



# **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS CAUSAS DAS VIBRAÇÕES EM PAINÉIS SOLARES E SEUS EFEITOS SOBRE A ATITUDE DE UM SATÉLITE ARTIFICIAL**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO  
TECNOLÓGICA (PIBIT)**

**GILLES A. S. AUGUSTO**

Sob a orientação de:

**Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza  
Dr. Mário César Ricci**

**INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - DMC**

**15/07/2011**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concepção PMM.....	5
Figura 2 - BAPTA vista frontal em corte (3).....	8
Figura 3 - Motor de passo bipolar.....	8
Figura 4 - 4 passos inteiros em sistema unipolar. Adaptação de (4).....	9
Figura 5 - 8 meio-passos em sistema unipolar. Adaptação de (4).....	10
Figura 6 - 4 passos inteiros em sistema bipolar. Adaptação de (4).....	10
Figura 7 - 8 meio-passos em sistema bipolar. Adaptação de (4).....	10
Figura 8 - Circuito de acionamento tipo estrela.....	12
Figura 9 - Redutor harmônico - vista explodida.....	13
Figura 10 - Modelo para BAPTA. Adaptação de (7).....	14



## SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO .....	3
1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO PROJETO .....	5
1.1 – PEQUENOS SATÉLITES ARTIFICIAIS E O PROJETO PMM .....	5
1.2 – JUSTIFICATIVA DO PROJETO .....	6
2 – OBJETIVO .....	7
3 – METODOLOGIA .....	7
4 – DOS DISPOSITIVOS .....	7
4.1 – MECANISMO ACIONADOR DE PAINÉIS SOLARES – BAPTA .....	7
4.2 – MOTOR DE PASSOS .....	8
4.2.1 – Princípio de Funcionamento .....	9
4.2.2 – Formas de Acionamento .....	11
4.3 – CONJUNTO REDUTOR HARMÔNICO .....	12
5 – MODELOS .....	14
5.1 – MODELO MECÂNICO .....	14
5.2 – MODELO ELÉTRICO .....	17
5.2.1 – Para as Tensões das Fases: .....	17
5.2.2 – Para o Torque do Motor: .....	17
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE .....	18
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	19



## APRESENTAÇÃO

O presente trabalho estuda o mecanismo BAPTA<sup>1</sup>, empregado no acionamento de painéis solares de pequenos satélites, como o programa PMM<sup>2</sup> do INPE. Tendo como meta principal quantificar a influência que o funcionamento desse mecanismo tem sobre a atitude do satélite, buscamos seguir a seguinte estratégia de pesquisa, dividida em duas fases:

### FASE I

Planejamos a fase I para o primeiro ano da pesquisa e, por isso, matéria desse primeiro relatório. Essa fase comporta um maior trabalho de revisão teórica, como meio de ambientação ao assunto, bem como aos processos e métodos de pesquisa e desenvolvimento voltados à engenharia construtiva que o INPE pratica. Dividimo-la em duas etapas:

#### *I. Constituição do Mecanismo*

Nessa primeira etapa buscamos investigar os aspectos construtivos do BAPTA, assim como sua ação sobre as demais partes do satélite.

#### *II. Modelagem*

Aqui fazemos um levantamento dos modelos matemáticos disponíveis na literatura especializada. Essa etapa tem especial importância para maior compreensão dos fenômenos envolvidos no projeto de engenharia foco de nossos estudos, e também, para a prática do método científico básico.

Veremos mais adiante que são escassos os textos publicados sobre o assunto, em parte – assim o cremos – por ser matéria de domínio da indústria, já que analisamos minuciosamente um dispositivo que, embora de grande uso pela engenharia mecânica, ainda possui caráter de especificidade.

Podemos resumir assim essa etapa como a compreensão dos modelos disponíveis e a identificação das lacunas ou excessos na teoria.

<sup>1</sup> Do inglês Bearing and Power Transfer Assembly.

<sup>2</sup> Plataforma Multi-Missão, apresentada mais adiante.



## FASE II

Fase planejada para o segundo ano da pesquisa (relatório futuro). Essa será a fase de refinamento teórico e prática experimental, na forma de simulações matemáticas com software especializado. Está dividida em três etapas, que segue o encadeamento lógico das primeiras:

### *III. Aperfeiçoamento dos Modelos*

É o momento de maior crítica. Aqui buscaremos aprimorar os modelos propostos, subtraindo os excessos, completando as lacunas e simplificando a teoria como um todo. Como tradicionalmente se dá, lançaremos mão do método emergente, iniciando as simulações com o menor número de variáveis possível e tornando-o mais complexo conforme a teoria passe a ser confirmada pelos dados experimentais.

### *IV. Simulações Matemáticas*

Com o modelo refinado por nossas suposições teóricas, passaremos para a etapa de implementação em ambiente de simulação matemática. O objetivo aqui é, em primeiro momento, confirmar o modelo teórico e, finalmente, obter a amplitude das perturbações geradas pelo BAPTA sobre a atitude do satélite.

### *V. Conclusões e Propostas de Melhoria de Projeto*

Onde faremos sugestões (fundamentadas por nossa pesquisa) de melhorias no projeto da PMM, caso sejam necessárias. Esperamos assim contribuir para que o projeto construtivo da plataforma resulte em maior eficiência operacional, com menores índices de vibrações no corpo de equipamentos de sua carga útil.



