

INTERLIGAÇÃO ELETRODINÂMICA DE CORPOS ORBITAIS

Antonio Faria Neto^{1,2} (antfarianeto@gmail.com)

Francisco Antonio Lotufo¹ (falotuf@yahoo.com.br)

¹Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Eng. Elétrica. Av. Doutor Ariberto Pereira da Cunha, 373, CEP 12516-410, Guaratinguetá-SP.

²Universidade de Taubaté, Departamento de Matemática e Física. Av. Marechal Deodoro da Fonseca, 605, Jardim Santa Clara, CEP 12080-000, Taubaté-SP.

Resumo: A interligação de dois corpos orbitais se caracteriza pela sua união por intermédio de um cabo flexível capaz de suportar os esforços mecânicos resultantes dessa interligação. Quando essa interligação é feita por um cabo metálico, portanto condutor de eletricidade, ela é dita eletrodinâmica. O movimento relativo entre esse condutor e o campo magnético da Terra faz com que se desenvolva uma diferença de potencial elétrico (ddp) entre suas extremidades, induzindo um fluxo de elétrons ao longo do cabo de interligação, sendo que o circuito elétrico se completa através da ionosfera. Essa corrente elétrica induzida altera sobremaneira a dinâmica orbital desse sistema. Assim, o objetivo deste artigo é apresentar as principais características da interligação eletrodinâmica e como se pode tirar vantagens delas, tais como: gravidade artificial, geração de energia elétrica, estabilidade dinâmica de satélites artificiais, manutenção de órbitas de satélites artificiais com baixo consumo de combustível entre outras; e também seus principais problemas, como surtos na tensão induzida, instabilidade na potência fornecida, vibração no cabo da interligação e assim por diante. Esses problemas têm sido limitadores do desenvolvimento dessa tecnologia, mas uma vez equacionados, acredita-se que essa técnica possa ser amplamente empregada em diversos programas espaciais, minorando os seus custos. Como exemplo pode-se citar o caso da estação espacial internacional que necessita de 77 toneladas de propelente para manter a sua órbita por um período de 10 anos, mas se fosse projetada utilizando um sistema de interligação eletrodinâmica, para suprir apenas dez por cento das necessidades de potência, seriam necessárias apenas 17 toneladas de combustível, gerando uma economia de quase um bilhão de dólares. Outro exemplo são as viagens espaciais a planetas mais distantes tais com Júpiter, onde a distância do sol torna a conversão fotovoltaica menos efetiva e onde cada grama de propelente tem que ser transportada centenas de milhões de quilômetros.

Palavras-chave: Interligação eletrodinâmica, gravidade artificial, satélites artificiais

1. INTRODUÇÃO

A interligação de dois corpos orbitais se caracteriza pela união desses corpos por intermédio de um cabo flexível capaz de suportar os esforços mecânicos resultantes dessa interligação. Segundo Lorenzini e Sanmartin (2004), Tal interligação faz com que os dois corpos se comportem como um único sistema. Assim, a força centrífuga¹ e a força gravitacional agem sobre esse sistema em seu centro de massa (que está em algum ponto entre as extremidades do cabo), anulando-se. Contudo, esse equilíbrio não se verifica nas extremidades. No corpo mais externo, a força centrífuga é maior do que a força de atração gravitacional, de modo que a força resultante está no sentido de afastá-lo do planeta. No corpo mais interno a situação é a oposta. Essa diferença entre as forças atuantes em cada um dos corpos das extremidades é chamada de gradiente de gravidade. Essa característica pode ser aplicada para a criação de gravidade artificial. Para exemplificar, satélites de baixa órbita, interligados por um cabo de 50 km pode proporcionar algo em torno de 0,01g, que embora seja um valor ainda muito pequeno, é muito útil para muitas aplicações.

Ainda segundo Lorenzini e Sanmartin (2004), a combinação de forças citadas no parágrafo anterior traciona o cabo que interliga os dois corpos, fazendo com que ele descreva uma trajetória retilínea, desde que não seja feito de material condutor de eletricidade. A posição de equilíbrio do sistema se dá com o cabo alinhado com a direção radial. Toda vez que o sistema sai de equilíbrio, cria-se um torque que o

¹ A força centrífuga é uma força fictícia, ou força de referencial, mas será usada ao longo do texto porque todos os textos consultados fazem referência a ela e não à força centrípeta, que é a força responsável pela existência do movimento circular.

restabelece, fazendo com que o sistema oscile como um pêndulo. Essa característica foi empregada como técnica de estabilização pelo satélite de observação terrestre GEOS-3 em 1975.

