



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-13021-PRE/8298**

## **UTILIZAÇÃO DE BOBINAS PARA O CONTROLE DE ATITUDE DE SATÉLITES ARTIFICIAIS**

Rafael Navet de Souza \*

\*Bolsista Universidade São Marcos

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE), orientado pelo  
Dr. Ijar M. da Fonseca e co-orientado pelo Ms. Gustavo G. Detthow

INPE  
São José dos Campos  
2005



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **UTILIZAÇÃO DE BOBINAS PARA O CONTROLE DE ATITUDE DE SATÉLITES ARTIFICIAIS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Rafael Navet de Souza (Universidade São Marcos, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [navet\\_r@yahoo.com](mailto:navet_r@yahoo.com)

Dr. Ijar M. da Fonseca (DMC/INPE, Orientador)  
E-mail: [ijar@dem.inpe.br](mailto:ijar@dem.inpe.br)

Ms. Gustavo G. Detthow (Engenharia de Telecomunicações, Universidade  
São Marcos, SP, Co-orientador)  
E-mail: [detthow@yahoo.com](mailto:detthow@yahoo.com)

Junho de 2005

## SUMÁRIO

|  |   |
|--|---|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....  | 3 |
| 1.1. Histórico .....   | 3 |
| CAPÍTULO 2 – BOBINAS MAGNÉTICAS - CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....                     | 5 |
| 2.1. A Lei de Coulomb .....  | 5 |
| 2.2. Intensidade de Campo Elétrico .....   | 6 |
| 2.3. Densidade de Fluxo Elétrico.....  | 6 |
| 2.4. Energia e Potencial de uma Carga Pontual em Movimento num Campo Elétrico..... | 7 |
| 2.5. Diferença de Potencial e Potencial .....                                      | 8 |

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o resultado parcial do projeto PIBIC iniciado em maio de 2005. A proposta é o estudo de bobinas magnéticas para o controle de atitude de satélites artificiais, fundamental para a realização dos objetivos de missões espaciais. O sistema controle de atitude (SCA) deve satisfazer os requisitos de apontamento impostos pelas missões. O projeto de um SCA pode requerer dentre outras coisas atuadores e sensores. Os sensores são utilizados para fornecer informações de posição e velocidade do satélite para o controle. Os atuadores atuam no satélite para fazer manobras e/ou fazer pequenas correções visando manter a atitude do satélite de acordo com as especificações nominais. Atuadores podem ser jatos de gás, rodas de reação, bobinas magnéticas (bobinas de torque), dentre outros.

Neste trabalho o principal objetivo é o estudo das aplicações de bobinas magnéticas para o controle de atitude de satélites artificiais. As aplicações de bobinas para o controle de atitude de satélites artificiais se fundamentam na interação de bobinas magnéticas com o campo magnético terrestre para a geração de torque.

princípio é a interação do campo magnético das bobinas com o campo magnético da terra para a geração de torques visando manobrar o satélite ou fazer pequenas correções na sua atitude para mantê-la de acordo com a atitude nominal especificada.

Nesta primeira fase do projeto está sendo feito um estudo dos princípios fundamentais do eletromagnetismo tendo em vista o projeto de bobinas magnéticas que possam ser utilizadas em conjunção com o campo magnético da terra para o controle de atitude de satélites artificiais. Neste sentido o estudo, até o presente, apresenta os conceitos de campo magnético, momento magnético de bobinas, força magnética, fluxo magnético e torque. O trabalho se estenderá futuramente ao projeto de bobinas magnéticas para um nível de torque especificado, que, por interação com o campo magnético, possa ser utilizada para controlar satélites. O estudo deverá ser concluído com a simulação via computador, do controle geomagnético para o satélite de coleta de dados SCD-2.

O trabalho tem como objetivos o estudo dos fundamentos do eletromagnetismo para a geração de torque a partir de bobinas magnéticas, o estabelecimento de um roteiro para o cálculo e projeto de desenvolvimento de bobinas para uso em satélites, um estudo de caso de aplicação de bobinas para o controle de atitude do SCD-2.