## 1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO PROJETO

### 1.1 – PEQUENOS SATÉLITES ARTIFICIAIS E O PROJETO PMM

Nas últimas décadas, a engenharia dos programas espaciais vem explorando cada vez mais o nicho dos pequenos satélites, devido principalmente aos altos custos de lançamento e complexidade no desenvolvimento.

A miniaturização de componentes eletrônicos (especialmente os microprocessadores), o desenvolvimento de novos e mais leves materiais de engenharia (como compósitos estruturais e sensores diversos), além da alta capacidade de integração de sistemas e subsistemas, permitiram às agências de países desenvolvidos ou em desenvolvimento, bem como às empresas, universidades e outros órgãos, explorar este espaço tecnológico (1).

No Brasil, destaca-se atualmente a Plataforma Multi-Missão (PMM), que é uma plataforma de subsistemas comuns à operação de satélites de baixa órbita. Foi concebida para acomodar cargas úteis de missões de várias finalidades, como estudos científicos, observação da Terra, ou telecomunicação (2).

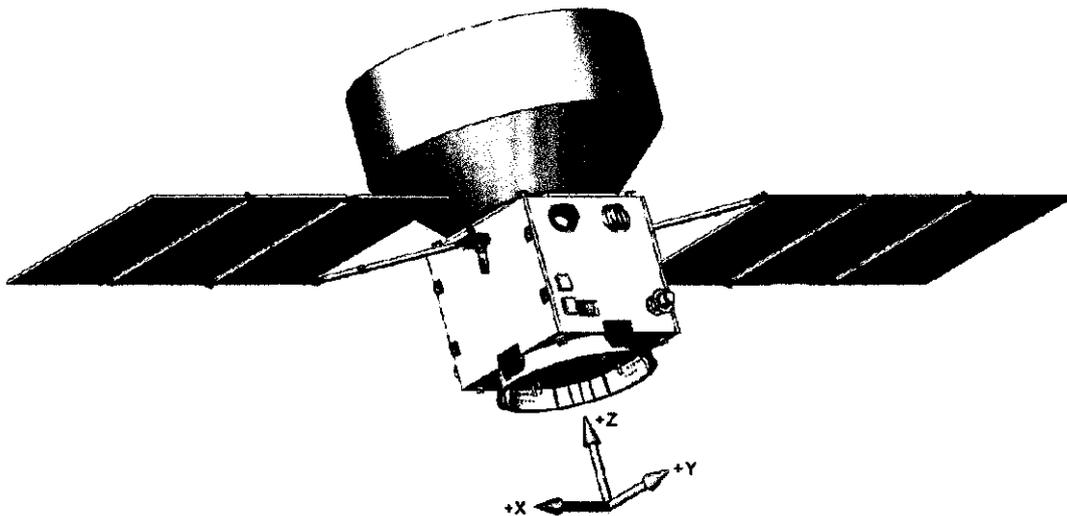


Figura 1 - Concepção PMM



Seus subsistemas estão divididos segundo suas utilidades:

- Estrutura;
- Suprimento de energia;
- Controle de temperatura;
- Controle de atitude e tratamento de dados;
- Propulsão;
- Telemetria e comandos.

Tais subsistemas incluem diversas causas das vibrações em painéis solares e seus efeitos sobre a atitude de um satélite artificial. Dentre elas destaca-se o sistema de apontamento dos painéis solares e sua influência no movimento de atitude do satélite. Este será o foco deste trabalho.

## 1.2 – JUSTIFICATIVA DO PROJETO

Um satélite orbitando em qualquer faixa de altitude está exposto às diversas causas que perturbam sua atitude (orientação do satélite em relação ao seu centro de massa). Podemos dividir essas causas em dois grupos: externas ou internas. Podemos citar como causas externas ao satélite: arrasto aerodinâmico (mais significativo em satélites de baixas órbitas); ventos solares; campos eletromagnéticos diversos; detritos espaciais; campos gravitacionais de outros corpos celestes; entre outras. Dentre as diversas causas internas de perturbação da atitude, destaca-se a vibração induzida por atuadores. Vibrações devidas ao movimento de partes móveis diminuem o desempenho de equipamentos. O objeto de nosso estudo é a quantificação dessa perturbação devida ao mecanismo de acionamento de painéis solares.

Conhecer como e em que proporção as reações de acionamento das partes móveis (mais precisamente o BAPTA) afetam a atitude do satélite, permite-nos melhor dimensionar os mecanismos de controle e aperfeiçoar a lógica de correção, o que nos leva a reduzir a carga de equipamentos ou, no mínimo, melhorar o desempenho do satélite.



## **2 – OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é estudar as causas das vibrações em painéis solares e seus efeitos sobre a atitude de um satélite artificial. Dentre essas causas, destaca-se o sistema de apontamento dos painéis solares (BAPTA). Este será o foco principal deste trabalho.

## **3 – METODOLOGIA**

Para atingir o objetivo acima, adotaremos os passos descritos a seguir.

- 1) Revisar os atuais modelos matemáticos que explicam as reações no mecanismo de acionamento dos painéis solares de pequenos satélites;
- 2) Corrigir ou apenas adaptar esses modelos às demandas do projeto PMM, efetuando simulações numéricas que possam prever o comportamento do sistema de controle de atitude quando de modificações em sua lógica de correções;
- 3) Divulgar dos resultados a quem for de interesse.

