



## **CONVERSOR ELETROMECAÂNICO COMO FERRAMENTA DE APRENDIZADO NO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFMT: UM TRABALHO DE MONITORIA**

**Evandro A. Reche** – evandroreche.mat@gmail.com

**Eder Bridi** – ederbridi@gmail.com

**Dra. Walkyria K. A. G. Martins** –wkagm@yahoo.com.br

Universidade Federal de Mato Grosso

Av. Fernando Corrêa da Costa, nº 2367 – Bairro Boa Esperança

78060-900 – Cuiabá–Mato Grosso

***Resumo:** O presente trabalho tem por escopo a apresentação e análise de um projeto desenvolvido no programa de monitoria 2012-2013 na disciplina de Eletricidade e Magnetismo, oferecida pelo departamento de Engenharia Elétrica da UFMT (Universidade Federal de Mato Grosso). A disciplina, que tem carga horária de 96h, sendo 32h em laboratório e 64h em aulas teóricas, tem conteúdo que exige do discente do curso bons conhecimentos em Análise Vetorial e Cálculo Integral e, além disso, capacidade de assimilar fenômenos físicos de difícil visualização, fazendo com que grande parte dos alunos encontre dificuldade em abstrair o conteúdo. Nesse sentido, tem havido um esforço por parte do monitor e professor em desenvolver recursos para serem usados nas aulas de laboratório, com o objetivo de abordar a disciplina sob um ponto de vista menos abstrato, permitindo assim uma análise observativa por parte dos alunos. Com isso, foi concebido um conjunto didático para montagem de algumas experiências para laboratório que permite desde a visualização da interação entre campos magnéticos, até o funcionamento tanto de geradores, como de motores de corrente contínua. O conjunto permite a montagem do experimento passo a passo e também alteração na configuração e disposição de cada elemento, abrindo espaço para discussão e análise dos resultados de cada alteração na montagem.*

***Palavras-chave:** Campo Magnético, Gerador CC, Motor CC*

### **1. INTRODUÇÃO**

O Departamento de Engenharia Elétrica da UFMT oferece a disciplina de Eletricidade e Magnetismo que, para o discente do curso, além de ser o primeiro contato com um conteúdo específico, é também fundamento e pré-requisito para grande parte da estrutura curricular. A disciplina tem carga horária de 96h, das quais 64h são aulas teóricas expositivas e 32h são aulas experimentais em laboratório. Ao final desse período o aluno deve estar capacitado a compreender e resolver problemas relacionados ao eletromagnetismo básico. Nesse contexto, os monitores da disciplina têm a função de dar suporte ao aluno no sentido de dirimir dúvidas que possam sobrevir, além de acompanhar a execução e montagem de experimentos em laboratório.



Desse contato direto com o aluno da disciplina de Eletricidade e Magnetismo, foi constatada a dificuldade que o mesmo tem em visualizar e, conseqüentemente, em entender o funcionamento de certos dispositivos empregados nos complexos elétricos. Somado a isso, apesar da existência de excelentes conjuntos didáticos disponíveis no mercado, verifica-se que, além do alto custo, em muitos casos ou os kits são muito simples e muito distantes da realidade, ou as partes componentes se encontram encapsuladas em invólucros, o que não permite a visualização dos detalhes relevantes ao entendimento do seu funcionamento. Diante disso, vem sendo dedicado parte dos trabalhos de monitoria, também no desenvolvimento de dispositivos didáticos a partir de peças de descarte do laboratório e até mesmo sucatas, com o objetivo de elucidar as principais questões.

