

UM EXPERIMENTO FÍSICO CONCEITUAL E DIDÁTICO NO ENSINO DE ENGENHARIA

João Jachic - joão.jachic@utp.br fone: 55 041 657 4302

Universidade Tuiuti do Paraná

Av. Comendador Franco, 1860

80.215-909 - Curitiba – Paraná

Fábio Márcio Bisi Zorzal- fabio.zorzal@utp.br- fone: +55 041 9985 7050

Av. Comendador Franco, 1860

80.215-909 - Curitiba – Paraná

André Fadrique

Av. Comendador Franco, 1860

80.215-909 - Curitiba – Paraná

Amaury Pessoa Gebran – amaury.gebran@utp.br

Av. Comendador Franco, 1860

80.215-909 - Curitiba – Paraná

Resumo: *Muitos admiram o progresso da indústria eletro-eletrônica. Qualquer bugiganga que se mova sob qualquer tipo de controle, externo ou pré-programado, desperta muita atenção dos alunos de engenharias e de ciências exatas. Os conceitos dos motores elétricos, exaustivamente ensinados nos cursos de engenharia, se resumem em manifestações das forças entre campos magnéticos. Os ímãs permanentes, os eletroímãs, as espiras e bobinas, os solenóides, os pólos magnéticos, formam um agregado de conhecimentos que podem parecer um tanto dispersos e desconexos para uma apreciável fração de estudantes. Neste trabalho simulamos computacionalmente os componentes de um motor elétrico conceitual e seu funcionamento usando geometria analítica, física e o MATLAB. Fabricamos, quase que artesanalmente, o eletroímã do estator, a bobina do rotor, o sistema de comutação da corrente para garantir um torque magnético sempre positivo sobre o rotor. O experimento prático e palpável do motor elétrico e seus componentes são ensaiados identificando e daí variando os parâmetros de controle. Mostramos como otimizar as forças magnéticas entre os pólos magnéticos fixos do estator com os pólos alternados do rotor, quando existe núcleo de ferro no rotor. Simulamos no computador e mostramos experimentalmente no motor conceitual a ação da força de atração que sofrem os materiais ferromagnéticos em ambos os pólos magnéticos e a influência deletéria da histerese nestes núcleos de ferro. Como resultado deste trabalho, vemos que o nosso aluno acabou utilizando conceitos de geometria analítica, de física, de computação e ainda se animou em planificar outros projetos de empreendedorismo visando aplicação no cotidiano tecnológico.*

Palavras-chave: *Simulação, Física, Motor, Histerese, Matlab.*

1. INTRODUÇÃO

É notório que os alunos dos primeiros anos das Faculdades de Engenharias tem muita ansiedade de ver os conceitos teóricos das aulas de física aplicados em problemas do dia a dia. Isto é em parte feito nas aulas de laboratório. Mas, os experimentos de laboratório ainda ficam um pouco aquém dos mais céticos. Todos, porém, admiram os progressos da indústria eletro-eletrônica. Qualquer bugiganga que se mova sob qualquer tipo de controle, externo ou pré-programado, desperta muita atenção dos alunos de engenharias e de ciências exatas. Eles anseiam por um entendimento maior de como aquilo efetivamente funciona. Todos nós estamos expostos a motores. O automóvel é quase sempre visto como algo que tem um motor à explosão, com pistões comprimindo gases e estes se expandidos após a queima, transformando energia química em mecânica. As partes móveis que envolvam a interação eletro-magnética são bem menos lembradas e entendidas. Os conceitos dos motores elétricos, exaustivamente ensinados nos cursos de engenharia, se resumem em manifestações das forças entre campos magnéticos. Os ímãs permanentes, os eletroímãs, as espiras e bobinas, os solenóides, os pólos magnéticos, etc, formam um agregado de conhecimentos que podem parecer um tanto dispersos e desconexos para uma apreciável fração de estudantes. Neste trabalho simulamos computacionalmente os componentes de um motor elétrico conceitual e seu funcionamento usando geometria analítica, física e o *MATLAB*. Fabricamos, quase que artesanalmente, o eletroímã do estator, a bobina do rotor, o sistema de comutação da corrente no rotor para garantir um torque magnético sempre positivo sobre o rotor. O experimento prático e palpável do motor elétrico e seus componentes são ensaiados identificando e daí variando os parâmetros de controle do motor. Mostramos como otimizar as forças magnéticas entre os pólos magnéticos fixos do estator com os pólos alternados do rotor, quando existe núcleo de ferro no rotor. Simulamos no computador e mostramos experimentalmente no motor conceitual a ação da força de atração que sofrem os materiais ferromagnéticos em ambos os pólos magnéticos e a influência deletéria da histerese nestes núcleos de ferro. Como resultado deste trabalho, vemos que o nosso aluno acabou utilizando conceitos de geometria analítica, de física, de computação e ainda se animou em planificar outros projetos de empreendedorismo tecnológico visando aplicação na área de serviços do cotidiano.