## **4 – DOS DISPOSITIVOS**

### **4.1 – MECANISMO ACIONADOR DE PAINÉIS SOLARES – BAPTA**

Quando em órbita, um satélite tem sua base geralmente alinhada com a superfície do globo, o que o obriga a continuamente corrigir a posição dos painéis solares para mantê-los totalmente voltados para o Sol, obtendo o maior rendimento possível. Este movimento, no caso dos pequenos satélites, dá-se em torno de um eixo e é provido pelo BAPTA, mecanismo também responsável por transmitir a potência gerada e outros sinais entre os painéis e a plataforma (3). Ele pode ser dividido em três principais partes: motor de passos; redutor harmônico; e conjunto de discos deslizantes.

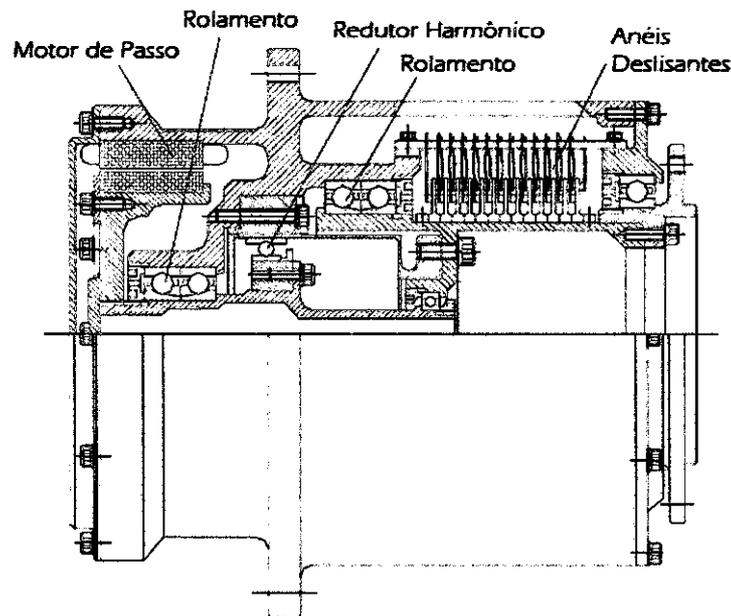


Figura 2 - BAPTA vista frontal em corte (3)

## 4.2 – MOTOR DE PASSOS

Adaptando a definição de Brites e Santos (4), motores de passos são dispositivos eletromecânicos capazes de converter pulsos elétricos em movimentos angulares discretos de um eixo ou rotor. A amplitude angular dos incrementos de rotação tem relação direta com o número de passos do motor. Já a direção do movimento depende da seqüência de aplicação dos pulsos elétricos, e a velocidade de rotação, da frequência destes.

A grande vantagem no uso de motores de passos deve-se à precisão em seu movimento. Por isso seu largo uso em equipamentos que requerem sistemas de controle de posição, como impressoras; máquinas CNC; sistemas de automação industrial em geral; e em tecnologia aeroespacial. Sua principal desvantagem encontra-se na incapacidade de desenvolver altos torques e velocidades de rotação, em relação aos demais

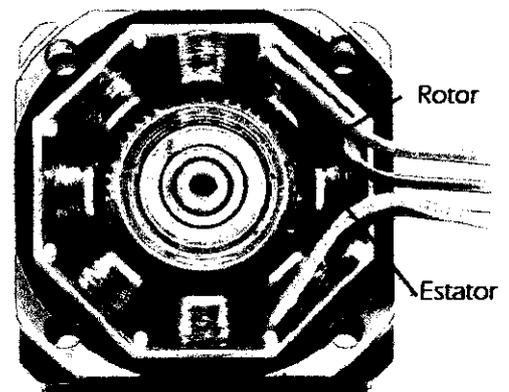


Figura 3 - Motor de passo bipolar.



motores elétricos. Outra desvantagem é que, dependendo da aplicação, o sistema requer complexos dispositivos eletrônicos de controle. A Figura 3 um motor de passo tipo híbrido bipolar (fonte: pololu.com).

#### **4.2.1 – Princípio de Funcionamento**

O torque aplicado sobre o eixo de um motor de passos é gerado pela atração momentânea entre rotor e estator. O rotor (em um motor híbrido) é um ímã permanente. Cada dente do rotor forma um pólo desse ímã que possui seu oposto na outra extremidade da peça. O estator funciona como um solenóide. Para dar um passo no rotor, os estatores são energizados (um por vez, no sistema *unipolar* ou dois opostos simultaneamente, no sistema *bipolar*), o que produz um campo capaz de atrair os dentes do rotor, também de pólos opostos. O controle do movimento do rotor é dado pela forma como se acionam esses solenóides e o número de passos é dado pelo número de alinhamentos possíveis.

Para ilustrar esse movimento, podemos tomar como exemplo um motor de passos de quatro estatores e rotor mínimo (dois pólos). Nessa configuração, são possíveis quatro passos inteiros ou oito meio-passos tanto no sistema unipolar como no bipolar, como mostrados nas Figuras 4-7.