Para alcançar tal objetivo, foi concebido um conjunto didático de um conversor eletromecânico de energia com propósito de permitir a visualização do funcionamento tanto de geradores elétricos como de motores de corrente contínua. Tal conjunto pode ser utilizado em várias experiências as quais são providas de um roteiro que orienta na montagem do dispositivo almejado (dispositivo de produção de conjugado, motor de corrente contínua e gerador elétrico elementar). A ideia principal do equipamento é minimizar as frequentes dificuldades que o discente da disciplina encontra na observação e análise dos fenômenos físicos “não palpáveis” e, ao mesmo tempo, atentar para os detalhes construtivos de uma máquina, já que o dispositivo é todo desmontável e sem qualquer carcaça, dando a liberdade de alteração construtiva, bem como a visualização dos resultados da respectiva modificação.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Seja uma força  $\mathbf{F}$  aplicada no ponto P em um braço de alavanca  $\mathbf{R}$  que se estende da origem até o ponto de aplicação da força. O resultado disso é o surgimento do torque  $\mathbf{T}$  em relação ao eixo de rotação cuja definição é dada pelo produto vetorial da “Equação (1)”.

$$\mathbf{T} = \mathbf{R} \times \mathbf{F} \quad (1)$$

Onde,  $\mathbf{R}$  é o vetor distância que se estende do eixo de rotação até o ponto onde a força é aplicada e  $\mathbf{F}$  o vetor força que é aplicado ao ponto em questão. Esse produto vetorial nos dá o Torque  $\mathbf{T}$  que tem a direção normal ao plano que contém  $\mathbf{R}$  e  $\mathbf{F}$  e está no sentido determinado pela “regra da mão direita”.

### 2.1. Dispositivo de produção de conjugado

Uma vez definido o conceito de torque, é possível observar o seu surgimento em um circuito fechado (espira) por onde circula uma corrente  $\mathbf{I}$ , o qual é submetido a um fluxo magnético externo de densidade  $\mathbf{B}$ . Tal conjugado surge haja vista que tal espira fica submetida a um conjunto de forças aplicadas em cada um de seus lados como expressa a “Equação (2)”.

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

Onde  $I$  é a corrente que circula pela espira,  $d\mathbf{l}$  é um trecho diferencial da espira e  $\mathbf{B}$  é uma densidade de fluxo magnético externo. O produto vetorial entre  $I d\mathbf{l}$  e  $\mathbf{B}$  fornece o diferencial de força, com direção normal ao plano formado pelos dois vetores e sentido determinado pela “regra da mão direita”.

Uma vez que as forças encontradas na “Equação (2)” são aplicadas em cada lado da espira retangular, a partir da definição na “Equação (1)”, é possível calcular o torque resultante na espira através da “Equação (3)”, conforme mostra a “Figura 1”.

$$d\mathbf{T} = I d\mathbf{S} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

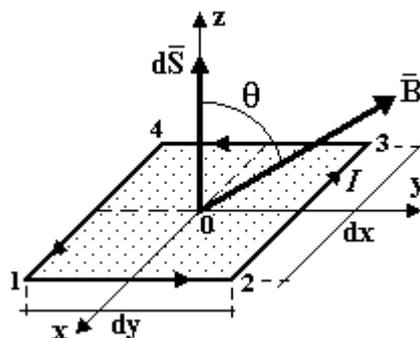


Figura 1 – Espira infinitesimal submetida a um campo magnético externo.

Onde  $d\mathbf{S}$  é o valor diferencial da área da espira, representada por um vetor cuja direção é perpendicular à área da superfície e cujo sentido é determinado pelo sentido da corrente. Considerando, ainda, que o produto  $I d\mathbf{S}$  é denominado por momento magnético da espira  $d\mathbf{m}$ , e representa o campo magnético produzido pela corrente que circula na espira.

$$I d\mathbf{S} = d\mathbf{m} \quad (4)$$

Substituindo a “Equação (4)” na “Equação (3)” e integrando (admitindo uma espira plana e  $\mathbf{B}$  estático e constante), obtém-se:

$$\mathbf{T} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} = I \mathbf{S} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

A partir da “Equação (5)” é possível verificar que o torque na espira móvel se dá no sentido de fazer com que o campo gerado pela corrente que nela circula se alinhe ao campo externo.