2. CIRCUITOS ELÉTRICOS E CIRCUITOS MAGNÉTICOS

O aluno é lembrado que o motor elétrico funciona graças a interação entre campos magnéticos devido a eletroímãs ou ímãs. Mas estes campos são gerados por circuitos elétricos e conduzidos por circuitos magnéticos. Um elemento fundamental no funcionamento do motor é a utilização do ferro como material ferromagnético (Fe, Ni, Co) capaz de concentrar a indução magnética e permitir a circulação do fluxo magnético, geralmente por um anel fechado. Para tal, fizemos um paralelismo entre os circuitos elétricos e magnéticos, destacando a resistência elétrica e a relutância magnética, apresentadas resumidamente nas “equações 1 e 2”. Assim, num circuito elétrico, com n materiais de condutância elétrica σ_n em série, na forma de fios de área transversal A_n e comprimento l_n cada um, a resistência elétrica equivalente será:

$$R = \sum_n \frac{l_n}{\sigma_n A_n} \quad (1)$$

Analogamente, num circuito magnético, com n materiais de permeabilidade magnética μ_n em série, na forma de segmentos de anéis de área transversal A_n e comprimento l_n cada um, a relutância magnética \mathbf{R} equivalente será:

$$R = \sum_n \frac{l_n}{\mu_n A_n} \quad (2)$$

Observamos que a grandeza circulante no circuito elétrico é a corrente elétrica enquanto que a grandeza circulante num circuito magnético é o fluxo magnético. Mostramos no experimento que era necessário montar o rotor justamente no tubo do fluxo magnético, tal qual se deve instalar um moinho d'água justamente no tudo de corrente da água. Conclui-se que o circuito magnético deve ter uma abertura. Isto é possível porque, ao contrário do circuito elétrico, o circuito magnético pode incluir o ar como um componente do circuito, embora com perdas de fluxo devido a baixa permeabilidade do ar para o campo magnético. Simulamos o ante-projeto do motor no *MatLab* para calcular algumas grandezas físicas, como a intensidade de campo magnético nos pólos norte e sul do eletroímã e o torque magnético num rotor feito com N_2 espiras retangulares. Aproveitamos o simulador para gerar um esboço do protótipo, destacando o estator, o rotor e o comutador de corrente do rotor, como mostrado na “figura 1” abaixo.