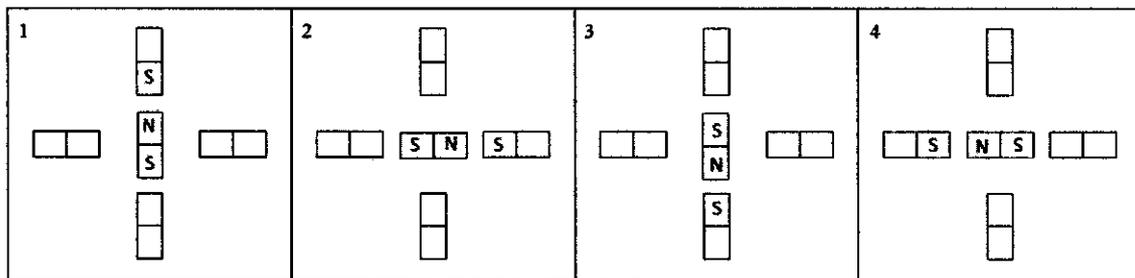


Figura 4 - 4 passos inteiros em sistema unipolar. Adaptação de (-)

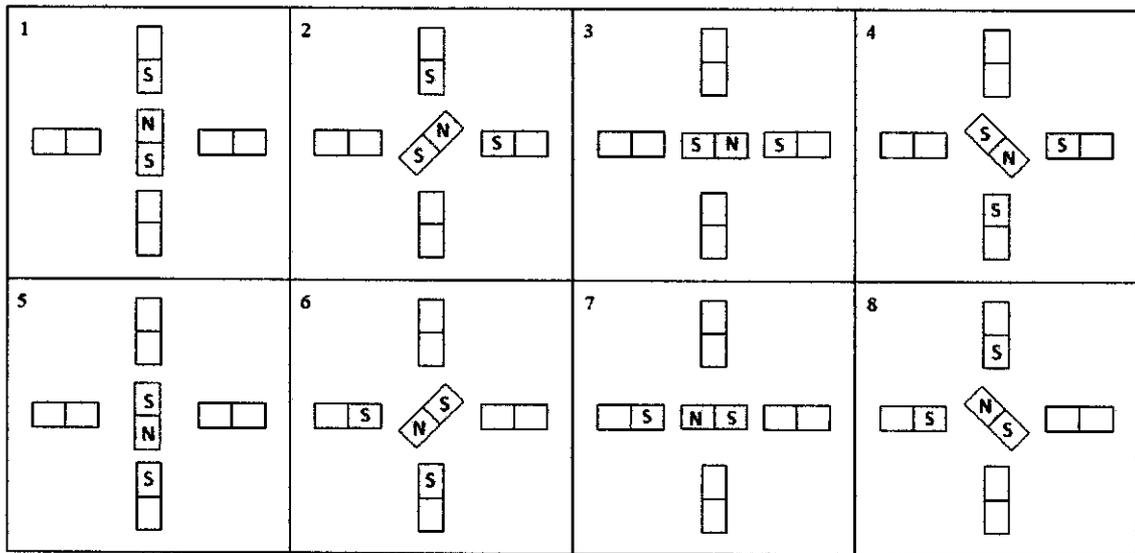
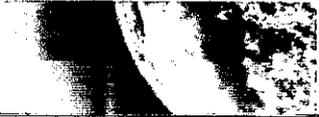


Figura 5 - 8 meio-passos em sistema unipolar. Adaptação de (4)

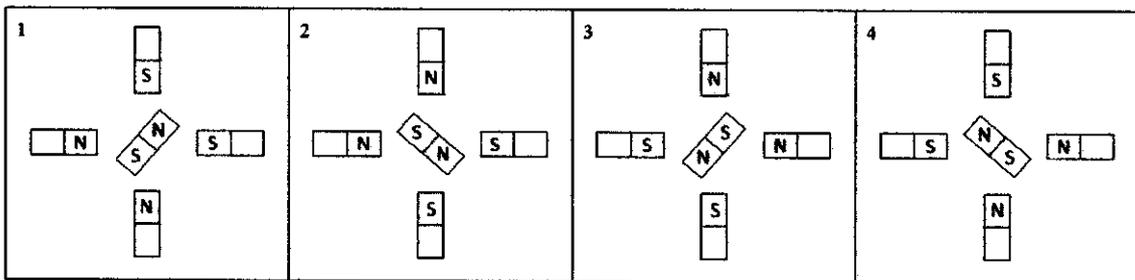


Figura 6 - 4 passos inteiros em sistema bipolar. Adaptação de (4)

