiras; (iii) a permeabilidade magnética do núcleo. Além destes três parâmetros fixos, a intensidade do campo magnético também depende da corrente elétrica que percorre o enrolamento quando acionado. Os valores destes parâmetros estão apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros que caracterizam o eletroímã

| Parâmetro                                  | Valor   |
|--|---------|
| Comprimento solenoide (m)                  | 0,02467 |
| Número de espiras                          | 249     |
| Permeabilidade magnética relativa estimada | 60,8    |
| Corrente de alimentação da bobina (A)      | 2,62    |

Tanto o comprimento  $L$  do solenoide como sua corrente de alimentação puderam ser medidos diretamente. Para medir-se  $L$  foi usado um paquímetro, enquanto a corrente elétrica foi medida por meio de um amperímetro. Os outros dois parâmetros precisaram ser obtidos indiretamente, a partir dos valores de parâmetros auxiliares, conforme descrito a seguir.

#### 4.2.1.1. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE VOLTAS DO ENROLAMENTO

A identificação do número de voltas foi baseada na medição da resistência elétrica  $R$  da bobina. De acordo com Nussenzveig, 1997, essas duas quantidades são relacionadas por meio da expressão:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (4.10)$$

Onde  $\rho$  é a resistividade do material (cobre),  $l$  é o comprimento total do fio enrolado, e  $A$  é a área de seção reta do fio. Com essa expressão, é possível isolar o valor de  $l$  em função dos demais parâmetros, que são tabelados ou podem ser medidos diretamente. A resistência do enrolamento foi medida com um ohmímetro digital. A área foi estimada a partir do diâmetro do fio, medido com o mesmo paquímetro usado na medição de  $L$ . A resistividade do cobre é um valor tabelado, obtido de Wentworth, 2006, tabela E.1, e vale  $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$ .

A partir do comprimento de fio enrolado, e com a medição do raio médio  $r$  do enrolamento, o número de voltas do solenoide é:

$$N = \frac{l}{2\pi r} \quad (4.11)$$

Daí, chega-se a um valor de 249 espiras. Este valor é coerente, já que uma inspeção prévia do dispositivo apontava um valor por volta de 300 espiras.

#### 4.2.1.2. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO NÚCLEO

O equacionamento matemático desenvolvido na Seção 4.1.1 é baseado em uma suposição simplificadora importante, que considera o núcleo do indutor completamente preenchido por um único material de permeabilidade conhecida. No caso do sistema em estudo neste trabalho, porém, a região no interior do solenoide é preenchida por diversas peças de diferentes materiais. A alternativa encontrada foi de continuar a considerar que o núcleo é inteiramente composto de material ferromagnético, mas, para o cálculo da equação 4.6, utilizar apenas a área do eixo primário da embreagem. A aproximação do núcleo composto de um único material ferromagnético e uniforme é fundamentada em três motivos: 1- embora feitas de materiais diferentes entre si, todas as peças são compostas de variedades diversas de aço, de modo que seus teores de ferro e suas permeabilidades são de grandeza similar; 2- as peças são encaixadas de forma bastante justa, de modo que os espaços “vazios” entre as mesmas são muito pequenos, conforme ilustrado nas figuras 4.2a e 4.2b; 3 - como se pode verificar a seguir nesta mesma seção (veja a eq. 4.14 e comentários subsequentes), a intensidade magnética gerada pelo solenoide tem valor relativamente elevado, de modo que seu núcleo está *saturado*. Nessas condições, a permeabilidade do núcleo é apenas algumas dezenas de vezes maior que a do ar, em contraste com a condição *não saturada* (onde a permeabilidade do aço é milhares de vezes maior que a do ar), e o valor de  $B$  apresenta variações relativamente pequenas em função da magnitude de  $H$ , como pode ser verificado na figura 4.4. Quanto ao emprego somente da área interna da embreagem para o cálculo da força magnética, esse procedimento se justifica pelo fato de que somente esta área faz contato direto com o disco secundário da embreagem, de modo que tanto a força magnética como o torque de atrito correspondente se manifestam apenas na região de contato entre essas duas peças.