## 2.2. Motor de corrente contínua

A priori, pode-se dizer que os conceitos anteriormente mencionados são suficientes para a compreensão do funcionamento básico de um motor alimentado com corrente contínua. Entretanto, no caso do dispositivo de produção de conjugado apresentado, a espira experimenta uma rotação até que seu momento magnético se alinhe ao campo externo, ficando assim, estática em regime permanente. Para que o mesmo dispositivo funcione como um motor, onde a espira deve manter a rotação em regime permanente, faz-se uso de um *comutador*, visualizado na “Figura 2”.

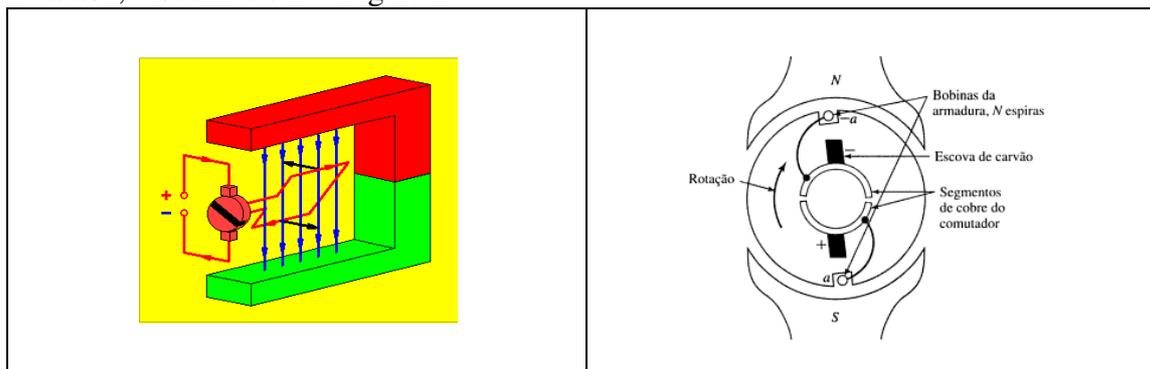


Figura 2 – Esquema de um motor de corrente contínua ressaltando o comutador (a) perspectiva e (b) vista frontal

Basicamente, a função do comutador é inverter o sentido da corrente na espira no instante em que o Torque for igual a zero, ou seja, quando o ângulo entre o vetor superfície da espira e o campo magnético externo for  $0^\circ$  (quando os campos se alinharem). Por inércia, o campo gerado pela corrente contrária tende a se alinhar novamente mantendo o sentido do Torque.

## 2.3. Gerador

Pela lei de Faraday/Lenz, a variação no tempo de um fluxo magnético que atravessa uma espira induz uma *fem*, cujo sentido é de se *opor à causa que a gerou*, assim:

$$fem = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad [\text{V}] \quad (6)$$

Onde *fem* é a diferença de potencial induzida entre os terminais da bobina, *N* é o número de voltas existentes, e  $\frac{d\varphi}{dt}$  é a variação no tempo do fluxo total que atravessa a bobina. Sabendo que **B** é um vetor densidade de fluxo magnético que atravessa uma superfície (nesse caso uma espira), o fluxo magnético  $\varphi$  é definido por:

$$\varphi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad [\text{Wb}/\text{m}^2] \quad (7)$$

Substituindo a “Equação (7)” na “Equação (6)”, temos:

$$fem = -N \frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (8)$$

Nesse caso a indução pode se dar tanto pela variação do campo magnético no tempo, como também pela rotação da espira, de modo que, mesmo submetida a um campo constante, esta experimenta uma variação de fluxo no seu interior. O fluxo máximo atravessando a espira ocorre quando o seu vetor superfície estiver na mesma direção que o campo externo. Considerando que,

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{A}] \quad (9)$$

e que

$$I dl = \frac{dQ}{dt} dl = v dQ \quad (10)$$

e substituindo a “Equação (10)” na “Equação (2)”, resulta em:

$$dF = dQ(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \Rightarrow \frac{dF}{dQ} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{E} \quad (11)$$

Onde  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico induzido no condutor devido ao movimento que faz quando “corta” as linhas de campo de um fluxo externo. Finalmente, a tensão induzida em um circuito em movimento pode ser obtido pela “Equação (12)”,

$$fem = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \oint (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (12)$$

Culminando na tensão alternada nos terminais de uma espira rotativa dada pela “Equação (13)”,

$$fem_m = \omega B A \text{sen} \omega t \quad (13)$$

e visualizada na “Figura 3”.