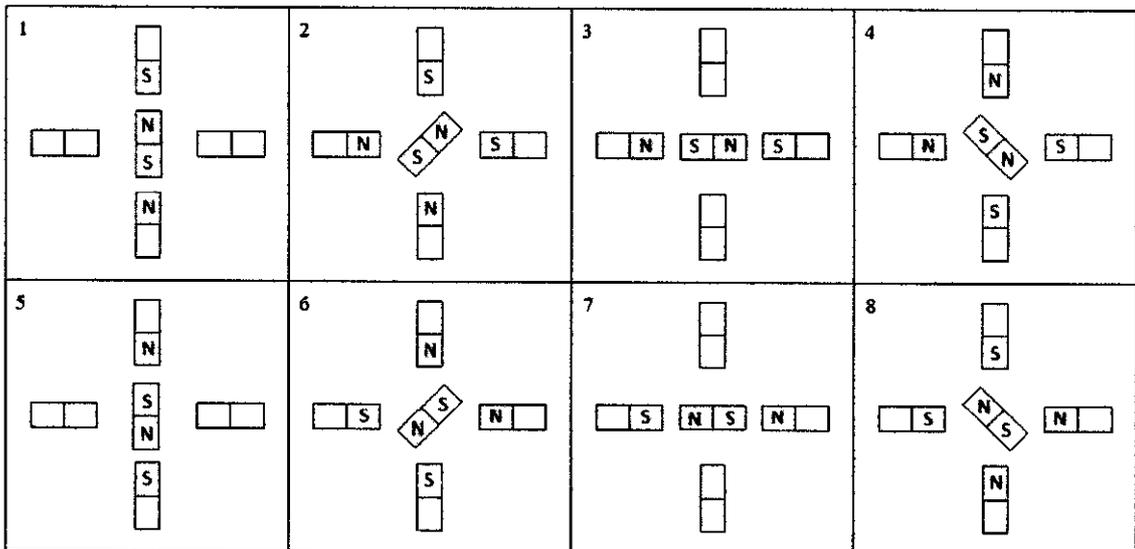
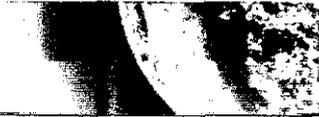


Figura 7 - 8 meio-passos em sistema bipolar. Adaptação de (4)



#### **4.2.2 – Formas de Acionamento**

Considerando as diferentes configurações e condições operacionais, são diversas as formas de acionamento de motores de passos. Sucintamente, abordaremos duas: acionamento bipolar independente e bifilar em circuito estrela.

##### *I. Acionamento Bipolar Independente*

Empregado em motores bifásicos, possui um único enrolamento por fase e a comutação se dá pela inversão da corrente na bobina e conseqüente inversão de pólo magnético. Para isso, esse tipo de acionamento deve contar com um circuito de ponte “H” que opere a comutação. Há duas ligações por fase e nenhuma em comum.

##### *II. Acionamento Bifilar em Circuito Estrela*

O enrolamento bifilar é provavelmente o mais utilizado, possui uma ligação central em terra que divide as bobinas. Evita, assim, o uso de circuito auxiliar de comutação.

Muito utilizado em motores trifásicos, a partida estrela proporciona uma maior impedância, menor tensão nas bobinas e conseqüente diminuição na corrente de partida. Em motores de torque contínuo, ao aproximar-se da rpm nominal há o fechamento para circuito triângulo. Para nossos modelos, consideraremos apenas a partida em circuito estrela (Figura 8), pois é a forma de acionamento do motor de passo.

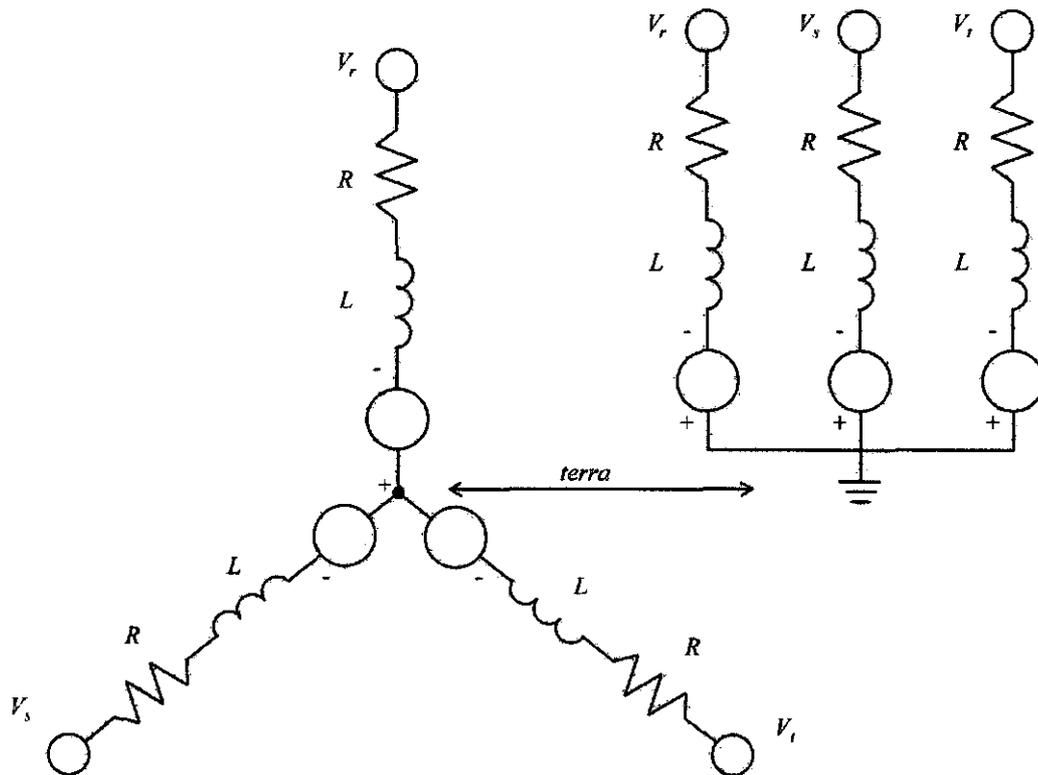


Figura 8 - Circuito de acionamento tipo estrela

### 4.3 – CONJUNTO REDUTOR HARMÔNICO

Desenvolvido pelo norte-americano C. W. Musser (5), o conjunto redutor harmônico inovou ao utilizar a elasticidade dos metais como forma de transmissão de potência de eixo. Compreende três principais componentes: geratriz elíptica; anel flexível; e anel circular.