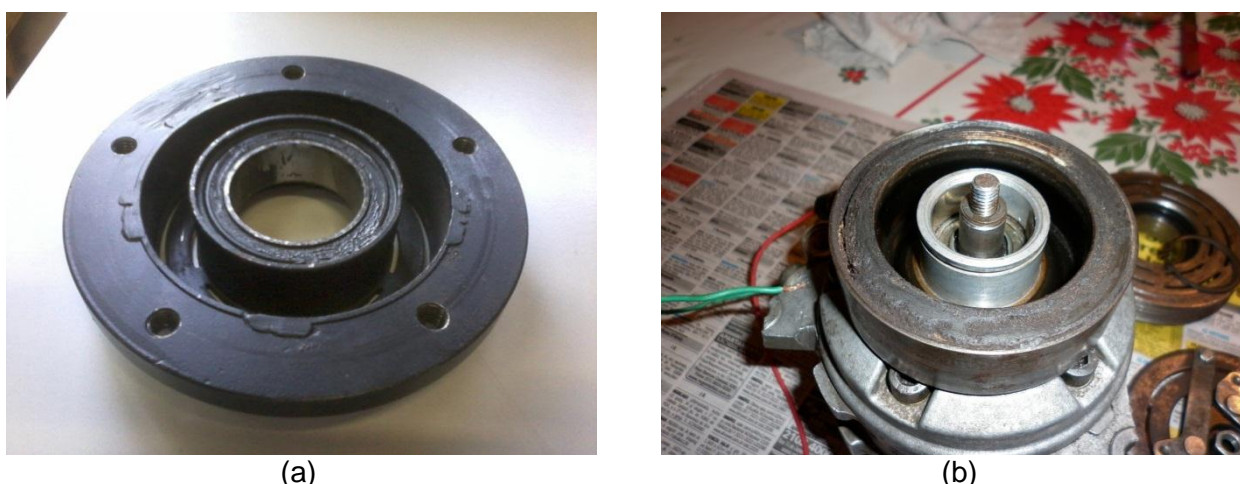


Figura 4.2 – (a) Disco da embreagem desmontado – peça atua como núcleo do solenoide (o indutor é encaixado no anel interior da peça), e (b) - Configuração do indutor instalado no equipamento, sem o disco.

A identificação da permeabilidade magnética foi então feita apoiada na igualdade proposta por Fitzgerald, 2003, para a força magnetomotriz resultante da atuação de um solenoide (eq. 4.12):

$$F = Ni = H_n l_n \quad (4.12)$$

Onde  $N$  é o número de espiras da bobina,  $i$  a corrente de alimentação,  $H_n$  o valor do campo magnético gerado no núcleo do enrolamento e  $l_n$  o comprimento do solenoide. Rearranjando a equação 4.12, chega-se a:

$$H_n = \frac{Ni}{l_n} \quad (4.13)$$

De onde se obtém que o valor do campo magnético gerado é de  $26.210,5A \times \text{volts}/m$ .

Considerando também efeitos de histerese, a alternativa encontrada é utilizar uma curva de magnetização, também chamada *curva de histerese magnética*. Este tipo de curva relaciona o campo magnético  $H$  e a densidade de campo magnético  $B$ , levando em conta a inconstância da permeabilidade do material quando da variação no campo ao qual este está submerso. Uma curva de histerese magnética de um aço típico pode ser vista na figura 4.3:

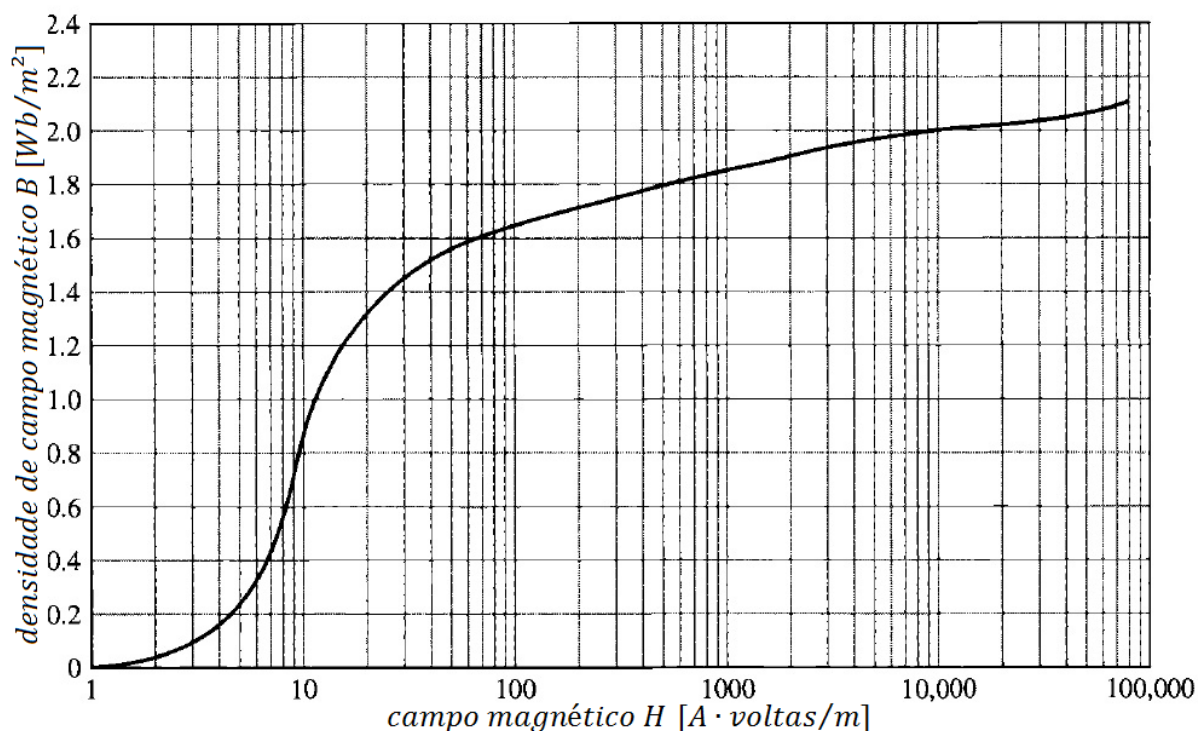


Figura 4.3: Representação do fenômeno de *histerese magnética* [adaptado de Fitzgerald, 2003].

