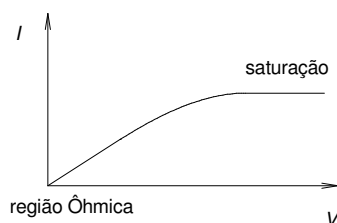


5.3 Condução em gases

(Geralmente esta seção não pode ser apresentada num curso de 4 horas semanais. O conteúdo tem relevância para alunos de engenharia de meio ambiente, geociências, engenharia elétrica, física e química)

O ar é um péssimo condutor, o que possibilita nossas experiências de eletrostática. Mas sua condutividade não é exatamente zero. Isto fica evidente pelo fato de que os corpos que carregamos nas experiências de eletrostática perdem sua carga com o passar do tempo, mesmo apoiando-os com suportes de teflon com superfícies bem limpas. Um gás que contém somente moléculas neutras teria uma condutividade nula. Mas no ar existe uma pequena concentração de íons. A maior parte destes íons é criada por raios cósmicos, que são partículas com alta energia cinética vindo de fora da Terra. 90% destas partículas são prótons com energias tipicamente na ordem de 10^9 elétron-volt até 10^{11} elétron-volt. Algumas poucas partículas têm até energias na ordem de 10^{21} elétron-volt. Ao atravessar a atmosfera, estas partículas arrancam elétrons das moléculas de O_2 e N_2 do ar deixando estas moléculas com carga positiva. Os elétrons se agregam a moléculas neutras formando íons negativos. Outra fonte de ionização é a radioatividade natural, especialmente do gás radônio. Ocasionalmente estes íons de cargas opostas se encontram, e ocorre uma neutralização, chamada de *recombinação*. Íons também podem ser perdidos para a condução ao se agregar a partículas grandes (aerossóis)¹. A taxa de recombinação cresce com a concentração dos íons porque a probabilidade de um encontro de íons de sinais opostos é proporcional ao produto das concentrações destas espécies. Num equilíbrio dinâmico se estabelece uma pequena concentração de íons tal que a taxa de recombinação iguala a taxa de criação de novos íons. Os íons sofrem atrito viscoso no gás e podemos aplicar essencialmente a mesma teoria que usamos para explicar a lei de Ohm em eletrólitos. Devido ao fato de haver concentrações de íons muito baixas (na ordem de 10^8 íons/ m^3) resulta uma condutividade baixa como foi mencionado na tabela 5.2.1.

Enquanto não ocorrem processos que alteram a concentração dos íons, os gases obedecem à lei de Ohm. Mas, com campos elétricos intensos, há efeitos que alteram a concentração dos íons e isto resulta numa violação da lei de Ohm. Quando criamos uma corrente num gás, geralmente criamos o campo elétrico necessário com a ajuda de dois eletrodos ligados a uma fonte. Estes eletrodos retiram íons ao receber os íons de carga oposta do sinal da carga do eletrodo. Então resulta uma diminuição da condutividade que é somente desprezível enquanto a corrente total dividida pela carga elementar for



mucho menor que a taxa de criação de íons novos por raios cósmicos. Quando aumentamos o campo elétrico suficientemente, a corrente satura num valor limite como está indicado na figura 5.3.1. Nesta situação praticamente todos os íons gerados são “aspirados” pelos eletrodos e a perda por recombinação se tornou desprezível. Nesta situação não vale a lei de Ohm.

Fig. 5.3.1 $I(V)$ para um condutor gasoso para campos moderados.

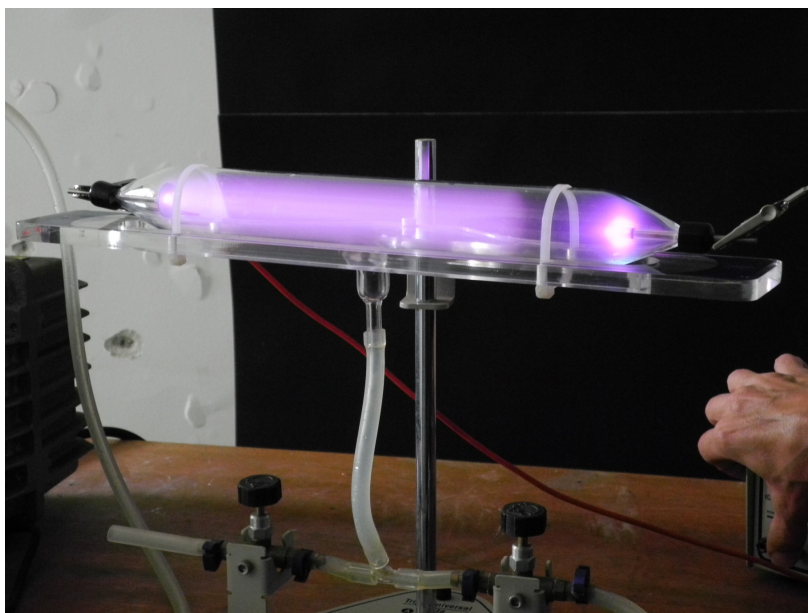
¹ Tapio J. Tuomi: “Ten Year Summary 1977-1986 of Atmospheric Electricity Measured at Helsinki-Vantaa Airport Finland” Geophysica (1989) 25 1&2 p. 1-20.