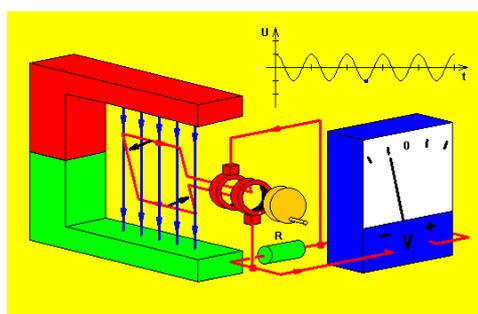


Figura 3 – Espira em movimento rotativo submetida a um B externo constante

Da “Equação (13)”, verifica-se que a tensão senoidal, mostrada na figura 03, induzida nos terminais da espira girante tem sua amplitude dependente da velocidade de rotação, da densidade do fluxo magnético externo, bem como das dimensões da referida espira.



### 3. O CONJUNTO DIDÁTICO CONCEBIDO

O dispositivo eletromecânico concebido no programa de monitoria da disciplina de Eletricidade e Magnetismo consiste basicamente de um conjunto didático para montagem em bancada de laboratório e que tem o objetivo de permitir a visualização de alguns fenômenos do eletromagnetismo bem como o princípio de funcionamento de geradores e motores CC. Os componentes deste conjunto são:

- 4 Bobinas de Helmholtz;
- Espiras com 1, 2 e 3 voltas, aqui identificadas como do Tipo I (circular com diâmetro de 100mm);
- Espiras com 15 voltas, aqui identificadas como do Tipo II (quadrada com lado de 200mm);
- Eixo de metal (onde ficam afixadas as espiras do Tipo II) de 1 m de comprimento com rolamentos e um comutador acoplado em uma das extremidades;
- Suporte para o eixo com regulagem de altura;
- Duas barras de metal com 500mm e conectores;
- Suporte com regulagem de altura, com duas escovas de posição regulável e conectadas a bornes;

Para a montagem completa das experiências também são utilizadas fontes de corrente contínua (CC), instrumentos de medição e cabos com pinos do tipo “banana”.

### 4. DESENVOLVIMENTO

O objetivo principal das aulas de laboratório é fazer com que o discente desenvolva a capacidade de analisar a aplicação do conteúdo estudado em sala, esse tipo de abordagem mais prática e observativa se faz necessário, pois o conteúdo teórico da disciplina exige que o aluno esteja familiarizado e consiga abstrair conceitos como o de campo magnético e torque que só podem ser compreendidos através da visualização de seus efeitos.

As aulas são organizadas de modo que o mesmo conjunto didático possa ser utilizado em três aulas distintas, “acompanhando” o andamento da teoria vista em sala, quais sejam: dispositivo de produção de conjugado, motor de corrente contínua e gerador elétrico elementar. Ao fim de cada aula o aluno deve fazer um relatório descrevendo a experiência, sua fundamentação teórica, e conclusões, sobre o que foi visto.

#### 4.1. Dispositivo de produção de conjugado

Nesta experiência, o conjunto didático concebido assume a sua forma mais simples, que consiste de quatro bobinas de Helmholtz as quais, conectadas em série e alimentadas por uma fonte CC, são dispostas de modo a se obter um acoplamento aditivo entre seus fluxos. Além disso, uma espira do Tipo I é suspensa através de um suporte, no centro das bobinas, como pode ser visualizado na “Figura 4” e, também, alimentada por uma fonte de corrente contínua.