Assim, observa-se que o valor de  $H$  encontrado corresponde a uma densidade de campo magnético  $B$  igual a  $2,02 \text{ Wb}/m^2$ , e o valor da permeabilidade magnética  $\mu$  também pode então ser calculado de acordo com a equação 4.14 [Wentworth, 2006]:

$$\mu = \frac{B}{H_n} \quad (4.14)$$

#### 4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DA PARTE MECÂNICA

Boa parte dos parâmetros relativos à parte mecânica do sistema foram identificados anteriormente nos trabalhos de Bonilha, 2011 e Vechia, 2011, e seus valores estão listados na tabela 4.2. Além destes parâmetros, também era necessário identificar o valor do coeficiente de atrito seco entre os discos da embreagem. O procedimento relativo a essa identificação é descrito na próxima seção.

Tabela 4.2 - Momentos de inércia rotacional considerados.

| Componente Girante     | Momento de Inércia [ $g \cdot m^2$ ] |
|------------------------|--------------------------------------|
| Eixo e rotor do motor* | 0,25                                 |
| Eixo primário          | 5,83                                 |
| Volante secundário     | 4,4                                  |
| Eixo secundário        | 2,49                                 |

\*dado obtido do fabricante.

#### 4.2.2.1. COEFICIENTE DE ATRITO

O coeficiente de atrito entre os discos da embreagem foi identificado por meio da medição do torque de atrito  $T$  existente entre os mesmos. Este torque de atrito foi medido da seguinte maneira: com a embreagem posicionada de modo que seu eixo ficasse na vertical, uma série de pesos conhecidos foi posicionada sobre o disco secundário. Dessa forma, a força normal aplicada aos discos era conhecida. Com o sistema submetido a essa força normal conhecida, um cabo de aço foi preso a um dos parafusos acoplados ao disco secundário, e a outra extremidade foi amarrada a um balde, que foi pendurado na vertical por meio de uma roldana. Então, derramou-se água de forma lenta no interior do balde, de modo a se aplicar uma carga gradativa que foi aumentada até que se observasse o escorregamento relativo entre os discos. Nesse ponto, o balde era retirado, e a força peso  $F$  medida em uma balança digital. A montagem da bancada para realização do ensaio descrito pode ser vista na figura 4.4.

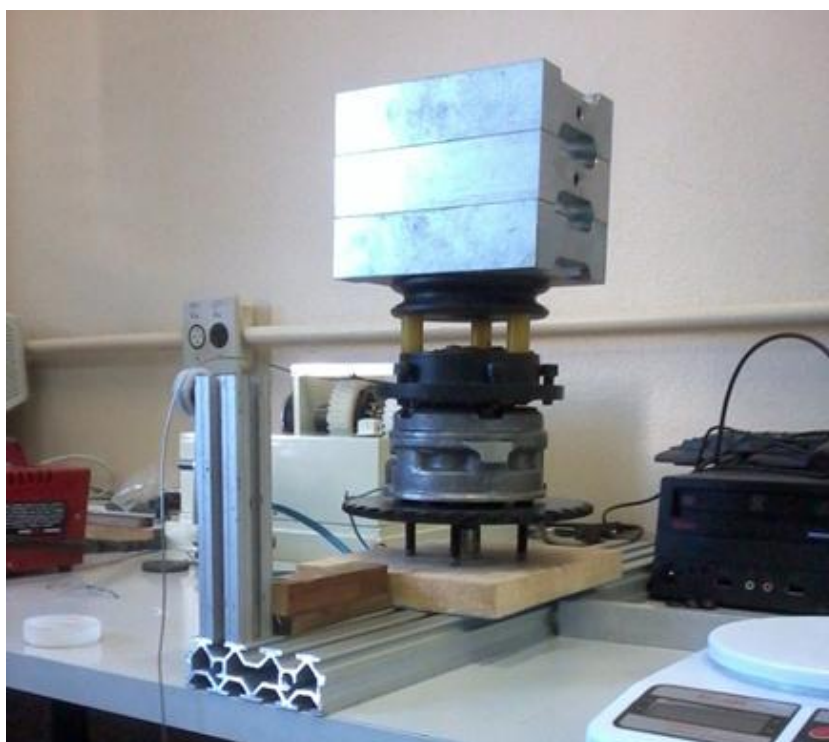


Figura 4.4 - Aplicação de carga de acoplamento do sistema e torque conhecidos para cálculo do coeficiente de atrito

Assim, conhecendo-se o raio de aplicação da força sobre o disco secundário, o balanço dos torques presentes no sistema permite determinar o coeficiente de atrito entre os discos do seguinte modo:

$$\mu_a = \frac{T}{rF} \quad (4.15)$$

Essa medição foi feita três vezes, e considerou-se a média dos valores obtidos. Desta forma, o valor determinado para o coeficiente de atrito foi de 0,1932.