Medidas de condutividade da atmosfera podem ser usadas para avaliar a poluição do ar:

Nagaraja Kamsali , B.S.N. Prasad , Jayati Datta: “Atmospheric electrical conductivity measurements and modeling for application to air pollution studies” Advances in Space Research 44 (2009) 1067–1078.

Este comportamento de saturação permanece enquanto o campo elétrico se mantém numa faixa de valores moderados. Se aumentarmos o campo consideravelmente, aparecem novos fenômenos que aumentam a concentração dos íons. Os íons positivos podem ser acelerados pelo campo atingindo velocidades tão altas que ao impactar no eletrodo negativo arrancam elétrons do metal. Estes elétrons por sua vez são acelerados e ao colidirem com uma molécula neutra arrancam elétrons da molécula alvo. Estes elétrons podem por sua vez ionizar outras moléculas com impactos. Desta forma o campo elétrico contribui para a criação de novos portadores de carga e a condutividade aumenta drasticamente. Esta criação de cargas novas por impacto pode ocorrer somente se as partículas envolvidas atingirem uma velocidade mínima necessária para arrancar elétrons entre colisões consecutivas. O caminho livre médio das partículas envolvidas determina o valor do campo a partir do qual ocorre esta ionização por impacto. Quanto mais baixa a pressão do gás, maior fica o caminho livre e menor o campo necessário para entrar no regime de alta condutividade. Este regime está sendo usado nas lâmpadas fluorescentes. Nelas há gás de baixa pressão para poder estabelecer uma corrente no gás com voltagens moderadas.

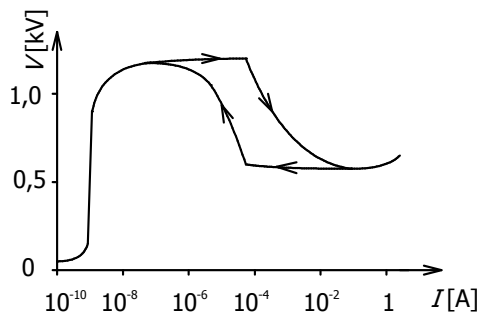
A figura 5.3.2 mostra uma descarga neste regime no ar rarefeito com a ajuda de uma bomba de vácuo. A bomba tem o nome de “bomba de vácuo”, mas o que ela cria está longe de ser um espaço vazio. No recipiente mostrado na figura 5.3.2 temos ainda aproximadamente 0,5% da quantidade de moléculas que teríamos à pressão atmosférica. O impacto das partículas carregadas nas moléculas causa não apenas ionização, mas muitas moléculas também são excitadas energeticamente e depois elas emitem esta



energia em forma de luz. Esta luz está visível na imagem. Nas lâmpadas fluorescentes a maior parte desta luz fica na faixa espectral do ultravioleta e precisa ser convertida em luz visível pelo processo de fluorescência. Isto ocorre no pó branco que tem na face interior das paredes destas lâmpadas.

Fig. 5.3.2 Condução elétrica num volume de ar rarefeito. Uma tensão de poucos kV foi aplicada e a pressão do ar no recipiente foi diminuída com uma bomba mecânica.

A curva que descreve a relação entre voltagem e corrente neste regime de ionização por impacto tem características muito especiais que desviam da lei de Ohm drasticamente.



Inclusive esta relação deixa de ser uma função e começa a depender da história de uso do condutor, como mostra a figura 5.3.3 esquematicamente.

Fig. 5.3.3 Relação entre voltagem e corrente típica de uma descarga num gás rarefeito. As setas indicam a ida e volta numa experiência que aumenta e diminui os valores da corrente. Repare que a escala da corrente é logarítmica!