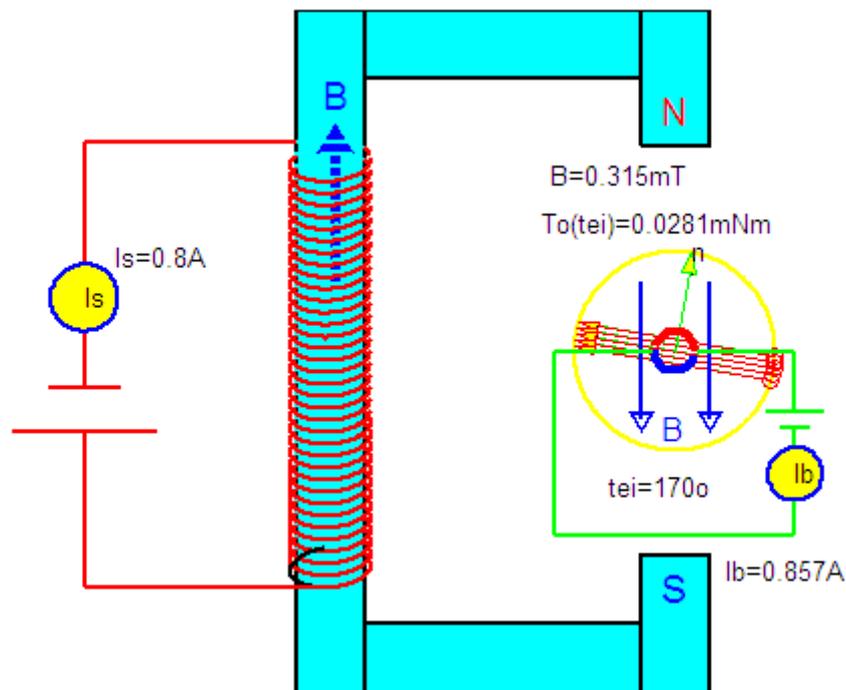


Figura 1 – Simulação no *MatLab* do motor elétrico conceitual, com estator, rotor e comutador.

3. FORÇA DO CAMPO MAGNÉTICO EM BARRA DE FERRO

O funcionamento do motor conceitual depende de ajuste fino nas correntes I_1 do estator e I_2 do rotor. Isto ficou claro a medida que mudávamos o comprimento e a espessura da barra de ferro doce dentro das espiras do rotor. Tal se deve ao fato que tanto o pólo sul como o pólo norte do estator atraem materiais ferromagnéticos. A quantização desta força é importante para o controle das forças de atração e de repulsão que ocorrem no rotor devido ao estator. Esboçamos, “na figura 2”, a situação do solenóide atrair uma barra de ferro. O campo magnético H só depende da corrente i nos fios de enrolamento da bobina. Então o valor de H é o mesmo tanto para pontos dentro do volume $dV=A \cdot dx$ como para

pontos dentro da barra de ferro próximos ao volume dV . A densidade volumétrica da energia devido ao campo magnético H dentro do solenóide é:

$$u_H = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (3)$$

Daí, podemos formular variação da energia interna armazenado pelo campo magnético, quando a barra se desloca para dentro.

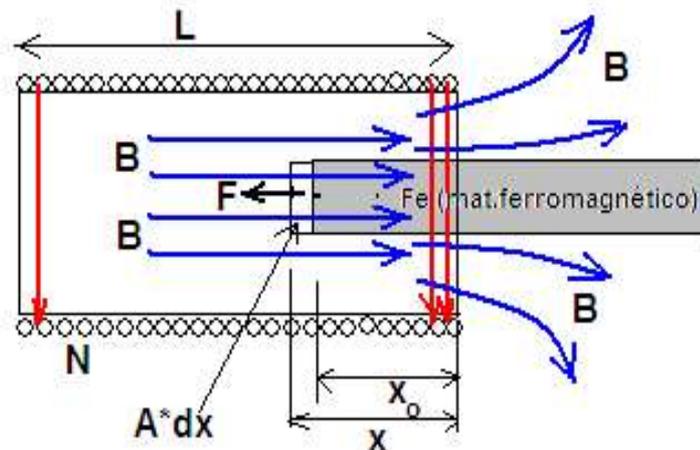


Figura 2 – Força de atração do solenóide de comprimento L em uma barra de ferro de área transversal A

Como a permeabilidade magnética do ar é μ_0 e a do ferro é μ , então a energia potencial para pontos da ponta da barra de ferro será:

$$U(x+dx) = U(x_0) + \frac{1}{2} \int_{A dx} (\mu - \mu_0) H^2 A dx = U(x_0) + \frac{1}{2} (\mu - \mu_0) (Ni / L)^2 A dx$$

(4)

e a força de atração correspondente, dirigida para o centro do solenóide, será:

$$F = \frac{1}{2} (\mu - \mu_0) (Ni / L)^2 A dx$$

(5)

Notemos que esta força F não depende da natureza dos pólos magnéticos e será sempre de atração para materiais ferromagnéticos como o ferro ($\mu_{Fe} \approx 10^5 \mu_0$). É evidente que não queremos usar materiais diamagnéticos como o cobre porque não funcionariam como concentrador de fluxo magnético.