### 4.3. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA – INTEGRAÇÃO COM O MODELO DO MOTOR

Finalizado o equacionamento teórico, partiu-se para a modelagem do sistema em diagrama de blocos no pacote computacional Matlab/Simulink®. Este tipo de abordagem é de grande interesse porque, além de ser de aprendizado e manipulação relativamente simples, os diagramas de blocos possibilitam a avaliação direta das variáveis intermediárias do problema, facilitando a verificação da consistência do modelo e ainda possibilitando qualquer ajuste eventualmente necessário nos parâmetros da simulação.

Nessa etapa, é representada toda a dinâmica de funcionamento do sistema em questão, bem como definida completamente a interação entre os diversos parâmetros considerados. Em particular, o modelo teórico aqui desenvolvido para o acoplamento realizado pela embreagem é integrado com o modelo proposto por Vechia, 2011, que simula o motor elétrico ao qual a embreagem é acoplada. Devido à extensão relativamente grande do diagrama de blocos resultante da integração entre os dois modelos, a figura ilustrando o sistema completo é apresentada no Apêndice II.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A validação do modelo foi feita por partes, com o intuito de satisfazer dois propósitos: (1) verificar os valores relativos à modelagem do acoplamento magnético do sistema de embreagem, de modo a avaliar o grau de fidelidade do modelo específico desenvolvido neste trabalho, (2) verificar o grau de fidelidade do modelo “integrado”, resultante do acoplamento entre o modelo deste trabalho e aquele desenvolvido por Vechia, 2011, com o objetivo de avaliar o projeto desenvolvido no LAMAE-UFRGS em termos mais amplos. Desta forma, espera-se contribuir para a identificação de possíveis deficiências “globais” no projeto em desenvolvimento no referido laboratório, para que as mesmas venham a ser sanadas em trabalhos futuros dentro da mesma linha de pesquisa.

### 5.1. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM MAGNÉTICA

A força de atração entre os discos  $F_m$  foi obtida de maneira indireta, a partir da medição do torque e coeficiente de atrito entre os discos.

O torque  $T$  que o sistema é capaz de transmitir foi medido da seguinte maneira: ao disco secundário da embreagem foi acoplada uma alavanca de comprimento conhecido  $l$ , e o disco primário foi travado de modo que esta alavanca ficasse alinhada com a horizontal. Então, a exemplo do que foi feito no procedimento de identificação do coeficiente de atrito, foi-se aplicando carga na ponta da alavanca, de maneira crescente e gradativa, até que se observasse o escorregamento relativo entre os discos. Nesse ponto, era retirada a carga e medida em uma balança digital a força peso  $F$  presente na ponta da alavanca. Também foi considerado o peso próprio da alavanca, como uma força concentrada em seu centro. Na figura 5.1 pode-se visualizar a referida montagem.

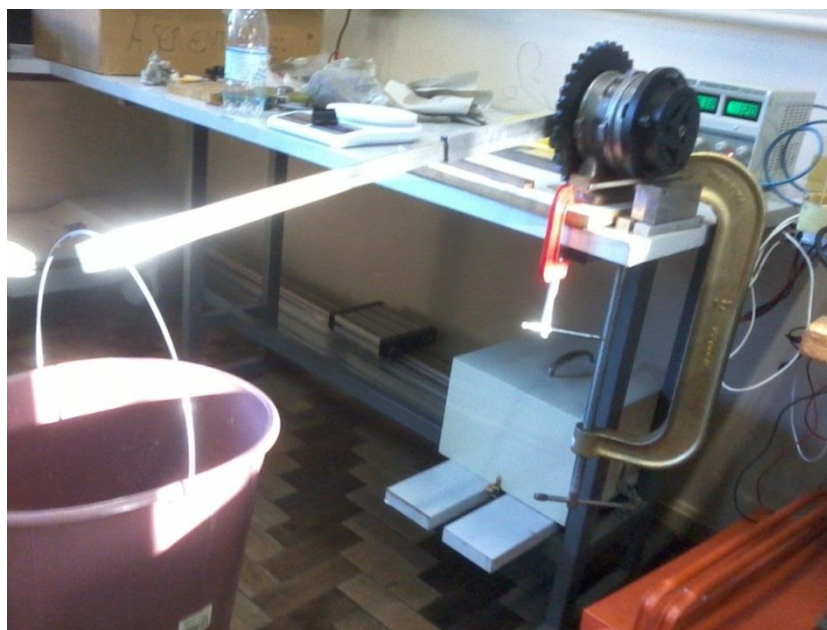


Figura 5.1 - Bancada montada para medição do torque de acionamento do sistema.

