

# DESCARGAS ELETROSTÁTICAS NO AMBIENTE DE AVIAÇÃO

**Samuel de Almeida<sup>1</sup>, Edney Grande Chaves Junior<sup>2</sup>,  
José Ricardo Abalde Guede<sup>3</sup>.**

<sup>1,2,3</sup>FEAU/UNIVAP, Estrada do Limoeiro 250, Jacareí-SP  
<sup>1</sup>samuel.almeida@embraer.com.br, <sup>2</sup>edneygrande@hotmail.com, <sup>3</sup>abalde@univap.br

**Resumo**— As cargas eletrostáticas estão presentes em todas as atividades e são uma preocupação constante no ambiente de aviação, uma vez que envolve equipamentos de alto valor agregado e individual. Sendo que os aviões são feitos de metal, que é um bom condutor de descargas eletrostáticas. Porém, a maior fonte de preocupação é com a segurança dos usuários do transporte aéreo e com os funcionários que trabalham nesse meio. O processo de metalização é muito usado para proteção das aeronaves. A NBR 9539 contempla algumas informações sobre os cuidados com esse evento. Nesse artigo, procuramos explorar o que são as cargas eletrostáticas, suas causas, efeitos e soluções.

**Palavras-chave:** Eletrostática.

**Área do Conhecimento:** Engenharia Elétrica, Cargas Eletrostáticas.

## Introdução

O fenômeno das descargas eletrostáticas, ESD (electrostatic discharge do inglês), é literalmente, de vital importância no âmbito de aviação, principalmente no que diz respeito à manutenção de equipamentos eletrônicos instalados em aeronaves, bem como durante as verificações feitas nos seus equipamentos nos chamados checks pré-vôo, durante o processo de abastecimento ou, o que é mais importante, durante os vôos executados, seja na aviação comercial ou na aviação militar. Devido a isso, existe a constante preocupação com a melhoria contínua no controle e prevenção das descargas eletrostáticas.

Entre alguns dos problemas que podem ser caracterizados pelas descargas eletrostáticas, seria a sua descarga de uma forma descontrolada, o que poderia resultar em centelhas ou explosões ao ser transferido ao ambiente externo ocasionando a perda de uma ou mais das chamadas superfícies primárias ou essenciais para um vôo controlado ou ainda, na interrupção das comunicações da aeronave e na inoperância dos seus instrumentos de controle de vôo.

Os meios para se evitar esses inconvenientes são, entre outros, os processos de metalização, aterramento de componentes e utilização de descarregadores estáticos nas superfícies da aeronave. Há também tapetes condutivos, que tem a borracha vulcanizada. Ionizadores também são usados para neutralizar cargas em materiais isolantes, estes geram nuvens de íons negativos e positivos. Os íons positivos neutralizam cargas negativas e íons negativos neutralizam cargas positivas (MACGORMAN, DONALD, 1998).

O aumento de carga estática é causado por um dos seguintes processos: por fricção entre

duas superfícies, chamado de triboeletrização; ou por proximidade a um campo eletrostático, denominada carga de indução.

## Metodologia

Foram realizadas várias pesquisas sobre o tema de descargas eletrostáticas através de outros artigos, sites e consultas a empresas especializadas em metalização, cujas referências estão no final deste artigo. Pessoas que trabalham neste ramo de aviação nos ajudaram também.

## A descarga eletrostática

O aparecimento de descargas eletrostáticas é resultante do desequilíbrio de cargas geradas pelo atrito entre objetos de determinados tipos de materiais, especialmente aqueles que apresentam uma grande resistência elétrica superficial.

O fenômeno pelo qual um determinado material perde ou ganha cargas gera tensões eletrostáticas em relação ao terra ou a outros objetos. A tendência de um material com desequilíbrio de cargas é voltar ao equilíbrio eletrostático. Durante o retorno ao equilíbrio, o fluxo de cargas gera uma descarga elétrica com um tempo de duração muito pequeno (da ordem de dezenas de nano-segundos). Este fenômeno pode ser visualizado na forma de um pequeno arco elétrico; no entanto, na maioria das vezes a descarga ocorre sem que sua presença seja sentida.