4. TORQUE MAGNÉTICO E O COMUTADOR

O comutador esboçado “na figura 3” abaixo vai inverter o sentido da corrente contínua nas bobinas quando o plano delas estiver congruente com o plano horizontal. Neste caso, o campo magnético deve ser vertical para que na posição de inversão da corrente, o torque magnético sobre as espiras seja zero. Aproveita-se, portanto, ao máximo as posições em que o torque nas espiras é máximo. Isto vale para o caso em que se adota uma comutação de corrente a cada meia volta do rotor. A comutação é mecanicamente sincronizada com a

rotação do rotor. Notemos que o campo magnético B é vertical no sentido de cima para baixo, produzido pelo circuito do eletroímã no solenóide, para a corrente I_1 selecionada.

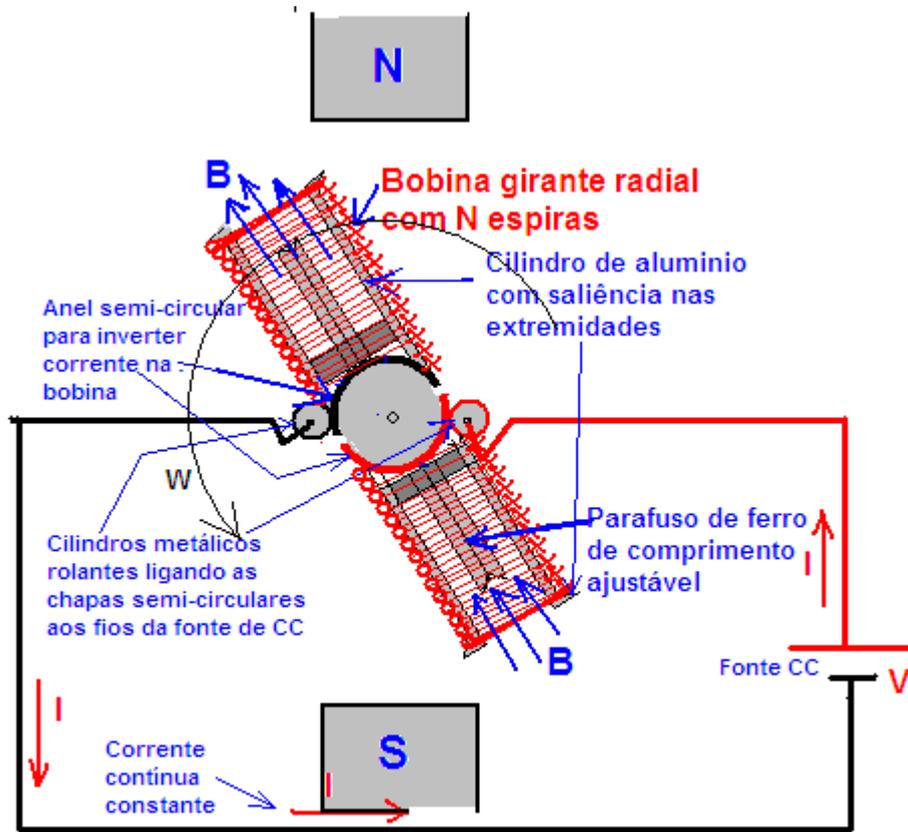


Figura 3 . Detalhes do rotor com um parafuso de ferro de comprimento ajustável e a ação do comutador de corrente elétrica contínua.

O comutador é basicamente composto de dois anéis semicirculares acoplados a duas escovas de carvão para permitir a passagem de corrente de uma peça fixa para uma móvel, o rotor, invertendo porém o sentido da corrente de modo a produzir um torque magnético sempre positivo. O torque magnético só será positivo se as correntes I_1 no estator e I_2 no rotor forem adequadamente controladas tendo em vista as diversas forças de atração e de repulsão entre os pólos magnéticos incluindo a força sempre atrativa na barra de ferro usada como núcleo no rotor. Para o controle efetivo das correntes I_1 e I_2 foi utilizado um reostato acoplado ao circuito elétrico de alimentação do solenóide do estator. A magnitude e sentido da rotação w do rotor será função da polaridade da corrente contínua no estator bem como do torque motor resultante. Haverá sempre um torque resistivo devido ao atrito nos mancais do eixo e na ação de contato das escovas do comutador de corrente. Deve-se usar escovas de carvão com molas retráteis para minimizar este atrito. O torque propulsor é zero quando o rotor estiver alinhado com o segmento do circuito magnético. Neste caso, não é possível iniciar o movimento do rotor nesta posição. Porém, devido a inércia do rotor com a barra de ferro robusta inserida, as paradas tem ocorrido fora desta posição facilitando o reinício do movimento de rotação do motor conceitual quando religado. O comprimento do parafuso deve ser ajustado experimentalmente para garantir uma força repulsiva entre N_E e N_C , onde N_E é o pólo norte do eletroímã e N_C é o pólo norte do comutador. Isto porque, o ferro é atraído tanto pelo pólo norte (N) magnético como pelo pólo sul (S) magnético. Esta força de atração deve ser bem menor do que a força de repulsão entre pólos magnéticos iguais para que o torque