Para que o incremento na carga pudesse ser o mais discreto possível, optou-se também por fazer esse carregamento com um balde que era cheio de água, em pequenas quantidades. Procurando também manter a posição de aplicação da carga na barra constante, fez-se ainda um rasgo no braço de alavanca, onde foi encaixada a alça do balde.

Fazendo a multiplicação da carga pelo braço de alavanca conforme eq. 5.1, chega-se ao máximo torque que o sistema é capaz de transmitir até que haja o escorregamento entre os discos.

$$T = F \times l \quad (5.1)$$

Essa medição foi repetida por cinco vezes, e considerou-se a média dos valores obtidos:  $16,73Nm$ .

Depois de obtido o coeficiente de atrito entre os discos e medido o torque que causa o escorregamento do sistema quando do eletroímã acionado, é simples o cálculo da efetiva força de atração magnética entre os discos, com simples rearranjo nos termos da eq. 4.15.

Tendo sido feitas estas considerações, são colocados os valores encontrados na equação 4.6, e é obtido por essa via um valor para a força magnética de  $2444,5N$ , bastante próximo dos  $2304,7N$  efetivamente medidos no equipamento. Esta diferença, em torno de 6%, é aceitável se levamos em conta tanto a quantidade de simplificações que são sugeridas ao longo do equacionamento como as incertezas presentes nos parâmetros identificados. Desta forma, a formulação da modelagem magnética é considerada satisfatória.

## 5.2. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM MECÂNICA

A parte da modelagem mecânica também pôde ser validada coerentemente. A partir do valor da força magnética calculada no item 5.1, segue-se todo equacionamento até o torque de acionamento, variável efetivamente medida. Fazendo-se todos os cálculos, chega-se a um valor para o torque de acionamento de  $17,74N/m$ , ante  $16,72N/m$  obtidos em procedimento anteriormente descrito. O erro, por volta de 6%, acredita-se ser fruto ainda da modelagem magnética.



### 5.3. AVALIAÇÃO DO MODELO INTEGRADO

A validação do modelo completo foi feita simulando-se o comportamento do sistema em um ensaio de acoplamento similar àqueles realizados por Bonilha, 2011, e realizando-se o teste correspondente na bancada experimental instalada no LAMAE-UFRGS, de modo a comparar os resultados obtidos nos dois casos.

Com relação à montagem do ensaio experimental de validação, houve certa dificuldade na construção de um dispositivo de acoplamento embreagem/motor que mantivesse os eixos firmemente unidos e bem alinhados. O desalinhamento do dispositivo responsável por essa interface impossibilitou que fossem feitos ensaios com velocidade elevada, bem como com grande momento de inércia rotacional acoplado ao disco secundário da embreagem – uma elevada inércia a ser acoplada resultaria em forte sollicitação do conjunto, e os equipamentos poderiam vir a sofrer danos. Por essas razões, o sistema foi levado a atingir uma velocidade de rotação de 1000 rpm, um valor relativamente baixo em comparação com o limite operacional do motor testado, que é de 3600 rpm. Além disso, o inversor de frequência utilizado no acionamento do motor induzia grandes níveis de ruído na medição da velocidade obtida pelo sensor indutivo utilizado, de modo que os dados obtidos tiveram de ser filtrados. O filtro utilizado foi do tipo passa-baixa de Butterworth, com frequência de corte de 10 rad/s. Uma vez que a filtragem foi aplicada depois da aquisição dos dados, foi possível realizá-la nos dois sentidos do tempo, de modo a evitar a distorção de fase que seria causada pela aplicação exclusiva com tempo crescente. Os resultados obtidos neste ensaio estão ilustrados na figura 5.2a. As simulações correspondentes a este mesmo teste foram realizadas por meio do método de Runge-Kutta de integração numérica, com passo de integração de  $1,0 \cdot 10^{-4}$  s. Os resultados obtidos podem ser visualizados na figura 5.2b.