Quando as substâncias se tornam carregadas por triboeletrização, os elétrons migram da superfície de um material para superfície de outro. Ao separarem-se as duas superfícies, uma perde elétrons e torna-se positivamente carregada e a outra ganha elétrons e torna-se carregada

negativamente. À medida em que a pressão ou velocidade do contato e separação, a denominada fricção acontece, aumenta a quantidade de carga estática e conseqüentemente o nível de tensão. Materiais em movimentos rápidos tais como partículas de plásticos em uma esteira pneumática ou a fuselagem duma aeronave em contato com o ar podem rapidamente produzir cargas com 20.000 a 250.000 Volt (Veja Figura 1 e 2).



Figura 1- Indução de eletricidade estática por fricção ou atrito.



Figura 2- Indução de eletricidade estática por calor.

Exemplo de carga triboelétrica, ou transferência de elétrons, ocorre quando dois materiais estão em contato e em seguida são separados. Um dos materiais adquire um excesso de íons negativos e outro obtém um excesso de íons positivos (Veja Figura 3).



Figura 3- Indução de eletricidade estática por separação brusca dos materiais ou carga triboelétrica.

Existe um experimento que nos ajuda a ter uma idéia de qual material terá uma carga positiva e qual terá uma carga negativa após entrarem em contato ou serem atritados. Este experimento tem uma utilidade prática e serve como uma indicação. Nem sempre as relações abaixo são válidas, pois existem diferentes tipos de PVC, lã e vidro (HERRERA, JUAN CARLOS, 2001).

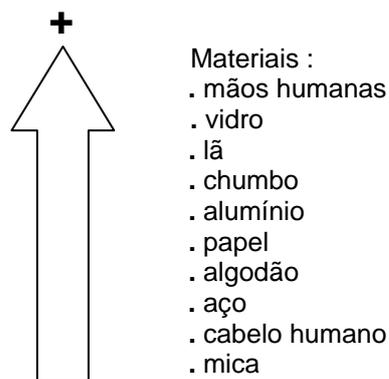


Figura 4- materiais com carga positiva

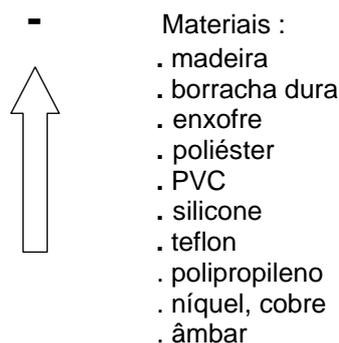


Figura 5- materiais com carga negativa

Todo corpo carregado, ou seja, com um desbalanceamento de elétrons, está dotado de energia eletrostática. Energia eletrostática é medida em Coulombs. Cada Coulomb tem  $6,25 \times 10^{18}$  elétrons.

A carga eletrostática presente em um corpo produz efeitos atrativos e repulsivos no ambiente, o que chamamos de Campo Eletrostático. Este campo provoca a movimentação de cargas em condutores, sendo ele o gerador de carga por indução. O campo Eletrostático pode ser medido para indicar se temos ou não a presença de uma carga eletrostática. Quando associamos o campo presente a uma distância fixa, podemos medir a diferença de potencial. Para fazermos essa medição usamos um Sensor de Estática a uma distância fixa e padronizada de uma polegada.

Todos os materiais geram eletricidade estática por contato, e os condutores podem gerar por indução. Os condutores, tem uma grande

facilidade de perder esta carga gerada (dissipar esta carga), pois conduzem eletricidade facilmente. Já os materiais isolantes tem uma grande dificuldade de dissipar esta carga, pois os elétrons não fluem livremente no material.

A eletricidade estática é um fenômeno físico que não temos a capacidade de visualizá-la, mas sim de senti-la, porque ela causa perda de produtividade em todos os setores de uma empresa, de tempo, de matéria - prima, podendo ainda criar incêndios, choque em operadores, pessoal de manutenção, passageiros, causar graves danos aos componentes eletrônicos sensíveis, requerendo altos custos de manutenção, acarretando conseqüentemente perda de receitas, com atrasos dos vôos, manutenções fora da programação e nos casos mais críticos, a perda da própria aeronave e de vidas humanas.