magnético sobre a bobina móvel seja sempre no mesmo sentido e com isto garantir uma velocidade angular w relativamente constante e de mesmo sinal. A função do parafuso de ferro no eixo do cilindro vertical de alumínio que contém a bobina é concentrar o fluxo magnético dentro deste solenóide e com isto aumentar o torque magnético. Optamos, no entanto, por um rotor com núcleo de ferro doce sem o cilindro de alumínio.

5. EQUILIBRIO DE FORÇAS ENTRE O ESTATOR E O ROTOR

No esquema de um motor elétrico conceitual pode ser usado uma barra de ferro, de baixa histerese, envolta por uma bobina com n_2 espiras por unidade de comprimento, constituindo um rotor. A corrente elétrica que circula na bobina deste rotor será i_2 . A função do núcleo de ferro neste dispositivo é justamente aumentar o fluxo da indução magnética, uma vez que $\Phi = \int_A \mu H dA$. No circuito magnético do estator constituído de um eletroímã, a corrente elétrica é i_1 na bobina com n_1 espiras por unidade de comprimento. As correntes i_1 , no eletroímã do estator, e i_2 na bobina do rotor, produzem campos magnéticos H_1 e H_2 , respectivamente. Esses campos magnéticos geram os pólos magnéticos N (norte) e S (sul), conforme esboçado na “figura 4” abaixo. Nesta figura foi esboçado a configuração dos pólos magnéticos que são fixos no estator mas alternam com o tempo no rotor devido a ação do comutador. As forças entre estes pólos magnéticos variam de intensidade e direção com o tempo.