### 1.1. Histórico

A idéia de se utilizar bobinas magnéticas para o controle de satélites artificiais surgiu nos primórdios da era espacial. Os primeiros satélites não dispunham de controle ativo e portanto não faziam uso de sensores e atuadores para controle de atitude. Entretanto, tão logo os satélites evoluíram para o uso de controle ativo as bobinas magnéticas passaram a constar na lista de atuadores para controle de atitude. O primeiro satélite, que inaugurou a era espacial, foi o Sputnik, da antiga União Soviética. Foi lançado em 1957 e não possui controle ativo de atitude. Em 1958 os Estados Unidos lançaram o Explorer 1, também sem controle ativo. Já em 1960 Harold Perkel [1] concebeu um sistema de controle de atitude de satélites em três eixos que incluía uma roda de quantidade de movimento (momentum wheel) e tres bobinas de torque. Portanto o uso deste tipo de atuador para satélites artificiais data do início da era espacial. Perkel propôs o uso da interação das bobinas magnéticas com o campo magnético terrestre para a geração dos torques necessários para o controle de

atitude dos eixos de guinada e rolamento. Desde então vários outros satélites utilizaram o princípio de interação das bobinas com o campo magnético da terra para sistemas de controle de atitude. Em particular, os satélites de coleta de dados do Brasil, o SCD-1 e SCD-2 utilizam bobinas como atuadores em seu sistema de controle de atitude (embora o SCD-1 seja controlado passivamente por rotação, seu sistema de controle contém uma bobina, que é utilizada para manobrar o satélite e evitar que uma das faces do mesmo seja iluminada pelo sol). As bobinas do satélite de coleta de dados SCD-2 [2], são comandadas por uma eletrônica de bordo para selecionar o chaveamento correto da bobina, de forma a aumentar ou reduzir a velocidade angular do satélite. Embora as missões de satélites científicos SACI-1 e SACI-2 tenham falhado, os sistemas de controle dos referidos satélites contemplavam o uso de bobinas magnéticas para fins de manobras de grandes ângulos e para controle de atitude. O SACI-1 utilizaria bobinas para manter os painéis solares do veículo apontados para o sol. O SACI-2 utilizaria bobinas para amortecer seu movimento rotacional imediatamente após sua injeção em órbita, para fazer a aquisição da atitude nominal e para fazer correções em atitude. Uma falha no sistema de comunicação levou à perda da missão SACI-1 enquanto que uma falha de ignição no veículo lançador de satélites do Brasil (VLS) levou a sua destruição e com ele, o SACI-2. As bobinas utilizados nos satélites das series SCDs e SACIs são todas bobinas com núcleo de ar, ou seja, as bobinas não contêm núcleo ferro-magnético.

O projeto de bobinas exige conhecimentos de alguns aspectos de elétrica, magnetismo e mecânica. No próximo capítulo serão apresentados conceitos fundamentais para a compreensão dos princípios de funcionamento de bobinas de torque para operar em conjunção com o campo magnético da terra.

Este relatório refere-se aos trabalhos desenvolvidos durante o mês de maio de 2005, quando teve início o projeto.

## CAPÍTULO 2 – BOBINAS MAGNÉTICAS - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O projeto de bobinas de torque para o controle de atitude de satélites artificiais requer o conhecimento e a compreensão de alguns conceitos básicos de elétrica, magnetismo e mecânica, especificamente a mecânica espacial que trata da dinâmica de atitude de satélites.

### 2.1. A Lei de Coulomb

A eletricidade estática já era conhecida dos gregos na antiguidade e foram eles os primeiros a utilizar a terminologia eletricidade. Perceberam que ao esfregar pequenos pedaços de âmbar nas próprias roupas o mesmo adquiria a propriedade de atrair fragmentos de penugem. Entretanto a eletricidade estática foi considerada por séculos como magia, denominada força vital. Foi em 1600 que Dr. Gilbert, físico da Rainha da Inglaterra estabeleceu que o vidro, enxofre, âmbar e outros materiais atraíam para si muitos outros materiais. Um pouco mais tarde Charles Coulomb (França) elaborou vários experimentos usando uma balança de torção sensível (inventada por ele) para determinar quantitativamente a força exercida entre dois objetos com cargas elétricas estáticas. Coulomb estabeleceu que a força entre dois objetos bem pequenos separados a grandes distâncias comparadas as suas dimensões (dos objetos) é proporcional à carga em cada um deles e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os objetos. Matematicamente:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2},$$

onde  $Q_1$  e  $Q_2$  são cargas, positivas ou negativas.  $R$  refere-se à distância entre os dois objetos e  $k$  é uma constante de proporcionalidade dada por

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

na qual  $\epsilon_0$  é a permissividade do espaço livre entre os dois objetos. A magnitude de  $\epsilon_0$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} = \frac{1}{36\pi} \text{ F/m (Farads por metro)}.$$