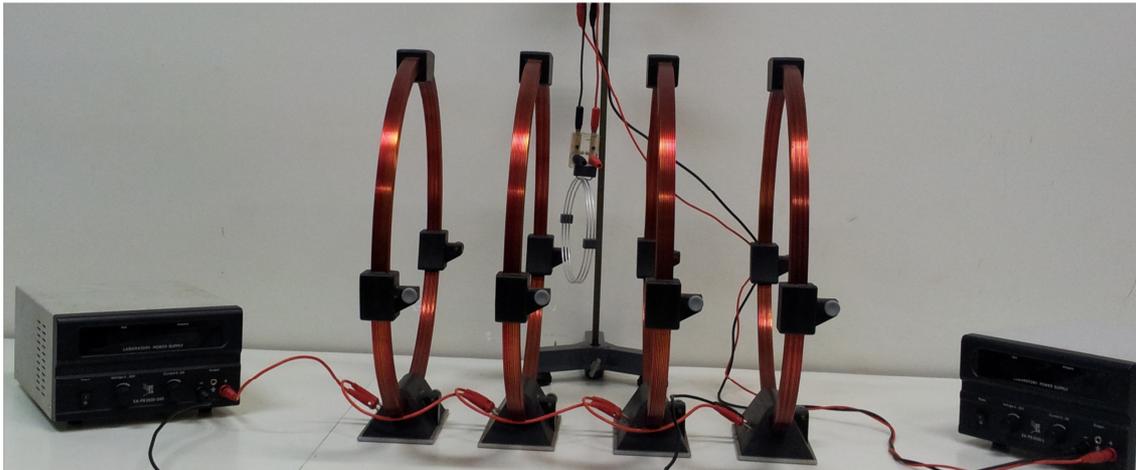


Figura 4 – Conjugado na espira submetida a um  $B$  externo constante

Com o experimento montado foi elaborado um plano de execução de procedimentos que permitisse a visualização dos efeitos do conjugado em diferentes situações, assim organizadas:

- Alteração do número de voltas da espira móvel:** com a utilização das espiras com 1, 2 e 3 voltas foi possível verificar o aumento do conjugado experimentado pelas mesmas.
- Inversão do sentido da corrente na espira móvel e do campo externo:** com este procedimento verificou-se a inversão do sentido de giro da espira móvel, o que é justificado pela inversão do torque.
- Alteração do valor da corrente na espira móvel:** neste caso foi confirmada a relação direta entre tal corrente e o efeito causado pelo conjugado na espira;
- Alteração da área da espira móvel:** desta vez observou-se a grande influência das dimensões da espira no comportamento da mesma quando submetida a um campo externo.

Em todas as situações testadas foram corroborados os conteúdos vistos em sala de aula, de uma maneira clara e simples de modo que o aluno da disciplina pudesse perceber a influência de cada parâmetro no torque experimentado pela espira móvel.

## 4.2. Motor de corrente contínua

Nesta configuração é necessário que se faça a substituição da espira Tipo I por duas outras do Tipo II, as quais são conectadas entre si e apoiadas em um eixo horizontal que por sua vez é suportado por dois pedestais através de rolamentos, que permitam o movimento giratório. Os terminais das espiras Tipo II são então conectados ao comutador que se encontra em uma das extremidades do eixo de rotação. Para prover um contato deslizante entre as lâminas do comutador e a fonte CC de alimentação das espiras móveis foi utilizado um par de escovas devidamente afixadas em suporte tipo pedestal (“Figura 5-a”). Finalmente, a disposição física deste conjunto é tal que a espira girante fique no centro do campo produzido pelas bobinas de Helmholtz dispostas da mesma forma que na experiência anterior (“Figura 5-b”).