Quando a interligação dos corpos é feita por um cabo metálico, portanto, condutor de eletricidade, ela é dita eletrodinâmica, e esse fato altera sobremaneira a dinâmica orbital desse sistema. As características desse condutor são determinadas por diversos fatores, entre os quais se destacam: a condutividade elétrica; a massa específica; a resistência mecânica; o ponto de fusão e o custo.

O movimento relativo entre o cabo condutor e o campo magnético da Terra faz com que se desenvolva uma diferença de potencial elétrico (ddp) entre as extremidades desse cabo. Essa ddp induz um fluxo de elétrons através do cabo, sendo que o circuito elétrico se completa através da ionosfera.

Roy et al (1992), explica que o estabelecimento desse circuito elétrico deve-se ao fato de que nas proximidades da Terra há uma grande concentração de plasma. A densidade de elétrons e íons varia segundo vários fatores, tais como: localização, altitude, estação do ano, atividade solar e níveis de contaminação.

Roy et al (1992), também afirma que um condutor nu, carregado positivamente, pode remover, facilmente, elétrons livres do plasma. Assim, em uma das extremidades do cabo é instalado um dispositivo coletor de elétrons, que nada mais é do que uma grande superfície condutora, não-isolada, positivamente carregada.

Já na outra extremidade do cabo é instalado um emissor de elétrons, ou coletor de íons positivos, que necessita de uma área ainda maior do que a do coletor de elétrons. Assim, segundo Roy et al (1992), a ddp, eletromagneticamente induzida, no cabo faz circular uma corrente elétrica através do espaço circunda o cabo, completando, dessa forma, um circuito elétrico que, à primeira vista, parece um circuito aberto.

De acordo com Roy et al (1992), a intensidade da corrente através do cabo depende de vários fatores. Um desses fatores é a resistência total do circuito, que se divide em três componentes: a resistência efetiva do plasma, a resistência ôhmica do cabo e a resistência da carga alimentada por esse sistema.

Em termos práticos, segundo Lorenzini e Sanmartin (2004), um satélite de órbita baixa, utilizando um cabo de interligação de 20 km pode produzir até 40 kW de potência elétrica.

Esse processo de geração de energia elétrica apresenta um efeito colateral. Todo condutor, imerso em um campo magnético e percorrido por uma corrente elétrica, está sujeito a uma força devido à interação do campo magnético com as cargas elétricas em movimento. No caso das interligações eletrodinâmicas, essa força age sobre o condutor no sentido contrário ao de seu movimento, diminuindo a velocidade do conjunto, provocando, segundo Ahedo e Sanmartin (2002), o seu decaimento para uma órbita mais interna, precipitando a reentrada do sistema na atmosfera terrestre.

Ahedo e Sanmartin (2002), afirmam que esse fenômeno pode ser aproveitado em sentido contrário. Ao invés de se utilizar o cabo para gerar eletricidade pode-se injetar, nesse cabo, uma corrente elétrica contínua, no sentido contrário àquele no qual ela se estabelece quando se trata de geração de energia elétrica, de forma que a força eletrodinâmica agirá sobre o condutor no mesmo sentido de seu movimento, aumentando, dessa forma, a sua velocidade, fazendo com que o sistema assumira uma órbita mais elevada.

Segundo Cosmo e Lorenzini (1997), os principais problemas da interligação eletrodinâmica, são: a instabilidade do movimento pendular do conjunto e a instabilidade da energia elétrica gerada.

Ainda de acordo com Cosmo e Lorenzini (1997), os cabos que fazem a interligação eletrodinâmica apresentam um problema de instabilidade dinâmica. O movimento pendular, característico dessa configuração, aumenta a amplitude da vibração do cabo sob interação eletromagnética. À medida que o tempo de uma missão aumenta, a instabilidade do cabo pode comprometer o desempenho do sistema, na medida em que este pode apresentar vários modos de vibração em função das irregularidades dos campos magnético e gravitacional da Terra.

Cosmo e Lorenzini (1997), propõem que a forma de contornar esse obstáculo é controlar a corrente ao longo da interligação para neutralizar o crescimento das vibrações. Essa abordagem requer a instalação de sensores para o monitoramento da vibração do cabo.