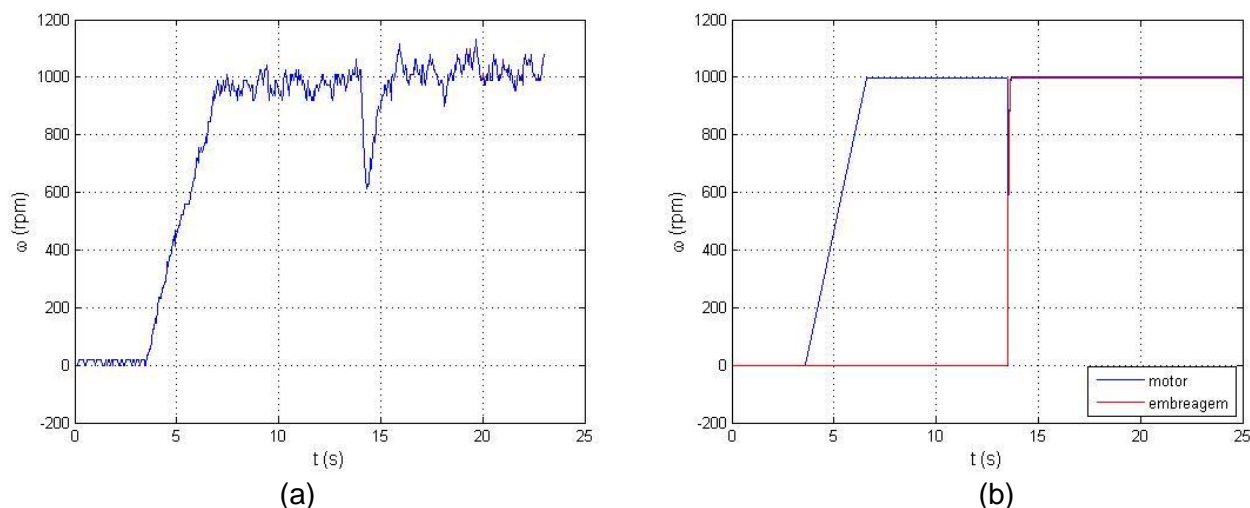


Figura 5.2 - Resultado em velocidade (a) obtido em teste experimental, e (b) via modelo computacional.

Quantitativamente, nota-se que a reaceleração apresentada pelo modelo computacional é significativamente mais rápida do que a verificada na bancada real, ainda que a queda na velocidade seja de magnitude similar. Tendo-se em vista o grau satisfatório de concordância obtido entre os valores teórico e prático da força magnética existente no sistema, essa discrepância parece não se dever à modelagem da interação magnética realizada nesse trabalho. Por outro lado, uma vez que o tempo de aceleração também depende diretamente do momento de inércia do sistema rotativo, é possível que os valores identificados por Bonilha, 2011, para este parâmetro não estejam em concordância com o sistema real. De uma forma preliminar, a validade dessa hipótese pode ser checada por simulação, utilizando-se valores

mais elevados para esta variável. No apêndice I, são mostradas as respostas da simulação do mesmo sistema, com o valor do momento de inércia aumentado de um fator de 10x e, depois, de 100x. O que se observa é que, além do aumento no tempo de retomada da velocidade, como era de se esperar, também cresce a queda na rotação no momento do acionamento da embreagem. Esses resultados são coerentes com o comportamento físico esperado para o sistema, e os valores numéricos obtidos também se mostram mais concordantes com o resultado obtido no teste experimental. Dessa forma, antes que novos trabalhos sejam realizados com base no modelo completo do sistema aqui estudado, é necessário que sejam revistos os procedimentos de identificação de todos os parâmetros levantados nos trabalhos realizados até o momento no âmbito do LAMAE-UFRGS, com especial atenção aos trabalhos de Bonilha, 2011 e Vechia, 2011.

Com relação ao modelo computacional, este representa bem o comportamento global do sistema, em termos qualitativos: o motor acelera até sua velocidade nominal, tem uma queda quando do momento do acionamento da embreagem e, depois do efetivo acoplamento, o sistema como um todo retoma a aceleração até estabilizar em seu ponto de operação em equilíbrio, conforme ilustrado de forma mais detalhada na Figura 5.3.

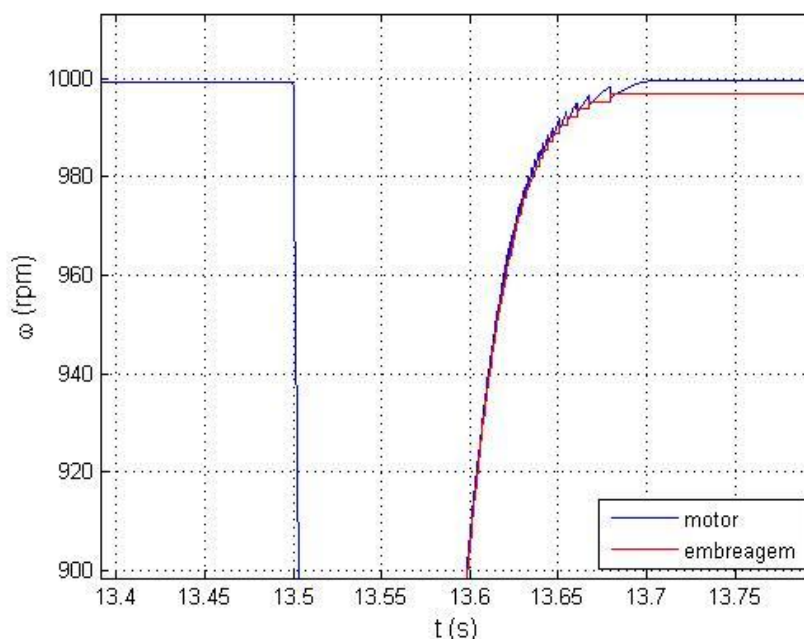


Figura 5.3 - Detalhe da estabilização da velocidade depois do efetivo acoplamento simulado.