A descarga eletrostática é um fenômeno natural e consiste na transferência de cargas entre dois corpos em potenciais diferentes. Uma descarga eletrostática, além de poder causar choques elétricos, pode produzir interferências eletromagnéticas, degradar o desempenho de um equipamento ou até mesmo causar a inoperância de alguns instrumentos e equipamentos que são vitais para a manutenção e para a operação da aeronave. Como a aeronave é um excelente meio de absorção de cargas estáticas devido a sua estrutura ser em quase sua totalidade metálica, é de vital importância garantir uma forma segura e controlada para o escoamento dessa carga.

Em vôo, o atrito da aeronave com o ar faz com que a eletricidade estática seja coletada em sua estrutura. Chuvas e campos elétricos em formações de nuvens também geram o acúmulo da eletricidade estática na estrutura da aeronave.

### Os efeitos das descargas eletrostáticas

No momento em que um indivíduo carregado toca em algum ponto aterrado, a energia potencial acumulada em seu corpo é descarregada. A descarga pode ocorrer pelo contato direto de alguma parte do corpo humano com a parte metálica da aeronave. Em função da energia acumulada no corpo, a descarga pode ocorrer com ou sem a presença de arco elétrico.

Uma ESD envolve correntes de alguns poucos ampères e tensões de até 200.000 V. As descargas não são prejudiciais ao ser humano porque a energia dissipada é muito pequena. Na Figura 6 é apresentada a forma de onda de corrente típica de uma descarga eletrostática ocasionada pelo toque de um ser humano eletricamente carregado em uma superfície aterrada.

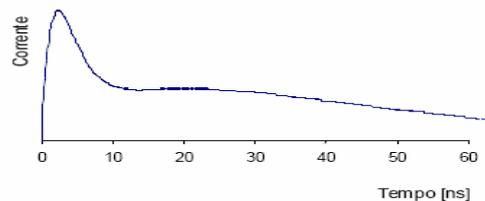


Figura 6- Forma de onda típica de uma ESD

No momento da ocorrência de uma descarga eletrostática, o corpo humano pode ser representado como um capacitor carregado com uma determinada energia. A Figura 7 apresenta o modelo elétrico básico do corpo humano.



Figura 7- Modelo elétrico básico do corpo humano

### Geração de cargas elétricas dentro das nuvens

O exato mecanismo pelo qual cargas elétricas se desenvolvem em nuvens ainda é assunto para discussão, mas há poucas dúvidas de que a energia que produz o relâmpago é proveniente do movimento de massas de ar aquecida que se deslocam para o topo das nuvens desenvolvidas. Enquanto este ar está subindo, ele vai se tornando mais frio e no ponto de orvalho, o excesso de vapor de água se condensa em gota, formando uma nuvem. Quando o ar sobe até um nível suficiente para a temperatura da gota atingir  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o vapor de água se transformará em gelo. Em baixas elevações dentro dessa nuvem haverá muitas gotas de água super resfriadas mas ainda não se transformaram em gelo, apesar da temperatura ser mais baixa do que o ponto de congelamento. Nestas regiões super resfriadas, cristais de gelo e granizo se formarão.

Alguns dos cristais de gelo se aglutinam em granizos. Estes granizos cairão através da nuvem acumulando gotas de água super resfriada. As gotas se congelarão sobre este granizo. Pequenos estilhaços pontiagudos de gelo se formarão. Aparentemente estas pontas carregam

cargas positivas. As correntes de vento vertical na nuvem transportam estas partículas de gelo pontiagudas para as partes superiores da nuvem, enquanto os granizos, sendo mais pesados, caem até alcançar uma região de ar mais quente. Algumas partes deste gelo derretem e continuam em direção para a terra. Assim, a parte superior da nuvem terá uma carga predominantemente positiva enquanto que a parte baixa da mesma terá uma carga predominantemente negativa.

Outras teorias têm sido propostas para se explicar a eletrificação de uma nuvem. Todas elas são baseadas em evidências experimentalmente observadas. Evidências de que a carga no topo da nuvem é positiva, enquanto que a base da nuvem possui carga negativa. A maioria dos trabalhos recentes sobre a edificação de cargas nas nuvens foi baseada em evidências indiretas por meio das mudanças do campo elétrico no nível do solo durante as descargas elétricas. Tais medições podem dar resultados incertos, particularmente se as mudanças no campo elétrico são observadas em apenas um lugar.