Portanto a Lei de Coulomb pode ser escrita como

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

## 2.2. Intensidade de Campo Elétrico

Se considerarmos uma carga fixa e uma outra se movendo lentamente em torno dela, observaremos o surgimento de um campo de força envolvendo a carga móvel. Seja esta carga  $Q_t$ . A força sobre ela é dada pela lei de Coulomb, na forma:

$$\frac{\vec{F}}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}} \hat{a}_{1t},$$

na qual  $Q_1$  refere-se à carga fixa,  $\vec{F}_t$  é o vetor força e  $\hat{a}_{1t}$  é o versor da linha imaginária que une as duas cargas. O subscrito 1t refere-se à direção do seguimento de reta unindo as duas cargas. Esta forma de escrever a Lei de Coulomb permite definir a intensidade de campo elétrico, dada pela expressão da direita na equação anterior. A intensidade de campo elétrico deve ser medida em unidades de Newton por Coulomb, ou seja, força por unidade de carga (consistente com a expressão acima). Matematicamente:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_t}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2} \hat{a}_{1t}$$

Esta é a expressão da intensidade do campo elétrico devido a uma só carga pontual no vácuo ( $Q_1$ ). O índice pode ser dispensado e a fórmula pode ser escrita em termos de  $Q$ .

## 2.3. Densidade de Fluxo Elétrico

O conceito de densidade de fluxo elétrico se deve a Faraday. Ele montou um experimento com esferas carregadas. Ele descobriu que a carga total na esfera externa de seu experimento era igual, em magnitude, à carga original da esfera interna e que isto era válido independente do material dielétrico que ele usara para separar ambas as esferas. Faraday concluiu que da esfera interna para a externa havia um certo tipo de deslocamento, independente do meio. Ele descobrira o fluxo elétrico (fluxo de deslocamento ou simplesmente deslocamento). Faraday mostrou também que uma carga positiva maior na esfera interna induzia uma carga negativa correspondente na esfera externa. A densidade de campo elétrico, medida em coulombs por metro quadrado é dada por

$$\vec{D}|_{r=a} = \frac{Q}{4\pi a^2} \hat{a}_r$$

$$\vec{D}|_{r=b} = \frac{Q}{4\pi a^2} \hat{a}_r,$$

$$a \leq r \leq b$$

para as esferas interna e externa, respectivamente. Nestas expressões  $r$  refere-se à distância radial a partir do centro das esferas. Se fizermos a esfera interna tender a zero mas mantendo a mesma carga  $Q$  podemos reescrever a expressão na forma geral:

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \hat{a}_r$$

No vácuo pode ser mostrado que

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$$

#### 2.4. Energia e Potencial de uma Carga Pontual em Movimento num Campo Elétrico

Para mover uma carga contra um campo elétrico, é necessário exercer uma força igual e de sentido contrário àquela exercida pelo campo. Isto requer trabalho (dispêndio de energia). Caso se queira mover a carga na mesma direção do campo, tem-se então que o dispêndio de energia torna-se negativo. O campo realiza o trabalho.

Suponhamos que se queira deslocar uma carga  $Q$  de uma distância  $dL$ , em um campo elétrico  $E$ . A força sobre  $Q$  devido ao campo é dada por

$$\vec{F}_E = Q\vec{E}$$

A componente da força na direção do deslocamento  $dL$  é dada por

$$F_{EL} = \vec{F} \cdot \hat{a}_L = Q\vec{E} \cdot \hat{a}_L$$

Portanto a força que deve ser aplicada deve ser da mesma magnitude mas de sinal contrário:

$$F_{apl} = -Q\vec{E} \cdot \hat{a}_{EL}$$

O diferencial de trabalho ou energia é então dado por

$$dW = -Q\vec{E} \cdot d\vec{L}$$

O trabalho necessário para deslocar a carga de uma distância finita é determinado pela integral:



$$W = -Q \int_{inic}^{final} \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

Esta integral definida é a base da teoria dos campos.

## 2.5. Diferença de Potencial e Potencial

A partir do conceito de trabalho pode-se definir a diferença de potencial,  $V$ , como o trabalho realizado por uma força externa ao deslocar uma unidade de carga positiva de um ponto a outro em um campo elétrico. A diferença de potencial pode ser escrita como:

$$V = - \int_{inic}^{final} \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

Convencionou-se definir a diferença de potencial entre dois pontos,  $A$  e  $B$ , como  $V_{AB}$  como o trabalho realizado ao se deslocar uma unidade de carga de  $B$  até  $A$ . Com esta notação  $B$  é a posição inicial e  $A$  a posição final, de tal forma que a integral pode ser escrita assim

$$V_{AB} = - \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

$V_{AB}$  será positiva se o trabalho for realizado para deslocar uma carga positiva de  $B$  até  $A$ .

---

### NOTA:

Este foi o trabalho realizado em maio. O capítulo deve incluir mais conceitos não apenas de elétrica e magnetismo mas também de mecânica.