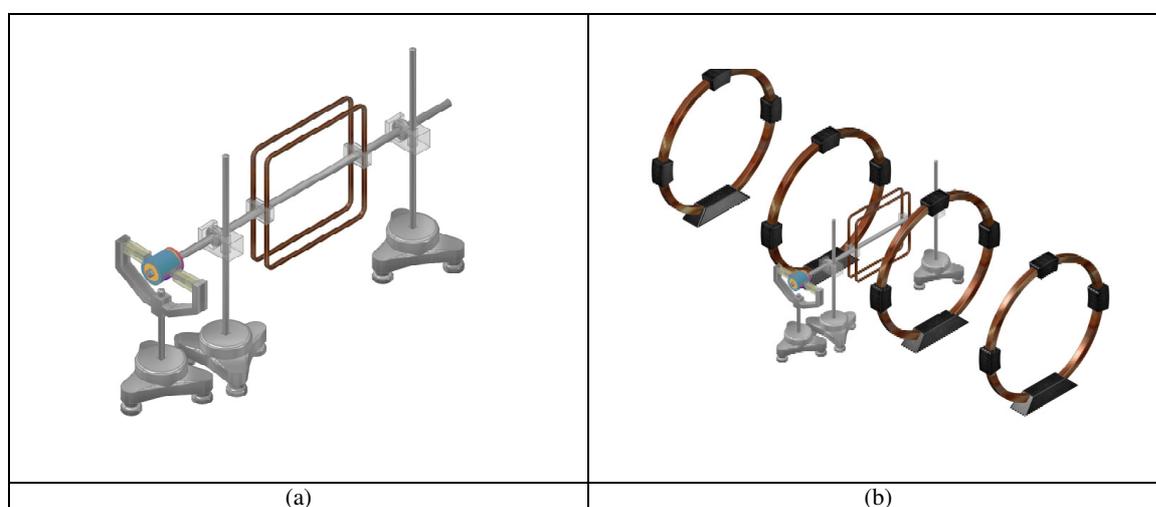


Figura 05 – Projeto em AutoCAD do conjunto eletromecânico concebido (a)espira rotativa com suportes e conjunto comutador/escovas (b) espira rotativa com bobinas de Helmholtz .

Uma vez alimentadas as bobinas de Helmholtz e as espiras girantes a partir de fontes CC independentes, procederam-se as análises envolvendo variações de sentido e magnitudes das correntes de alimentação (“Figura 6-a”).

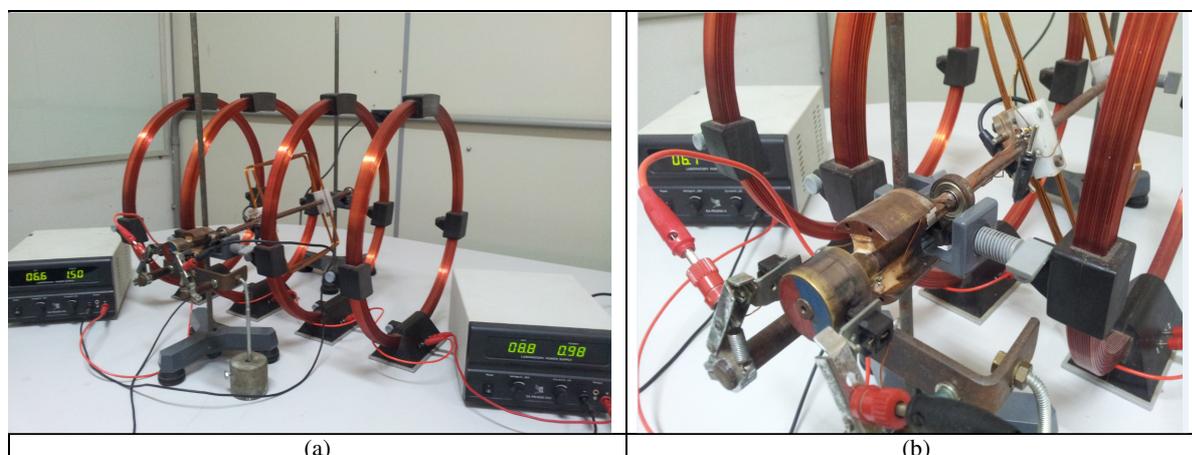


Figura 06 – (a) Conjunto eletromecânico concebido montado como motor CC na bancada de laboratório (b) detalhe do conjunto comutador/escovas feitos de sucata.