Medições diretas de cargas nas nuvens por meio de aeronaves ou balões instrumentados são mais confiáveis. Todas as observações indicam que o topo das nuvens possuem uma carga positiva, que as regiões do meio da nuvem possuem uma carga negativa e que há também regiões de cargas positivas próximo a base das nuvens. Algumas destas observações sugerem que a carga negativa é distribuída em uma camada da ordem de 1000 ft de espessura, sendo mais ou menos distribuída através das porções baixas da nuvem.

As correntes de ar e as cargas elétricas tendem a ser armazenadas em células localizadas fazendo com que a nuvem como um todo seja composta de várias destas células.

A temperatura do principal centro de carga negativa estará aproximadamente  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a região de carga positiva abaixo dela, estará aproximadamente a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O principal centro de carga positiva no topo da nuvem estará aproximadamente  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  mais frio do que a parte negativa. O tempo de vida de uma célula típica é de aproximadamente 30 minutos. No estágio maduro, a célula como um todo terá um potencial, com respeito a terra de  $10^8$  para  $10^9\text{ V}$ . A célula na sua totalidade terá uma carga negativa.

### **Campos Elétricos produzidos pelas cargas**

Quando a nuvem passa sobre um ponto no solo, uma carga elétrica é atraída no solo sob a nuvem. A média do campo elétrico na superfície da terra mudará totalmente seu valor de aproximadamente 300 Volt por metro (V/m) positivo para centenas de Volt por metro maiores. Geralmente quando uma nuvem está sobre um

ponto no solo, o campo elétrico nessa região será negativo, mas quando uma região positiva é localizada, o campo nesta área será positivo. O gradiente de potencial estará concentrado em pontos de objetos pontiagudos no solo, como árvores, antenas, etc, podendo exceder a rigidez dielétrica do ar, a qual tem um valor nominal de 30 kV/cm ao nível do mar, sendo menor em altitudes maiores.

Quando a rigidez dielétrica do ar é excedida, surge o efeito corona nestes pontos. A magnitude da corrente de um simples ponto de descarga, pode ser da ordem de 1 ou 2 micro ampères ( $\mu\text{A}$ ), podendo passar para 400  $\mu\text{A}$ . Este campo de efeito corona induzido é geralmente menos intenso do que a corona observada em condutores energizados. O efeito corona não é necessariamente um indicador de que um relâmpago é iminente, mas seu brilho indica uma grande concentração eletrônica de onde provavelmente um relâmpago surgirá.

O efeito corona em objetos no solo não se desenvolvem em um completo arco elétrico ou em flashes de relâmpagos para cima porque o campo elétrico é muito localizado e não se estende em uma distância suficiente para o fluxo se propagar. Uma importante razão para este efeito é que as cargas injetadas dentro do ar pelo efeito corona se acumulam e reduzem a intensidade do campo elétrico na superfície do solo. Por causa desta distribuição de carga espacial, o rompimento da rigidez dielétrica do ar "parece" uma distribuição superficial elétrica mais uniforme do que pareceria para um pequeno observador no nível do solo.

### **As condições ambientais para a formação de relâmpagos**

O relâmpago se origina de cargas elétricas acumuladas no ar, freqüentemente nas nuvens. As nuvens mais comuns para produção de relâmpagos são as nuvens de tempestades de cúmulo-nimbus. Todavia, relâmpagos também podem ocorrer durante tempestades de areia, de neves, em nuvens sobre vulcões em erupção e até mesmo em céu claro e limpo, apesar deste último ser um fenômeno muito raro. Relâmpagos que se originam em tempestades de areia e em erupções vulcânicas não oferecem risco, mas relâmpagos associados com tempestades, mas porque ele é capaz de ocorrer quanto menos se espera.

Reportes de pilotos em aeronaves freqüentemente relatam que eles foram atingidos "fora do azul", isto é, sob condições onde o evento de um relâmpago não seria esperado. As circunstâncias de tais relatos não são bem conhecidas, mas elas sugerem que ainda há mais a aprender sobre o mecanismo dos relâmpagos.

Os tipos mais comuns de relâmpagos são aqueles envolvendo a nuvem e o solo, chamado de relâmpago nuvem– solo e os relâmpagos entre centros carregados eletricamente dentro das próprias nuvens, chamados relâmpagos intra-nuvens. Verdadeiros relâmpagos nuvem para nuvem entre centros isolados é possível, porém, o que parece ser relâmpago nuvem para nuvem é freqüentemente uma manifestação espetacular de descargas dentro da própria nuvem.