Na perspectiva de Cosmo e Lorenzini (1997), muitos experimentos têm falhado em virtude de surtos de corrente elétrica e de ddp no cabo. Descargas eletrostáticas imprevistas têm sido suficientemente fortes para romper o cabo de interligação ou provocar danos nos dispositivos eletrônicos. Possivelmente, tais efeitos tenham como causa principal a não homogeneidade do campo magnético da Terra.

Apenas para realçar o problema de surtos elétricos, Pearson et al (2003), relata que em fevereiro de 1996 um experimento da série TSS que consistindo de uma interligação de 20 km rompeu-se abruptamente após a instalação de um arco voltaico entre o mecanismo de liberação do cabo e o cabo. O sistema de telemetria indicou que mesmo depois de rompida a ligação, o arco voltaico continuou a existir entre o cabo e o espaço ambiente por aproximadamente um minuto.

Com base nas considerações acima, o objetivo principal deste artigo é apresentar as principais características e problemas desse tipo de experimento.

Esses problemas têm sido limitadores do desenvolvimento dessa tecnologia. Uma vez equacionados acredita-se que essa técnica possa ser amplamente empregada em diversos programas espaciais, viabilizando-os, em muitos casos, técnica e economicamente.

Como exemplo, Lorenzini e Sanmartin (2004), citam o caso da estação espacial internacional que necessitará de 77 toneladas de propelente para manter a sua órbita por um período de 10 anos. Considerando-se que levar uma tonelada de combustível a cerca de 400 km de altitude custa cerca de US\$15,6 milhões, então a despesa total ficará por volta de US\$ 1,2 bilhões. Por outro lado, se fosse projetado um sistema de interligação eletrodinâmica, para suprir apenas dez por cento das necessidades de potência, seriam necessárias apenas 17 toneladas de combustível.

Outro exemplo citado por Lorenzini e Sanmartin (2004), são as viagens espaciais a planetas mais distantes tais com Júpiter, onde a distância do sol torna a conversão fotovoltaica menos efetiva e onde cada grama de propelente tem que ser transportada centenas de milhões de quilômetros.

Outra aplicação importante proposta por Peláez et al (2005), que faz uso das características da interligação eletrodinâmica, é a remoção controlada do lixo espacial. Ao final da vida útil de um satélite (ou estágio final de um foguete), pode ser dado um sinal para que ele desenrole um condutor metálico. Então como, discutido antes, circulará por esse condutor uma corrente elétrica que fará com que uma força aja sobre ele em sentido contrário ao seu movimento provocando uma antecipação de sua reentrada na atmosfera terrestre.

2. FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA NO CABO DE INTERLIGAÇÃO

Um condutor (cabo de interligação) movendo-se em um campo magnético desenvolve entre suas extremidades uma ddp, que pode se calculada da seguinte maneira:

$$FEM = \int (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} \quad (1)$$

FEM - Força eletromotriz induzida no condutor (V);

\vec{B} - Campo magnético (T);

\vec{v} - Velocidade do condutor relativa ao campo magnético (ms^{-1});

$d\vec{l}$ - Comprimento infinitesimal do condutor (m).

Assumindo que a trajetória do cabo seja uma reta (desconsiderando a interação das forças eletrodinâmicas), ou seja, considerando que o cabo esteja orientado ao longo da vertical local, isto é, na direção radial e aproximando o campo magnético da Terra por um dipolo, a ddp induzida por unidade de comprimento pode ser aproximada, segundo Sanmartin, Sanchez, Ahedo (2001) apud Wijnans et al (2004) por:

$$E \approx v B_{eq} \cos(i) \quad (2)$$

E - Força eletromotriz por unidade de comprimento induzida no cabo (V);

B_{eq} - Intensidade do campo magnético equatorial (T);

i - Inclinação da órbita ($^{\circ}$).

Observa-se em Wijnans et al (2004), que a magnitude da força eletromotriz induzida é inversamente proporcional à altitude e ao ângulo de inclinação orbital.

Segundo Carroll, Oldson (1985), a representação do campo magnético por um dipolo deve ser apenas uma primeira aproximação para o campo geomagnético. Ainda segundo Carroll e Oldson (1985), o campo geomagnético enfraquece rapidamente à medida que se move para órbitas mais altas, e se torna seriamente distorcido por causa do vento solar. Contudo, se as distorções no campo geomagnético são menores em órbitas mais baixas onde as perdas ôhmicas são maiores. Assim, interligação eletrodinâmica tem sido usada principalmente em órbitas baixas onde as distorções do campo magnético são menos significativas.