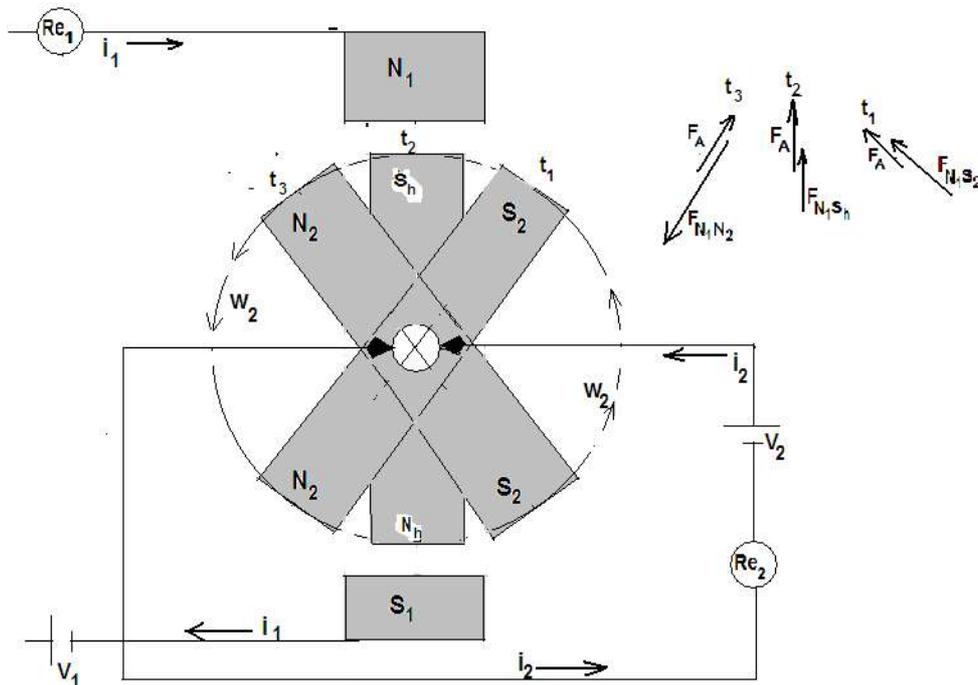


Figura 4 – Esboço das forças magnéticas atuantes no rotor e no estator

Observa-se a configuração qualitativa destas forças para três tempos de evolução do rotor, que terá uma rotação de w_2 rad/s devido a ação dos torques das forças ora de atração ora de repulsão. O sentido de rotação do motor pode ser invertido alterando o sentido da força eletromotriz (fem) V_1 . O movimento de rotação é sustentado pelo torque das forças entre os pólos. Como desejamos que o movimento de rotação seja aproximadamente contínuo num mesmo

sentido então é necessário que o torque das forças magnéticas seja sempre positivo. Isto é garantido pelo uso do comutador que altera o sentido da corrente i_2 para que o pólo S_2 no instante t_1 passe para pólo N_2 no instante t_3 . Mas, devido ao fenômeno da histerese no material ferromagnético, a magnetização até o tempo t_2 faz com que ainda haja um campo magnético remanescente no rotor entre os tempos t_2 e t_3 , já que durante este intervalo de tempo o comutador faz com que o corrente i_2 seja nula e não ocorre magnetização no sentido oposto. Este pólo Sh (e o Nh correspondente) é deletério para o movimento de rotação no sentido w_2 uma vez que produz um torque que acaba freando o rotor neste período de tempo. Associado a este fenômeno, vemos ainda que a força de atração F_A é grande no instante de tempo t_2 quando o rotor está alinhado com o prolongamento do estator. O giro quase contínuo do rotor se sustentará se houver um equilíbrio de forças de repulsão entre t_2 e t_3 , com a ajuda de uma pequena inércia inicial de rotação. Por outro lado, conclui-se que o motor estará inicialmente estacionário na posição t_2 . O movimento inicial deverá ser auxiliado externamente, já que não há torque magnético de repulsão em t_2 . Esse torque seria diferente de zero através do uso de um dispositivo que alterasse a simetria do campo magnético vertical do estator. Uma simples espira colocada assimetricamente no estator poderia distorcer o campo magnético graças ao efeito de Lenz, porém só quando se utiliza corrente alternada no estator. O movimento de rotação se manterá se o torque magnético for suficientemente superior ao torque resultante devido as forças F_A sempre de atração somado ao torque resistivo de atrito de movimento causado pelo atrito no ar, nos mancais do eixo e principalmente nas escovas de contato do comutador de corrente. As escovas devem ser cuidadosamente ajustadas para permitir a passagem da corrente elétrica sem contudo causar atrito desnecessariamente elevado a ponto de comprometer o equilíbrio das forças na dinâmica do sistema estator-rotor. Além dos parâmetros de construção, as magnitudes das forças que atuam no sistema são mais efetivamente controladas pela variação adequadas das correntes i_1 no estator e i_2 no rotor. Existirá um conjunto otimizado de valores de i_1 e i_2 que fará o sistema funcionar, embora com alguma menor ou maior dissipação de energia por efeito joule nos dois circuitos elétricos (um no estator e outro no rotor), dependendo dos materiais usados.

6. RESULTADOS

Para obter os resultados deste trabalho, primeiro efetivamente construímos o motor elétrico conceitual mantendo as características simuladas no computador. A construção foi feita com o auxílio dos alunos de aulas de Física B dos cursos de Engenharia da Universidade Tuiuti do Paraná. As etapas da construção dos componentes e da sua implementação experimental foi importante para a fixação dos conceitos físicos e tecnológicos envolvidos. A simulação computacional do experimento foi feita no *MatLab* a partir da programação de uma função que denominamos *function SolenoideEletroimaC*. A programação foi baseada em descrever todos os componentes geométricos e funcionais usando geometria analítica e física. O resultado disto são os cálculos dos parâmetros de projeto bem como as “figuras 1, 3 e 5” mostradas no texto. O programa *SolenoideEletroimaC* tem como entrada uma série de parâmetros que podem ser digitados como opção de projeto ou de controle do motor conceitual. Uma destas opções de entrada e sua correspondente saída parcial é:

```
>> SolenoideEletroimaCv6(35,5,.3,10,5,1,[1 1],1,1,.5,300,PEI,PBO,'ckrwybg',[2 2 1],1)
Angulo entre a normal da espira e a direção do campo magnético, teta=170graus
Comprimento do Solenóide do Eletroimã, LS=11.2cm
Número de espiras no eletroimã, Ne=35
Angulo de inclinação da elipse, tetai=5graus
Passo da hélice na simulação das espiras no eletroimã, ps=0.3cm
Comprimento da coluna vertical do "C" do Eletroimã, LC=17.2cm
```