A geratriz elíptica tem a forma de um rolamento comum. No entanto, como o próprio nome sugere, tem a forma elíptica. Geralmente é fixada ao eixo de entrada de potência.

O anel flexível tem a forma de uma cuba fina de metal com dentes em sua face externa. Sua parte interna, chamado diafragma, é fixada ao eixo de saída de potência.

Já o anel circular é um disco rígido de aço com dentes em sua face interna e em maior número que os do disco flexível. É fixado à estrutura do redutor e não executa movimento de transmissão. A Figura 9 mostra um redutor harmônico típico em vista explodida.

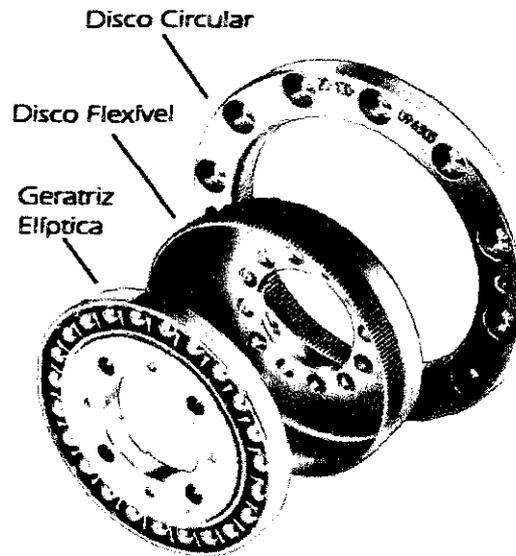
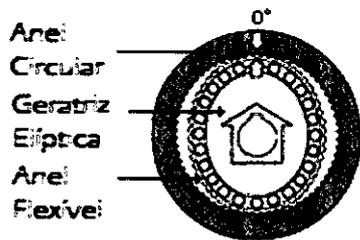
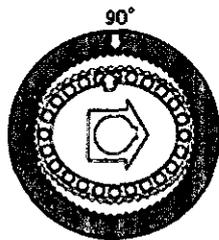


Figura 9 - Redutor harmônico - vista explodida

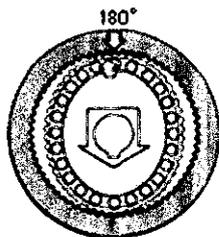
Seu princípio de funcionamento é relativamente simples (6):



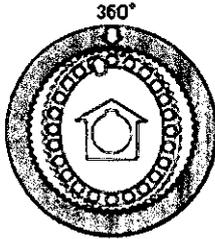
O anel flexível é defletido pela geratriz elíptica de forma que seus dentes sobre a extremidade de seu eixo maior se encaixem totalmente nos dentes do anel circular.



Quando a geratriz elíptica é rotacionada no sentido horário com o anel circular fixo, o anel flexível sofre uma deformação elástica fazendo com que seus dentes encaixados no anel circular tenham que se recomodar. Isso provoca um movimento anti-horário no anel flexível.



Ao girar em 180°, a geratriz elíptica provoca um movimento contrário no anel flexível, da ordem de um dente relativo ao anel circular.



Em  $360^\circ$ , o movimento é da ordem de dois dentes, uma vez que o anel flexível possui dois dentes a menos que o anel circular.

Este sistema apresenta como principais vantagens: alta taxa de redução; rendimento superior a 90%; torque limite elevado; alta confiabilidade.

## 5 – MODELOS

### 5.1 – MODELO MECÂNICO

Para a análise do BAPTA, encontramos um bom modelo em Farley & Ngo (7), o qual servirá de base para nossos estudos. Este foi usado no CBERS2 e é reproduzido na Figura 10:

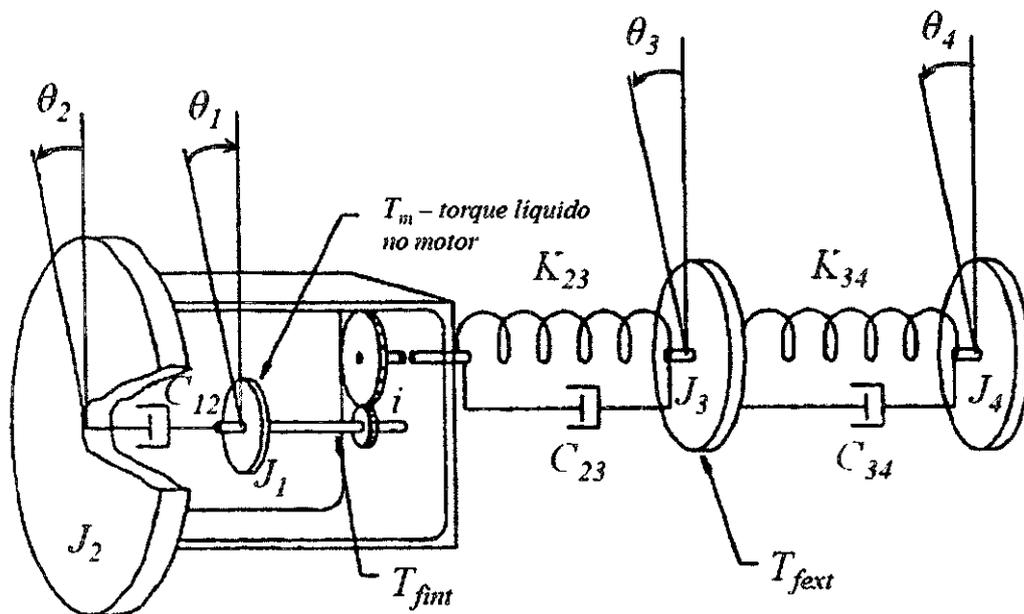


Figura 10 - Modelo para BAPTA. Adaptação de (7)