A há indicação na literatura da faixa de altitudes e ângulos orbitais que maximizam a ddp induzida. Nem, tampouco, determina a trajetória real do cabo, que é sempre considerada retilínea, e a sua influência sobre a ddp induzida. Também não há menção da análise de fatores que possam gerar surtos de força eletromotriz induzida.

3. CORRENTE INDUZIDA NO CABO DE INTERLIGAÇÃO

Quando o cabo condutor entra em contato com o plasma a ddp entre as extremidades do cabo induzem uma corrente ao longo deste. Os elétrons são coletados na extremidade superior do cabo (extremidade mais afastada da Terra), e fluem para a outra extremidade. Na extremidade inferior do cabo são coletados íons positivos do plasma neutralizando os elétrons que fluem pelo cabo, assegurando, dessa forma, uma corrente permanente. Segundo Gilchrist et al (2001) apud Wijnans et al (2004), quando o diâmetro do cabo está abaixo de quatro vezes o comprimento de Debye, a magnitude da corrente induzida pode ser calculada usando a teoria de Langmuir do movimento orbital limitado. Segundo Wijnans et al. (2004), a teoria de Langmuir se aplica a cabos cujo diâmetro médio seja 30 mm a altitudes superiores a 650 km. Assim, de acordo com Dijk et al (2003) apud Wijnans et al (2004), a máxima corrente induzida no cabo pode ser determinada da seguinte maneira:

$$I_{máx} = en_e d_t \sqrt{\frac{8eE}{9m_e}} l_e^3 \quad (3)$$

- $I_{máx}$ - Corrente máxima induzida no cabo (A);
 e - Carga do elétron (C);
 n_e - Densidade de elétrons (kgm^{-3});
 d_t - Diâmetro médio do cabo (m);
 m_e - Massa do elétron (kg);
 l_e - Comprimento do cabo que atua como coletor de elétrons (m).

Segundo Dijk et al (2003) apud Wijnans et al (2004), o comprimento do cabo que atua como coletor de elétrons está relacionado com o comprimento físico do cabo L e a relação de massa entre os elétrons e íons.

De acordo com Wijnans et al (2004), há uma variação na corrente induzida em função da altitude e, observa-se também, que a magnitude da corrente induzida é inversamente proporcional à altitude e ao ângulo de inclinação orbital. Essa variação na corrente induzida segundo Spensvis (2000) apud Wijnans et al (2004) é causada pela variação na densidade de distribuição dos elétrons.

Aqui, como no item anterior, a literatura não aponta a faixa de altitudes e ângulos orbitais, em que o rendimento do processo de geração de energia elétrica é maximizado.

4. FORÇA DE LORENTZ

De uma maneira muito simplificada, assumindo que a trajetória do cabo seja retilínea e orientada perpendicularmente às linhas do campo magnético, a magnitude da força que age sobre o cabo condutor pode ser calculada usando:

$$\vec{F}_L = I \vec{l} \times \vec{B} \quad (4)$$

- \vec{F}_L - Força de Lorentz que age sobre o cabo de interligação (N);
 I - Corrente circulante pelo cabo (A);
 \vec{l} - Seu sentido é o da corrente e seu módulo o comprimento do cabo (m).

Essa força estará na mesma direção da velocidade, porém, em sentido contrário ao do movimento do sistema. Ela age na mesma direção e sentido do arrasto aerodinâmico. A Figura (1) ilustra a ação da força de Lorentz sobre o cabo de uma interligação eletrodinâmica, através do qual circula uma corrente elétrica induzida.

Sentido de rotação do sistema interligado

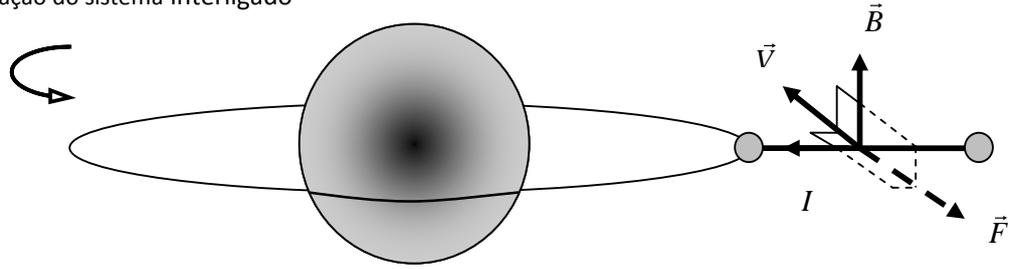


Figura 1. Força de Lorentz sobre um cabo de interligação percorrido por uma corrente elétrica induzida.