Novamente, o conteúdo das aulas teóricas puderam ser corroborados, ressaltando-se o fato de que o aluno da disciplina tem a possibilidade de montar ou perceber a montagem de cada parte de todo o aparato eletromecânico, o que não acontece quando o mesmo simplesmente liga ou desliga um motor já pronto e encapsulado. É oportuno ressaltar que, algumas partes do conjunto didático em questão foram construídas a partir de peças de descarte do próprio laboratório e até mesmo sucatas de eletrodomésticos (“Figura 6-b”).

### 4.3. Gerador Elementar

O conjunto didático concebido pode operar também na modalidade de gerador e, para tanto, faz-se uso do mesmo arranjo apresentado para o motor. Todavia, neste caso, a bobina móvel é girada com o uso de uma manivela conectada na extremidade do eixo oposta àquela do comutador. Com isso, a tensão induzida nos seus terminais, devido à variação do campo magnético no seu interior, é transmitida para um instrumento de medição, ou mesmo uma lâmpada, através do conjunto comutador/escova já utilizado na modalidade motor CC. A “Figura 7-a” mostra essa montagem com a espira parada e o miliamperímetro de zero-central em repouso e a “Figura 7-b” ilustra a espira em movimento onde o ponteiro do referido instrumento se encontra defletido para a direita.

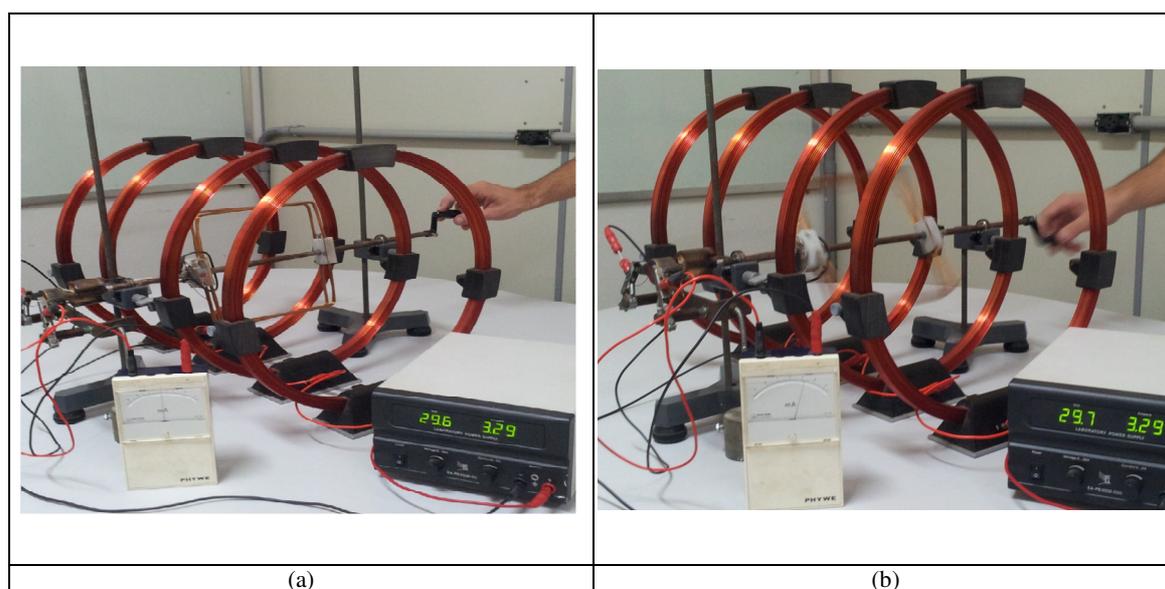


Figura 07 – Conjunto eletromecânico concebido montado como gerador na bancada de laboratório (b) detalhe do conjunto comutador/escova feitos de sucata.