Base do eletroímã, na forma de "C", $BC=10.3\text{cm}$
 Espessura do eletroímã na forma de "C", $ec=1.72\text{cm}$
 Resistência elétrica do circuito alimentador do eletroímã, $Re=15\text{ohm}$
 Força eletromotriz no circuito alimentador do eletroímã, $FEMe=12\text{volts}$
 Corrente elétrica contínua no circuito e no solenóide do eletroímã, $Is=0.8\text{A}$
 Campo magnético calculado dentro do circuito magnético do eletroímã, $B=0.315\text{mT}$
 Resistência elétrica do circuito da bobina girante, $Rb=14\text{ohm}$
 Força eletromotriz no circuito da bobina girante, $FEMb=12\text{volts}$
 Corrente elétrica contínua na parte alimentadora do circuito da bobina girante, $Ib=0.857\text{A}$
 Número de espiras na bobina girante, $Nb=20$
 Torque inicial na bobina girante, $To(tei)=0.0281\text{mNm}$
 Torque médio na bobina girante, $Tom=0.103\text{mNm}$

Observemos que muitos dos cálculos efetuados pelo simulador não foram efetivamente discutidos neste artigo. Dentre as figuras geradas pelo simulador computacional destacamos a evolução do campo magnético e do torque na bobina, mostrado na “figura 5” abaixo.

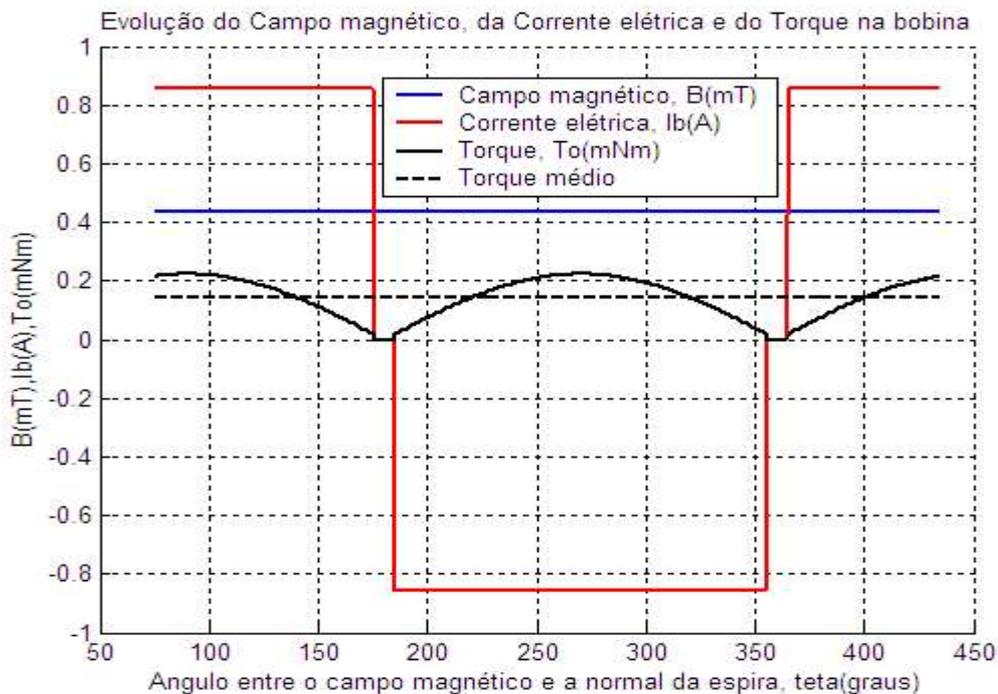


Figura 5 – Evolução do campo magnético, da corrente elétrica e do torque na bobina do rotor.