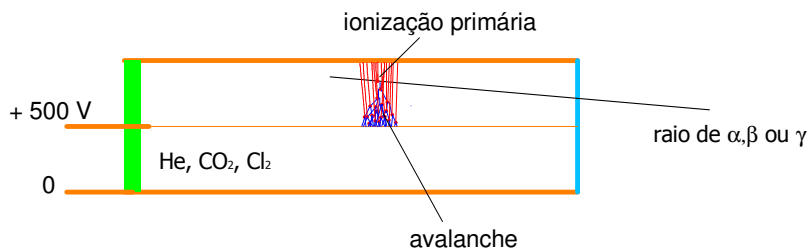
Tivemos um desvio da lei de Ohm também já no caso da limitação da corrente. Por esta razão cabem aqui algumas palavras sobre definições de resistência de condutores não Ôhmicos. Define-se como *resistência de um corpo condutor na voltagem V* o quociente V/I .

$$R(V) \stackrel{\text{def.}}{=} \frac{V}{I} \quad (5.3.1)$$

Um corpo condutor obedece à lei de Ohm se e somente se sua resistência na voltagem V independe da voltagem. Para condutores não Ôhmicos a noção de resistência tem pouca utilidade e é bastante questionável se esta definição for justificável. Outra noção tem muito mais aplicabilidade: define-se a *resistência diferencial de um corpo condutor na voltagem V* como o valor da derivada da curva $V(I)$:

$$R_{dif}(V) \stackrel{\text{def.}}{=} \frac{dV}{dI} \quad (5.3.2)$$

Num condutor Ôhmico a resistência diferencial coincide com a resistência. No caso dos gases no regime de ionização por impacto a resistência diferencial se torna negativa para certos valores da voltagem. Isto se deve ao fato de que uma corrente grande produz mais íons adicionais do que uma corrente pequena. Então a corrente grande abaixa a resistência e menos voltagem é necessária para manter a corrente. Condutores com resistência diferencial negativa têm comportamentos estranhos. Sem elementos adicionais que limitem a corrente seria impossível estabelecer uma corrente estacionária neste tipo de condutor. A corrente ia simplesmente crescer até a destruição do condutor.



Numa seção futura voltaremos a este ponto vindo uma aplicação da lei de indução que pode ser usada para limitar correntes.

Fig. 5.3.4 Tubo de Geiger-Müller

A criação de novos portadores de carga por impacto pode ter características de uma avalanche, conhecida como avalanche de Townsend². Estas avalanches podem ser

² Sir John Sealy Edward Townsend 07/06/1868 – 16/02 /1957.

usadas para detectar partículas ionizantes (radiação alfa³, beta⁴ ou gama⁵). Isto é o princípio de funcionamento do contador de Geiger⁶-Müller⁷. O detector consiste em um cilindro (geralmente 1cm – 2 cm de diâmetro e 5cm a 10 cm de comprimento) com parede condutora. No centro do cilindro há um arame extremamente fino que é mantido numa voltagem de aproximadamente +500V em relação à parede do cilindro. O interior do cilindro contém uma mistura de gases (por exemplo um gás nobre, dióxido de carbono e um halógeno). Se um raio alfa, beta ou gama entrar neste cilindro, através de uma janela de mica, este ioniza uma ou várias moléculas do gás. A partir destes íons primários se forma uma avalanche que resulta num pulso curto de corrente. Este pulso é registrado num circuito eletrônico. Estes instrumentos são usados em ambientes com substâncias radioativas para supervisionar se a quantidade de radiação não ultrapassa níveis prejudiciais à saúde. Também em laboratórios de pesquisa de física nuclear e de partículas elementares, estes contadores e detectores parecidos são amplamente usados. A figura 5.3.4 mostra um tubo de Geiger-Müller esquematicamente.

Para gerar descargas num gás convém abaixar a pressão. Mas, se quisermos o contrário, evitar descargas num gás? Neste caso convém aumentar a pressão do gás. De fato em certos dispositivos envolvendo alta tensão, gás com elevada pressão é usado para evitar faíscas. Há ainda outra maneira de evitar descargas num gás. Pode-se ir na direção oposta e abaixar a pressão a tal ponto que o caminho livre médio das partículas seja ordens de grandeza maior que o tamanho do recipiente. Neste caso o mecanismo de criação de portadores de carga não funciona mais, pois as partículas praticamente não colidem. Gás nesta condição é chamado de *alto vácuo*. Na verdade mesmo alto vácuo está longe de ser um vazio. Nele há ainda 10^{13} até 10^{19} partículas por metro cúbico. Alto vácuo é um ótimo isolante. Mesmo assim podemos criar correntes no alto vácuo usando cargas tiradas dos eletrodos. Isto pode ser feito com emissão térmica, como mencionamos na discussão do tubo de Braun, com emissão por campo intenso ou com a ajuda de luz incidindo no eletrodo negativo.