## 6. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas na realização deste trabalho são as seguintes:

- A modelagem dos fenômenos magnéticos do sistema apresentou níveis satisfatórios de concordância com os valores identificados experimentalmente para o sistema, de modo que os objetivos específicos do modelo proposto neste trabalho podem ser considerados atingidos.
- O processo de validação experimental do sistema completo sofreu de restrições significativas em relação às faixas de operação em que a realização dos testes era possível. Deste modo, para que o estudo do modelo completo seja realizado de forma

satisfatória, os aspectos mecânicos do sistema de acoplamento entre motor e carga deverão ser aprimorados.

- Com relação ao modelo computacional completo, embora o comportamento verificado experimentalmente tenha sido reproduzido qualitativamente de forma satisfatória, não se pode afirmar o mesmo no que se refere aos seus aspectos numéricos. Aparentemente, essa dificuldade está relacionada com incorreções na identificação de parâmetros que foi realizada em trabalhos anteriores, especialmente no que se refere aos momentos de inércia considerados.

## 6.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos, tem-se como principal sugestão a revisão do modelo do sistema por completo, tanto em termos de sua elaboração teórica como principalmente da verificação experimental de todos os parâmetros considerados, de modo a verificar a causa da discrepância nos resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, F. G. C.; **“Verificação do efeito de lubrificação em um sistema de transmissão por corrente”**, Trabalho de Conclusão de Graduação, UFRGS, 2011.

Andrade, A. S.; **“Elementos orgânicos de máquinas II – notas de aula”**, [www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/elemaq2](http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/elemaq2), acessado em 30/04/2012.

Bonilha, M. Z.; **“Análise experimental do consumo energético de um motor elétrico com fracionamento de carga na Partida”**, Trabalho de Conclusão de Graduação, UFRGS, 2011.

Duque, E. L.; **“Efeito das vibrações torcionais do volante de motores na determinação do sistema de embreagem veicular”**, Dissertação de mestrado, Escola politécnica da USP, 2005.

Fitzgerald, A. E., Jr., C. K., Umans, S. D.; **“Electric Machinery”**, 6ª Ed., McGraw-Will, 2003.

Generoso, D. J.; **“Elementos de máquinas”**, módulo 3, Universidade Santa Catarina – Campus Araranguá, 2009.

Guedes, M. A. D. V., **“Métodos numéricos para análise do campo magnético das máquinas elétricas”**, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, 1983.

Hawkins, N.; **“Hawkins electrical Guide: Number One”**, Theo.Audel& Co., New York, 1914.

Lhomme, W., Zanasi, R., Geitner, G. H., Bouscayrol, A.; **“Different graphical descriptions of clutch modeling for traction systems”**, Eletrimacs 2008, Québec, Canada, 2008.

Nussenzveig, H. M.; **“Curso de física básica vol. 3 – Eletromagnetismo”**, Editora Edgard Blucher, 1997.

Magalhães, M. A. S.; **“Levantamento de curvas de rendimento de um sistema de transmissão mecânica”**, Trabalho de Conclusão de Graduação, UFRGS, 2011.

Nogueira, A. F. L., “**Cálculo de forças eletromecânicas pelos métodos do trabalho virtual e tensor de Maxwell**”, disponível em [www.joinville.udesc.br/portal/professores/nogueira/materiais](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/nogueira/materiais), Acessado em 01/06/2012.

Oliveira, N. C. G.; “**Embreagens**”, São Paulo: Grêmio Politécnico, 1963.

Santos, W. M., Neto, A, C,; “**Acionamento de embreagem hidráulico para caminhões leves**”, Society of automotive engineers inc., 2006.