7. RESULTADOS

Observa-se que a evolução do torque magnético, como mostrado na figura 5, a partir da saída do simulador, é efetivamente sempre positivo. A parte temporal está implícita no ângulo de rotação do rotor a partir da velocidade angular w . Verifica-se que o torque magnético no rotor é zero em dois intervalos de tempo num ciclo. Estes intervalos de tempo são, no entanto, curtos e não inviabilizam o funcionamento do motor. O torque médio calculado pelo simulador depende diretamente da abertura dos anéis do comutador. Os alunos fizeram alguns testes para caracterizar o domínio dos valores aceitáveis desta abertura no

simulador. Fisicamente, os anéis semicirculares no comutador estão espaçados de 1mm, o suficiente para permitir o uso de escovas de carvão de dimensões da ordem de 3mm. Observamos ainda que a histerese do campo magnético no rotor faz aparecer uma força de atração que freia o rotor quando ele passa justamente pelo ponto em que o torque motor é zero. Este fato é deletério para o funcionamento do motor e é tratado caso a caso pela indústria de motores. No nosso projeto conceitual, isto foi efetivamente verificado e treinado com os alunos. Obtivemos conjuntos semi-otimizados de parâmetros de entrada capazes de controlar esta força de atração de tal maneira que a velocidade de rotação w fosse sempre de mesmo sinal e de valor aproximadamente constante de valor próximo a 100rpm para alimentação de 12V. Para isto, usamos primordialmente um reostato no circuito alimentador do solenóides do estator. Ao limitar a corrente I_1 a força devido a histerese no rotor é minimizada o suficiente para o bom funcionamento do motor. Concluimos que o experimento foi muito válido como prática de ensino de campos magnéticos, torques em bobinas e princípios de funcionamento de motores elétricos.

Agradecimentos

Este trabalho é parte da pesquisa de kits educacionais desenvolvida no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tuiuti do Paraná com a colaboração e coordenação dos Professores Dr. Amaury Pessoa Gebran, coordenador do Curso de Engenharia Elétrica da UTP e Dr. Francisco Carlos Sardo, diretor da Faculdade de Ciências Exatas e de Tecnologia da UTP. Agradecemos ainda as muitas contribuições dos alunos de Física B do Curso de Engenharia Civil da UTP e do seu coordenador, Prof. Moacyr Aristeu Molinari, pelas sugestões técnicas e incansável incentivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMALDI, U. **Imagens da Física**. São Paulo: Editora Scipione, 1995.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB 6**. São Paulo: Prentice Hall & Pearson, 2004.

TIPLER, P. A. **Physics for scientists and engineers**. New York: Freeman & Worth Ed, 1998.

A CONCEPTUAL AND DIDATIC PHYSICAL EXPERIMENT IN TEACHING ENGINEERING

Abstract: Many admire the progress in the electronic industry. Any device that moves around under any kind of external or pre programmed control, awakes much attention of the engineering and exact sciences students. The electric motor concepts, exhaustingly taught in engineering schools, reduce in magnetic field force manifestations. Permanent magnets, electric magnets, coils, solenoids, magnetic pole, form a cluster of a somehow disperse and disconnected knowledge for a appreciable fraction of the students. In this work, we simulate by computer program the components of a electric motor concept using analytic geometry, physics and MatLab. We actually fabricate the electric magnet, de coils of the motor, the current commuter to guarantee a positive magnetic moment over the moving part of the electric rotor. The practical parts of the conceptual electric motor are identified and trained by varying the control parameters. We show how to optimize the magnetic forces between the magnetic induced poles when a iron core is used. We simulate in the computer and show experimentally the actions of the attractive forces that the ferromagnetic materials undergo in both north e south pole of the electric magnet. As a result of the word, we see that our student has applied analytic geometry, physics and computer programming and yet started to think about new plans involving technical electric devises, all important to today life support programs in the technologic world.

Palavras-chave: *Simulation, Physics, Motor, Hysteresis, Matlab.*