Para o atuador Shaeffer Magnetics tipo 2, encontramos os seguintes parâmetros (8):



Dado	Símbolo	Valor	Unidade
Inércia do rotor do motor	$J_1$	$9,38 \times 10^{-6}$	$\text{kgm}^2$
Inércia do satélite	$J_2$	44,7538	$\text{kgm}^2$
Inércia da flange de saída	$J_3$	0,03	$\text{kgm}^2$
Inércia do painel solar	$J_4$	1,524	$\text{kgm}^2$
Rigidez do redutor harmônico	$K_{23}$	677,9	Nm/rd
Rigidez da carga	$K_{34}$	50	Nm/rd
Amortecimento viscoso do rotor	$C_{12}$	0	Nms/rd
Amortecimento viscoso do redutor harmônico	$C_{23}$	0,1	Nms/rd
Amortecimento viscoso da carga	$C_{34}$	0,0002	Nms/rd
Atrito externo de Coulomb	$T_{fext}$	0,268	Nm
Atrito interno de Coulomb	$T_{fint}$	0,117	Nm
Relação de transmissão	$i$	100:1	-
Ângulo de passo de saída	$\Delta\theta_r$	$2^\circ$	-

Tabela 1 - Dados para o atuador Shaeffer tipo 2

Fazendo uso deste modelo, podemos deduzir as equações de Farley & Ngo para o movimento das partes da seguinte maneira:

### 5.1.1 – Para a Asa do Painel Solar:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{torque líquido} \\ \text{sobre o painel} \end{array} \right] = - \left[ \begin{array}{c} \text{rigidez de carga} \\ \text{flange/painel} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{amortecimento viscoso} \\ \text{flange/painel} \end{array} \right] \text{ ou:}$$

$$T_4 = -K_{34}\Delta\theta_{34} - C_{34}\Delta\dot{\theta}_{34} \quad [1]$$

$$\ddot{\theta}_4 = [-K_{34}(\theta_4 - \theta_3) - C_{34}(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3)]/J_4 \quad [2]$$

### 5.1.2 – Para a Flange de Conexão do Painel:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{torque líquido} \\ \text{sobre a flange} \end{array} \right] = - \left[ \begin{array}{c} \text{rigidez de carga} \\ \text{RH/flange} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{amort. viscoso} \\ \text{RH/flange} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{torque líquido} \\ \text{sobre o painel} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{atrito externo} \\ \text{de Coulomb} \end{array} \right]$$

ou:

$$T_3 = -K_{23}(\theta_3 - \theta_{RH}) - C_{23}(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_{RH}) - T_4 - T_{fext} \quad [3]$$



Sendo a posição ( $\theta_{RH}$ ) e a velocidade ( $\dot{\theta}_{RH}$ ) angular na saída do redutor harmônico dadas por:

$$\theta_{RH} = \theta_2 \left(1 + \frac{1}{i}\right) - \frac{\theta_1}{i} + E_r \quad [4]$$

$$\dot{\theta}_{RH} = \dot{\theta}_2 \left(1 + \frac{1}{i}\right) - \frac{\dot{\theta}_1}{i} \quad [5]$$

E recombinação com a equação [2], temos para a equação [3]:

$$\ddot{\theta}_3 = \left\{ -K_{23} \left[ \theta_3 - \theta_2 \left(1 + \frac{1}{i}\right) + \frac{\theta_1}{i} - E_r \right] - C_{23} \left[ \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2 \left(1 + \frac{1}{i}\right) + \frac{\dot{\theta}_1}{i} \right] - K_{34} (\theta_4 - \theta_3) - C_{34} (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3) - T_{fext} \right\} / J_3 \quad [6]$$

### 5.1.3 – Para o Corpo do Satélite:

$$T_2 = \frac{K_{23}(\theta_3 - \theta_{RH})}{\left(1 + \frac{1}{i}\right)} + C_{12}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + C_{23}(\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_{RH}) \left(1 + \frac{1}{i}\right) - T_m \left(1 + \frac{1}{i}\right) - C_{12}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + T_{fint} + T_{fext} \quad [7]$$

Combinando com as equações [4] e [5]:

$$\ddot{\theta}_2 = \left\{ \frac{K_{23}(\theta_3 - \theta_2(1 + \frac{1}{i}) + \frac{\theta_1}{i} - E_r)}{\left(1 + \frac{1}{i}\right)} + C_{12}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + C_{23} \left( \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \left(1 + \frac{1}{i}\right) - \frac{\dot{\theta}_1}{i} \right) \left(1 + \frac{1}{i}\right) - T_m \left(1 + \frac{1}{i}\right) - C_{12}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + T_{fint} + T_{fext} \right\} / J_2 \quad [8]$$