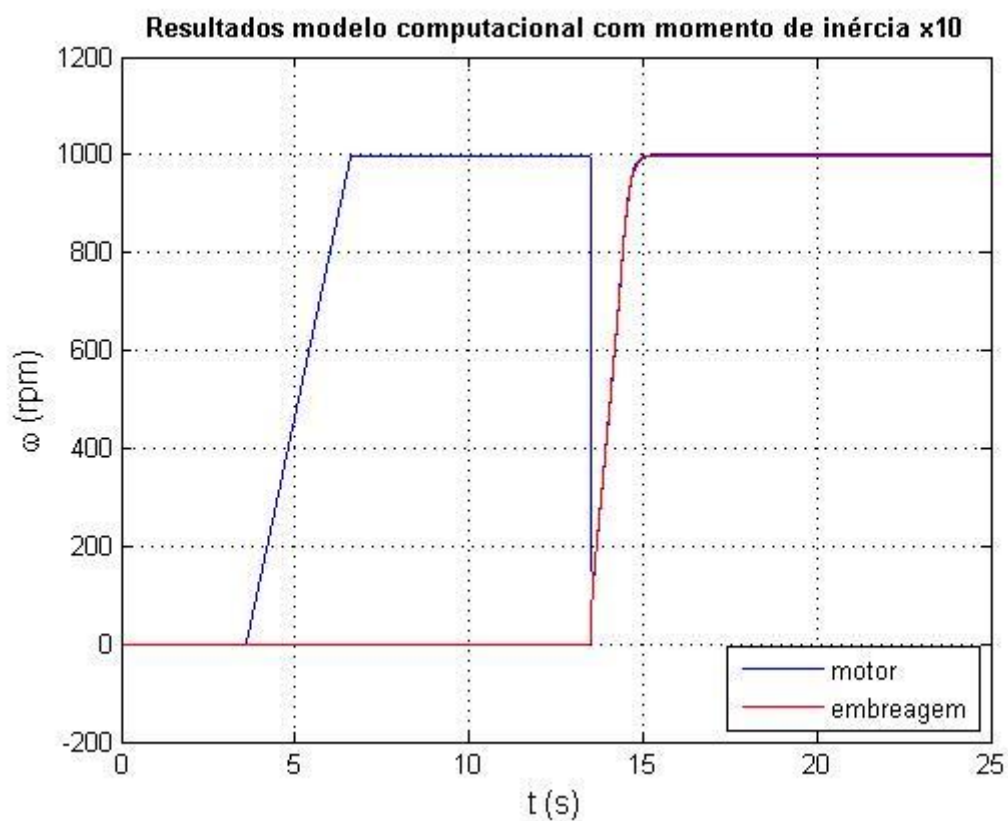
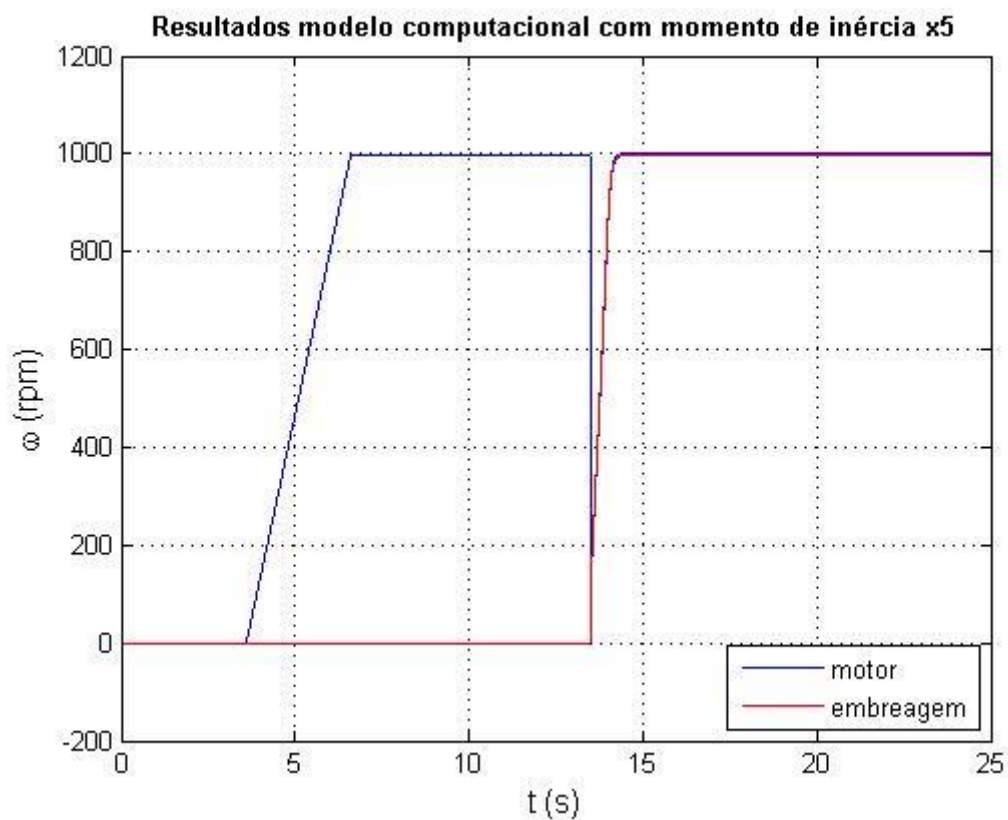
Serrarens, A., Dassen, M., Steinbuch, M; “**Simulation and control of an automotive dry clutch**”, Technische Universiteit Eindhoven – Faculty of Mechanical Engineering, Eindhoven, Netherlands, 2007.

Shigley, J. E.; “**Elementos de máquinas**”, LTC,1984.

Vechia, V. D.; “**Modelo dinâmico de um motor assíncrono de acionamento intermitente**”, Trabalho de conclusão de graduação, UFRGS, 2011.

Wentworth, S. M.; “**Fundamentos de eletromagnetismo com aplicações em engenharia**”, LTC, 2006.

APÊNDICE I – SIMULAÇÕES CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE ORDEM DE GRANDEZA PARA O MOMENTO DE INÉRCIA DO ACOPLAMENTO



APÊNDICE II – VISÃO GERAL DO DIAGRAMA DE BLOCOS EM MATLAB/SIMULINK®