### Impactos devido às descargas eletrostáticas nos aviões

Uma das preocupações quando ocorre uma descarga eletrostática são com os equipamentos e componentes eletrônicos, já que, essas falhas podem custar vidas.

Os principais efeitos de uma descarga eletrostática sobre um equipamento eletrônico podem ser resumidos da seguinte forma: danos definitivos; degradação de desempenho; interferência eletromagnética.

Uma descarga eletrostática normalmente afeta um equipamento durante sua instalação ou transporte, ou durante sua manutenção, ao ocorrer contato direto com os seus circuitos eletrônicos.

A energia proveniente de uma descarga eletrostática pode danificar severamente diversos tipos de equipamentos eletrônicos, relés eletrônicos e equipamentos micro-processados em geral. O dano ocorre pela passagem da corrente da descarga (ou de uma parte desta) por componentes sensíveis de um equipamento - em geral, circuitos integrados e transistores. No interior destes componentes existem condutores elétricos com espessura muito menor à de um fio de cabelo. Estes condutores podem ser rompidos facilmente pela passagem da corrente da descarga, através da dissipação da energia (efeito Joule). Os pequenos condutores não resistem ao aquecimento excessivo e terminam rompendo-se, causando um dano definitivo no equipamento afetado pela descarga.

Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas duas imagens de trilhas internas a um componente eletrônico atingido por uma descarga eletrostática. Em ambas as imagens, pode-se notar claramente o aparecimento de pontos degradados pelo efeito Joule.

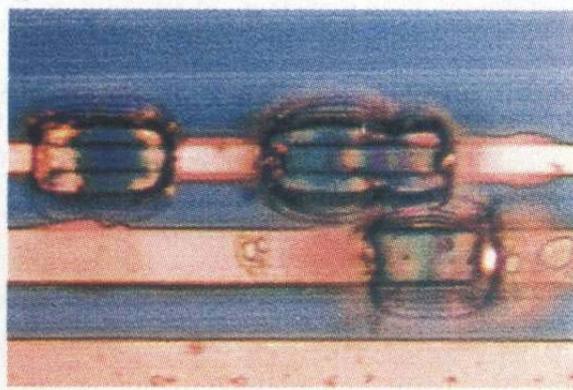


Figura 8- Dano em componente eletrônico

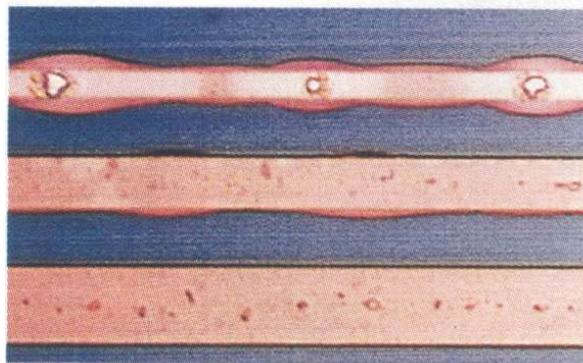


Figura 9- Dano em componente eletrônico

Uma descarga eletrostática pode ser caracterizada como um sinal elétrico de freqüência elevada, o que a torna uma fonte bastante severa de interferência eletromagnética. A elevada freqüência é o resultado das grandes variações de corrente e de tensão da descarga em relação ao tempo ( $di/dt$  e  $dv/dt$ ). O tempo de subida da forma de onda da corrente de uma ESD é de aproximadamente 1 ns.

Alguns equipamentos são severamente afetados em seu funcionamento quando submetidos a descargas eletrostáticas.

A energia de uma descarga eletrostática pode ser transferida para um equipamento de duas formas básicas:

Descarga direta: a corrente da descarga passa diretamente através do circuito vítima. Neste caso, apesar de não acontecer a queima do equipamento ou de seus componentes, pode haver a ocorrência de interferência eletromagnética. A Figura 10, apresentada a seguir, mostra a ocorrência de uma descarga eletrostática direta sobre um semiconductor.