### 5.1.4 – Para o Rotor:

$$T_1 = -\frac{K_{23}(\theta_3 - \theta_{RH})}{i} - C_{12}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - \frac{C_{23}(\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_{RH})}{i} + T_m + T_{fint} \quad [9]$$

Combinando com as equações [4] e [5]:

$$\ddot{\theta}_1 = \left\{ -\frac{K_{23} \left[ \theta_3 - \theta_2 \left(1 + \frac{1}{i}\right) + \frac{\theta_1}{i} - E_r \right]}{i} - C_{12}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - \frac{C_{23} \left[ \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \left(1 + \frac{1}{i}\right) - \frac{\dot{\theta}_1}{i} \right]}{i} + T_m + T_{fint} \right\} / J_1 \quad [10]$$



## 5.2 – MODELO ELÉTRICO

Encontramos um modelo elétrico para nosso motor de passo em Sinch (2) e reproduzido por Braga(3), onde temos as seguintes variáveis (com unidades SI):

Variável	Símbolo
Tensões de alimentação das fases $r, s$ e $t$	$V_r, V_s, V_t$
Tensão de alimentação	$V_{cc}$
Correntes das fases $r, s$ e $t$	$i_r, i_s, i_t$
Inércia do painel solar	$J_A$
Indutância	$L$
Constante de carga de eixo	$K_T$
Torque do motor	$T_m$

Tabela 2 - Variáveis do modelo elétrico do motor de passo

### 5.2.1 – Para as Tensões das Fases:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{tensão de alim.} \\ \text{da fase} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{tensão nominal} \\ \text{da fase} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{força eletromotriz} \\ \text{da bobina} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{carga de} \\ \text{eixo} \end{array} \right]$$

$$V_r = Ri_r + L \frac{di_r}{dt} - K_T \dot{\theta} \sin \theta \quad [11]$$

$$V_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} - K_T \dot{\theta} \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad [13]$$

$$V_t = Ri_t + L \frac{di_t}{dt} - K_T \dot{\theta} \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \quad [14]$$

### 5.2.2 – Para o Torque do Motor:

$$T_m = -K_T \left[ i_r \sin \theta + i_s \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_t \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \quad [15]$$



## **6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE**

No cumprimento do plano de pesquisa, houve sucesso na primeira etapa. O levantamento das características construtivas do mecanismo BAPTA, como previsto, foi essencial à compreensão de alguns modelos encontrados na literatura (os aqui reproduzidos ou adaptados). Damos como ainda incompleta a segunda etapa. Os modelos que aqui expomos já foram utilizados com sucesso em contexto semelhante (3), no entanto, ainda parecem-nos obscuros, dado que seus autores não relatam os modos pelos quais os construíram. Devido essa dificuldade, não expomos todos os modelos pesquisados, preferindo amadurecer o esforço por construir um próprio (ainda que embasados pelos que aqui discutimos). Tal tarefa pareceria pouco prática, não fosse um de nossos prepostos: o aprendizado através da pesquisa.

Assim, revisamos as etapas II e III de nosso plano de pesquisa, concentrando-nos no que para nós se mostra a parte mais espinhosa deste trabalho: a confecção do modelo teórico.

Não houve resultados a serem discutidos nessa fase, uma vez que as simulações serão realizadas na fase seguinte da pesquisa.



## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Small Satelites Home Page. [Online] [Citado em: 30 de janeiro de 2011.] <http://centaur.sstl.co.uk/SSHP/>.
2. AMARAL, J. C. Análise Projeto e Simulação de uma Arquitetura de Controle Reconfigurável para a Plataforma Multi-Missão. *Dissertação de Mestrado*. s.l. : INPE ref. 15682-TDI/1456, fevereiro de 2008.
3. RICCI, M. C. e VAROTTO, S.E. C. Development of a Bearing and Power Transfer Assembly Mechanism for Samell Satelites. *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*. novembro de 1999.
4. BRITES, F. G. e SANTOS, V. P. A. Motor de Passos. *Programa de Educação Tutorial*. s.l. : Universidade Fluminense, julho de 2008.
5. Principles of Harmonic Drives. [Online] [Citado em: 25 de janeiro de 2011.] [http://www.hds.co.jp/HDS\\_hp\\_english/english/principle/index.html](http://www.hds.co.jp/HDS_hp_english/english/principle/index.html).
6. The Basics of Harmonic Drive Gearing. [Online] [Citado em: 24 de janeiro de 2011.] <http://www.powertransmission.com/issues/0706/harmonic.htm>.
7. FARLEY, R. and NGO, S. Development of a Solar Array Deployment and Drive System for XTE Spacecraft. s.l. : NASA ref.95-27284.
8. BRAGA, R. A. Modelamento de Atuador Tipo Motor de Passos. *Dissertação de Mestrado*. s.l. : INPE, janeiro de 2003.
9. SINCH, G. Mathematical Modeling of Step Motors. *Symp. Proceedings, Incremental Motion Systems and Devices*. s.l. : University of Illinois, março de 1972.
10. SOUZA, R. N. e RICCI, M. C. Simulation of Attitude Maneuvers of Contingency Mode of the PMM. *Brazilian Conference on Dynamics, Control and Teir Applications*. maio de 2006.