Se corrente elétrica, ao invés de ser induzida for injetada em sentido contrário ao anterior, a força de Lorentz passará a agir sobre o condutor no sentido de aumentar a velocidade do sistema, conforme ilustrado na Fig. (2).

Sentido de rotação do sistema interligado

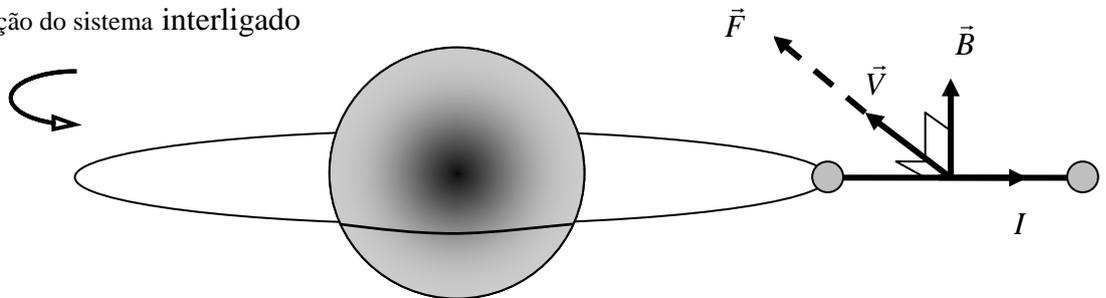


Figura 2. Força de Lorentz sobre um cabo de interligação percorrido por uma corrente elétrica injetada a partir da órbita mais interna.

Aqui, como nos tópicos anteriores, a literatura corrente não aponta a relevância da trajetória real do cabo na determinação da força de Lorentz.

5. TAXA DE DECAIMENTO ORBITAL

Tanto a força de Lorentz quanto o arrasto atmosférico dissipam a energia cinética orbital provocando uma queda de altitude. Segundo Beletsky, Levin (1993) apud Wijnans et al (2004), a força de arrasto para órbitas aproximadamente circulares pode ser calculado como segue:

$$F_{arrasto} = -\frac{1}{2} \rho C_d A_d v^2 \quad (5)$$

ρ - Densidade atmosférica (kgm^{-3});

C_d - Coeficiente de arrasto;

A_d - Área de arrasto (m^2);

v - Velocidade relativa entre a interligação eletrodinâmica e a atmosfera (ms^{-1}).

De acordo com Iess et al (2002) apud Wijnans et al (2004), a potência mecânica dissipada pode ser calculada como:

$$P = (F_L + F_{arrasto})v \quad (6)$$

P - Potência dissipada (W).

Wijnans et al (2004), afirmam que a potência dissipada é proporcional à taxa de mudança da energia orbital:

$$P = -\frac{dE}{dt} \therefore P dt = -dE \quad (7)$$

onde a energia orbital pode ser calculada como:

$$E = -\frac{1}{2} \frac{\mu M}{a} \quad (8)$$

E - Energia orbital (J);
 μ - Constante gravitacional ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$);
 M - Massa total do sistema (kg);
 a - Semi eixo maior da elipse orbital (m).

Wijnans et al (2004), concluem que as órbitas onde a taxa de decaimento é menor para sistemas de interligação eletrodinâmica são aquelas de grande altitude e baixo ângulo de inclinação, onde a força de Lorentz é predominante em relação à força de arrasto.

Para se ratificar essa conclusão é importante conhecer a relevância da trajetória real do cabo no cálculo da força de Lorentz.

6. FORMA GEOMÉTRICA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DO CABO

Segundo Pearson et al (2003), em regiões com baixa densidade de plasma, o comprimento de Debye é de aproximadamente 15 mm e o raio de giração de aproximadamente 30 mm. Condutores cilíndricos ou fitas estreitas devem coletar mais elétrons do que coletores esféricos de mesma superfície. O comprimento do condutor deve ser ajustado de acordo com a densidade do plasma.

Pearson et al (2003), também estabelecem uma comparação entre um condutor na forma de fita e outro com secção transversal circular, na qual se observa que o condutor na forma de fita é mais eficiente.