Figura 10- ESD direta em componente

Descarga indireta: uma parte da energia da descarga é transferida para o equipamento vítima através de indução ou acoplamento capacitivo. A Figura 11 apresenta uma descarga eletrostática indireta. No caso apresentado nesta imagem, a descarga sobre um capacitor terá pouco efeito sobre o componente, mas a indução ou o acoplamento capacitivo irão transferir uma parte da energia da descarga para o circuito integrado situado nas proximidades. Como este circuito opera com pequenos sinais elétricos, possivelmente ocorrerá interferência eletromagnética.



Figura 11- ESD indireta em componente

### **Metalização**

É o processo mais utilizado pelas empresas de aviação para proteção das aeronaves. Em linhas gerais, metalização é um processo de aspersão térmica que utiliza como fonte de calor uma chama oxiacetilênica e um arame como metal de deposição, este arame ao passar através da chama é fundido e atomizado por um jato de ar comprimido o qual joga as partículas metálicas sobre a superfície previamente preparada, a peça, sem que a temperatura da mesma seja significativamente elevada. A composição química

do arame a ser utilizado determina as propriedades do material depositado, exemplo destas propriedades são materiais com resistência a abrasão, resistência ao desgaste, resistência ao calor, condutividade elétrica, etc.

Neste processo de metalização, pode-se destacar entre outros, o método de thermospray que utiliza como fonte de calor uma chama oxiacetilênica, porém o material a ser aspergido é em forma de pó metálico que por gravidade é lançado no gás de transporte: "oxigênio, hidrogênio ou ar comprimido, que sob pressão o pó é forçado a passar através da chama por um injetor que sai em forma de jato em alta velocidade e é instantaneamente fundido e jogado de encontro ao substrato.

O termo "Plasma Flame Spray" define um outro método que envolve a utilização de metais e outros materiais em forma de pó como matéria-prima para a formação da cobertura. A diferença com relação ao thermospray reside no fato do pó ser fundido em uma chama de plasma. O plasma é produzido pela ionização de um gás ou de uma mistura de gases quando estes passam através de um arco elétrico. Este gás ionizado faz com que se obtenha uma chama de alto poder energético, até 16000°C, e uma velocidade supersônica devido a grande expansão sofrida.

Este último método permite que em forma mais econômica sejam obtidas altas temperaturas, facilitando assim a deposição de materiais com alto ponto de fusão. Tipos de reparos feitos com Flame Spray são: recomposição dimensional em eixos de turbinas, impellers, carcaças de caixa de engrenagens, recuperação de antenas, aplicação de camadas cerâmicas para barreiras térmicas em peças de motores, etc. O processo onde são fundidos materiais, na forma de arame ou pós, e aspergidos sobre as peças são chamados genericamente de Flame Spray.

### **Resultados**

Nesse artigo procuramos demonstrar o que são Descargas eletrostáticas, como são formadas, suas causas, efeitos e soluções. Um material muito bom para aqueles que querem conhecer mais sobre o assunto e um dia venha trabalhar nesta área.

### **Discussão**

Este artigo foi preparado durante seis meses, onde foram feitas pesquisas e estudos relacionados ao tema de descargas eletrostáticas. É um assunto muito importante para todos os engenheiros, já que é necessário ter conhecimentos dos danos que podem ocorrer.

Para o engenheiro elétrico é um assunto de vital importância, devido envolver eletricidade.

## **Conclusão**

Este artigo forneceu uma visão geral sobre descargas eletrostáticas no ambiente de aviação. Foram apresentadas algumas maneiras de prevenção nas aeronaves. Foi mostrado com são geradas as cargas elétricas nas nuvens, as condições ambientais para formação de relâmpagos e também os efeitos das descargas elétricas.

As descargas eletrostáticas podem causar muitos danos nas aeronaves como a degradação dos componentes eletrônicos, choques elétricos nas pessoas, etc. No entanto existem várias formas de prevenção como o processo de metalização, mais usual em aeronaves.

## **Referências**

- Herrera, J. Revista Qualificação em controle de ESD , 2001.
- IPT: Disponível em <http://www.ipt.br> Acesso em 01/02/2007.
- Macgorman, D. The Electrical Nature of Storms. Oxford University Press, 1998
- Universidade Federal de São Carlos, Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br> Acesso em 12/06/2007.
- Christopoulos, C. Principles and techniques of electromagnetic compatibility, CRC Press, 1995.
- Franke, H. In Dicionario de física, Barcelona, 1967