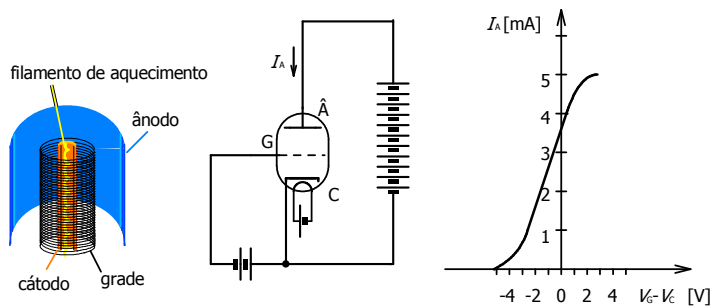


Fig. 5.3.5 Válvula (Tríduo). Representação esquemática dos componentes, símbolo num esquema de circuito e curva que descreve a corrente no ânodo em função da voltagem da grade.

Antes da invenção do transistor, a condução em alto vácuo foi usada em dispositivos que podem amplificar sinais elétricos. O princípio básico destes dispositivos é o seguinte. Num tubo de vidro um eletrodo aquecido eletricamente emite elétrons para dentro de um espaço de alto vácuo. Outro eletrodo positivo (ânodo) em relação ao primeiro acelera os elétrons e se estabelece uma corrente elétrica. Mas, no meio do caminho entre eletrodo negativo (cátodo) e positivo (ânodo), se coloca uma grade de fios finos de metal que pode ser carregada negativamente para criar uma barreira de potencial que impede a passagem dos elétrons. Desta forma o fluxo de carga pode ser controlado com o

³ Radiação α consiste de núcleos de hélio emitidos por núcleos radioativos.

⁴ Radiação β consiste de elétrons muito energéticos emitidos por núcleos radioativos.

⁵ Radiação γ consiste de quanta muito energéticos de ondas eletromagnéticas.

⁶ Johannes Wilhelm Geiger (pronuncia como em Português “gaiguer”) (30/09/1882 – 24/09/1945).

⁷ Walther Müller (06 /09/1905 – 04/12/1979).

potencial desta grade. Hoje em quase toda eletrônica estas válvulas foram substituídas por transistores. Mas em algumas aplicações eles continuam, por exemplo, em estações de rádio e televisão de alta potência. A figura 5.3.5 mostra o esquema, o símbolo usado em esquemas de circuito e uma característica elétrica deste tipo de válvula, e a figura 5.3.6 mostra imagens de válvulas de diferentes épocas (1918 – 1960).



Fig. 5.3.6 Válvulas de diferentes épocas entre 1918 e 1960 em ordem cronológica. Imagem da Wikipedia https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triody_var.jpg

Voltaremos ainda brevemente para a condutividade no ar em alta pressão. No caso de eletrodos metálicos sem incidência de luz, sem aquecimento e sem campos intensos, os eletrodos podem somente roubar portadores de carga e com isto diminuir a condutividade.

Era isto que provava a saturação da corrente como foi discutido anteriormente. Mas há um caso interessante de um “eletrodo” que consiste em uma camada de gás ionizado e neste caso o eletrodo fornece portadores de carga. Encontramos esta situação na atmosfera terrestre. Podemos pensar na baixa atmosfera como um corpo condutor entre dois eletrodos: um eletrodo é a superfície da Terra e o outro a ionosfera. A ionosfera é uma parte da atmosfera terrestre que possui uma alta concentração de íons. Estes íons são criados principalmente pelos raios ultravioletas e raio-X do Sol. A ionosfera se divide em diversas camadas e a camada mais baixa, que nos interessa no presente contexto, se situa aproximadamente numa altura de 60 km a 100 km acima do solo. Por uma razão que discutiremos numa próxima seção, há uma diferença de potencial entre estes eletrodos; temos aproximadamente $V_{\text{ionosfera}} - V_{\text{Terra}} \approx +300 \text{ kV}$. Com esta diferença de potencial e uma distância de 60 km, poder-se-ia esperar um campo elétrico na ordem de 5 V/m na atmosfera. Mas o que se mede perto do solo é algo como 100 V/m até 200 V/m. Este valor pode variar um pouco durante o dia. Como se explica esta discrepância? A Terra negativa atrai íons positivos da ionosfera. Então o “eletrodo” ionosfera injeta íons positivos no corpo condutor. Neste caso temos um condutor não neutro. O ar está ligeiramente positivo e esta carga positiva blinda a carga negativa na superfície da Terra. Desta forma o módulo do campo elétrico cai rapidamente com a altura, e o valor elevado de 100 V/m até 200 V/m é encontrado somente em camadas de algumas centenas de metros de altura.

Exercício

E 5.3.1: Um valor típico da condutividade elétrica da atmosfera na altura do solo é $2 \times 10^{-14} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$. Supondo um campo vertical para baixo com módulo de 150 V/m, calcule: (a) a densidade de corrente, (b) a corrente total recebida pela Terra. (c) use a lei de Gauss para calcular a carga total na Terra. (d) Se não houvesse nenhum processo que bombeasse cargas para a ionosfera, em quanto tempo acabaria a carga na Terra com a corrente calculada no item (b)?