Pearson et al (2003), ressaltam que os condutores de secção transversal circular operam muito bem no modo de geração de energia elétrica, mas não funcionam tão bem assim, quando estão no modo de aceleração para alcançar órbitas mais altas, porque a captação de elétrons ocorre muito próxima ao emissor. Isso reduz drasticamente o comprimento coletor do cabo, isto é, o comprimento do cabo que desempenha a função de coletor de elétrons.

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma revisão do tema, citando os principais resultados publicados. Em todos os artigos que tratam do assunto a trajetória do cabo que une os dois corpos é aproximada para uma reta. Sabe-se que devido a interação entre as forças gravitacional e magnética esta trajetória não é retilínea. Contudo não há nenhum estudo que determine a influência da trajetória real do cabo na tensão e corrente induzidas sobre este. E claro, não se faz nenhuma menção sobre a força de arrasto considerando-se a trajetória real do cabo.

Relataram-se os principais fatores que influenciam na indução da tensão e corrente sobre os cabos, mas não há nenhuma indicação da órbita ideal que maximize a potência elétrica induzida.

Dados reais observados em missões espaciais mostram que os modelos teóricos utilizados não são capazes de prever com uma margem de erro pequena as grandezas induzidas. Isto se deve em parte aos modelos utilizados. O campo magnético da Terra deveria ser modelado pelos modelos bipolar e multipolar, que cobrem 90% e 99% da magnetosfera terrestre. Já para o cálculo da corrente circulante pelo cabo deveria ser empregado o modelo tridimensional de população de elétrons nos cinturões de radiação AE8.

Há relatos sobre surtos na tensão induzida, mas não há nenhuma formulação capaz de explicar tal fenômeno.

Foi mostrado que em vez de se utilizarem cabos cuja secção transversal seja circular, podem-se utilizar cabos no formato de fita que são mais eficientes no processo de captação de elétrons do plasma.

8. REFERÊNCIAS

- Pearson, J.; Carrol, J.; Levin, E.; Oldson, J., 2003, "Overview of the electrodynamic delivery express (EDDE), Proceedings of 39th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville.
- Peláez, J.; Arriaga, G. S.; Rivo, M. S., 2005, "Orbital debris mitigation with self-balanced electrodynamic tethers", Proceedings of Fourth European Conference on Space Debris.
- Ahedo, E.; Sanmartin, J. R., 2002, "Analysis of bare-tethers systems for deorbiting low-earth-orbit satellites", Journal of Spacecraft and Rockets, v. 39, n. 2, p. 198-205
- Carrol, J. A.; Oldson, J., "Tether for small satellite applications", 1995, Proceedings of Small Satellite Conference.
- Cosmo, M. L.; Lorenzini, E. C., 1997, "Tether in space handbook". Ed. Cambridge: Smithsonian Astrophysical Observatory
- Dijk, A. van; Kruijff, M.; Heide, E. J. van der; LeBreton, J. P., 2003, "A Lightweight Bare Rotating Tether System for Jovian Atmospheric Entry", Proceedings of IAC-03-S.P.05, Bremen.
- Gilchrist B. E.; Bilen S. G.; Gallimore, A. D.; et al., 2002, "Current Collection to Long Conductors with Wide Geometries for Bare Electrodynamic Tether Applications: a Laboratory Update", Proceedings of 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- Iess, J. et al., 2002, "Satellite de-orbiting by means of electrodynamic tether part I: general concepts and requirements." Acta Astronautica. V. 50, n. 7, p. 399-406.
- Lorenzini, E.; Sanmartin, J. R., 2004, "Electrodynamic Tethers in Space", Scientific American. v. 291, n. 2, p. 50-57.
- Roy, R. I. S.; Hastings, D. E.; Ahedo, E. "Systems Analysis of Electrodynamic Tethers", 1992, Journal of Spacecraft and Rockets. v. 29, p. 415-424.
- Sanmartin, J. R.; Sanchez, M. M.; Ahedo, E., 2005, "An Upper Atmospheric Probe for Auroral Effects, 2005, Proceedings of 7th Charging Technology Conference.
- Wijnans, A. S.; Zandbergen, B. T. C.; Kruijff, M.; Heide, E. J., 2004, "Bare Electrodynamic Tape Tether Experiment on Board the Delfi-1 University Satellite", Proceedings of 4th International Spacecraft Propulsion Conference.