Com a inversão do sentido de giro da manivela e da corrente produtora do campo magnético, bem como com a alteração da magnitude desta corrente, pode-se perceber a variação na referida tensão induzida. Neste caso também, foi possível que o aluno se defrontasse com alguns dos detalhes construtivos de um gerador elétrico e a suas relevâncias na operação deste equipamento.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conjunto didático concebido pelo programa de monitoria da disciplina de Eletricidade e Magnetismo do curso de Engenharia Elétrica da UFMT e apresentado neste trabalho mostrou-



se simples e eficaz no processo ensino/aprendizagem do tema no que tange às questões da conversão eletromecânica de energia. Os alunos da disciplina demonstraram maior interesse pelo assunto por terem a possibilidade de montar e entender cada parte construtiva da máquina rotativa elementar e, ainda, por perceber a possibilidade de desenvolver tais dispositivos a partir de componentes, aparentemente, sem utilidade. Durante o período de concepção e confecção do conjunto eletromecânico, pode-se verificar um grande interesse e envolvimento de outros alunos da graduação além daqueles da própria disciplina. Isso despertou o interesse dos mesmos em participar do programa de monitoria com vistas ao desenvolvimento de novos dispositivos que cooperem para o processo de ensino/aprendizagem. Finalmente, o desenvolvimento deste projeto proporcionou a motivação do próprio monitor ao constatar a sua grande contribuição no ensino de Engenharia Elétrica na UFMT, para além dos momentos de atendimento ao aluno.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fendt, W. Applets java de física, motor CC, Disponível em [http://www.walter-fendt.de/ph14br/electricmotor\\_br.htm](http://www.walter-fendt.de/ph14br/electricmotor_br.htm). Acessado em 4 de junho de 2013.

Fendt, W. Applets java de física, motor CC, Disponível em [http://www.walter-fendt.de/ph14br/generator\\_br.tm](http://www.walter-fendt.de/ph14br/generator_br.tm). Acessado em 4 de junho de 2013

FITZGERALD, ARTHUR E.; KINGSLEY JR., CHARLES.; UMANS, STEPHEN.D. Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência. Tradução de Anatólio Laschuk. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, p.186. 2006.

HAYT JR, WILLIAM.; BUCK, JOHN. A. Eletromagnetismo. [tradução Marco A. O. Schroeder]. McGraw-Hill, 8a Edição. p. 180 – 292. 2012.

HAYT JR, WILLIAM.; BUCK, JOHN. A. Eletromagnetismo. [tradução Amilton Soares Júnior]. McGraw-Hill Interamericana, 7ª Edição. p. 260 – 321. 2008.

### **ELEMENTARY ELECTROMECHANICAL CONVERTER AS A TEACHING/LEARNING TOOL IN ELECTRICAL ENGINEERING: A MONITORSHIP WORK**

**Abstract:** *This paper aims to present and analyze a project developed during a monitorship work between 2012-2013 for the course entitled Electricity and Magnetism of the Electrical Engineering Department of the Federal University of Mato Grosso (UFMT). This subject is dealt with during a period of 96 hours which consists of 64 hours of theoretical classes plus 32 hours of laboratory classes. Besides being the engineering students' first contact with the technical area, this discipline is crucial for the rest of Electrical Engineering course. Moreover, this subject requires abstract thinking skills as well as a high knowledge on Vector Analysis and Integral Calculus and, therefore, it can represent a daunting challenge*



*for the students. Thus, the teacher and monitor have made great effort to find out and develop assets to provide an efficient and motivating but less abstract approach to deal with electromagnetic phenomenon and energy conversion issues in the teaching/learning process. In this way, an elementary electromechanical converter set was conceived in order to visualize, in a qualitative way, the effect of the torque on a current loop due to the interaction between its magnetic dipole moment and an external magnetic field, as well as its behavior as an electric motor or generator. It must be mentioned that the main purpose of the kit is to allow the students to construct the electromechanical device gradually and, therefore, to pay attention to the details during the laboratory classes.*

**Key-words:** *Monitorship Work, Electromechanical Converter, Teaching/Learning.*