

**Universidade de Évora**

**Departamento de Física**

# **TEORIAS DE ELECTRIFICAÇÃO DAS NUVENS**

(Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri)

*Cristina Maria Horta Simões*

Orientador: Professor Doutor A. Heitor Reis

Évora

2006

**Universidade de Évora**

**Departamento de Física**

# **TEORIAS DE ELECTRIFICAÇÃO DAS NUVENS**



(Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri)

163 332

*Cristina Maria Horta Simões*

Orientador: Professor Doutor A. Heitor Reis

Évora

2006

## Resumo

Este trabalho tem como objectivo avaliar as várias teorias que têm vindo a ser propostas ao longo dos últimos anos, na tentativa de encontrar uma explicação consensual e coerente para uma questão que permanece ainda hoje por resolver: “Porque e Como se electrificam as nuvens de tempestade.”

É revisto todo o processo global, que ocorre na atmosfera, desde a molécula neutra à formação da tempestade, passando pela formação de iões (ionização) e separação de cargas na atmosfera.

Surge desde logo a questão de como se mantém carregado e quem são os geradores de corrente de alimentação deste circuito. É analisada a primeira teoria proposta por Wilson, e as várias que se seguiram por alguns autores, na tentativa de resolver as lacunas que a teoria de Wilson não conseguia preencher.

A origem da densidade de corrente, constantemente presente na atmosfera, ficou conhecida como o problema fundamental da electricidade atmosférica. A primeira tentativa para resolver este problema foi sugerida por C. T. R. Wilson em 1920 e desde então que este assunto tem sido alvo de muitos estudos por parte da comunidade científica, entre os quais se destacam Harrison, Kasemir, Ogawa e Wilson, largamente citados neste trabalho.

Em resumo podemos actualmente constatar que a radiação cósmica, a ionização que ocorre na ionosfera (fotoionização) e as tempestades constituem os três geradores principais no circuito eléctrico global.

É analisado também o modo como as alterações climáticas podem perturbar este sistema eléctrico pois os parâmetros eléctricos atmosféricos podem ser bons indicadores de modificações no clima eléctrico planetário. As medições eléctricas atmosféricas constituem assim uma fonte promissora de informação ambiental.

Por fim introduz-se então a questão da electrificação das nuvens apresentando algumas teorias que, não respondendo totalmente à questão, pelo menos fornecem pequenos contributos, que representam os passos em frente na sua clarificação.

## **Abstract**

### **ELECTRIFICATION OF CLOUDS THEORIES**

This work pretend evaluates various theories that has been proposed along the last years, in attempt to found a consensual and coerent explanation for one question that remains to resolve until now: "Why and how the thunderclouds become electrified."

All the global process, that occur in atmosphere, is review, from the neutral molecule to the formation of the tunderstorm, passing by ions formation (ionization) and charge separation in atmosphere.

Soon arises the question how remain charged and who are de generators of this circuit. It is analised the first teory proposed by Wilson, and the others that were proposed later by many autors, trying to resolve the gaps that Wilson teory do not fill out.

The origyn of current density, always present in atmosphere is known by Fundamental problem of atmospheric electricity. The first attempt to resolve this problem was suggest by Wilson in 1920 and since then this subject has been target of many studies by scientists, with distinction for Harrison, Kasemir, Ogawa and Wilson, largely cited in this work.

Briefly now we can stablish that cosmic radiation, ioniation in ionosphere (fotoionization) and the thunderstorms are the main three generators in global electric circuit.

It is analised too the way how climate changes might disturbe this electric system so the atmospheric electric parameters can be good indicators of changes in planetary electric clime. Atmospheric electric measurements be a promising source of environmental information.

Finally we introduce the question about electrification of clouds presenting some teories that no give all the answers but furnish littles contributes, representing some steps forward in the way of its clarification.



# ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - O CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL.....	3
2.1 - Introdução histórica.....	3
2.2 - O campo eléctrico de bom tempo.....	5
2.3 - A camada eléctrodo.....	6
2.4 - O condensador esférico de Wilson.....	7
2.5 - A ionosfera.....	9
2.6 - Corrente eléctrica global ou a corrente de Maxwell.....	12
2.6.1 - A corrente eléctrica atmosférica.....	12
2.6.2 - Descarga pontual.....	13
2.6.3 - Corrente de precipitação.....	13
2.6.4 - Os raios.....	14
2.7 - As lacunas da teoria de Wilson.....	14
2.8 - Mecanismos que mantêm o circuito global carregado.....	17
2.8.1 - Electrificação por contacto.....	18
2.8.2 - Electrificação por influência.....	18
2.8.3 - Electrificação por indução.....	19
2.8.4 - o processo Elster-Geitel.....	19
2.8.5 - O efeito Wilson.....	19
2.8.6 - Electrificação por difusão.....	20
2.8.7 - O mecanismo electroquímico.....	20

2.9 - Como pode a alteração climática influenciar o sistema eléctrico?.....	21
3 - TEORIAS DE ELECTRIFICAÇÃO.....	23
3.1 - Breve abordagem histórica.....	24
3.2 - Desenvolvimento eléctrico de uma nuvem de tempestade.....	25
3.3 - A indução de cargas e a quebra de rigidez dieléctrica.....	31
3.4 - Relâmpagos.....	33
3.5 - A electrificação das nuvens.....	34
3.5.1 - Processos microfísicos.....	35
3.5.1.1 - O processo indutivo/não indutivo.....	35
3.5.1.2 - O processo termoeléctrico.....	36
3.5.2 - Processos macrofísicos.....	36
3.6 - A teoria de Wilson.....	37
3.7 - Um possível novo mecanismo molecular de electrificação das nuvens.....	38
3.8 - Origem do paradigma da electricidade atmosférica.....	38
3.9 - Elementos do presente paradigma.....	39
3.10 - Potenciais anomalias.....	39
4 - CONCLUSÕES.....	42
Referências bibliográficas.....	

# 1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe uma avaliação de várias teorias que têm surgido ao longo dos últimos anos, na tentativa de encontrar uma explicação consensual e coerente para a questão que permanece ainda hoje por resolver: “Porque e Como se electrificam as nuvens de tempestade.” Não se pretende aqui tomar partido de nenhuma delas nem decidir qual a correcta, mas sim compará-las nas suas vantagens e fragilidades, de modo a encontrar soluções no conjunto delas para a questão que tanto tem intrigado a comunidade científica desde sempre.

É apresentado o processo global, que ocorre na atmosfera, desde a molécula neutra à formação da tempestade, passando pela formação de iões (ionização), separação de cargas na atmosfera. Surge desde logo a questão de como se mantém carregado e quem são os geradores de corrente de alimentação deste circuito. É analisada a primeira teoria proposta por Wilson, um pioneiro nesta área de estudo, e a evolução que sofreu a sua teoria ao longo dos últimos anos, com novos estudos de alguns autores que tentaram resolver as lacunas que a teoria de Wilson não conseguia preencher.

A origem da densidade de corrente, constantemente presente na atmosfera, ficou conhecida como o problema fundamental da electricidade atmosférica. A primeira tentativa para resolver este problema foi sugerida por C. T. R. Wilson em 1920, sugerindo que são as tempestades à volta do mundo os grandes geradores que mantêm o circuito carregado. Desde então que este assunto tem sido alvo de muitos estudos por parte da comunidade científica, entre os quais se destacam Harrison, Kasemir, Ogawa e Wilson, largamente citados neste trabalho.

Em resumo podemos actualmente constatar que a radiação cósmica, a ionização que ocorre na ionosfera (fotoionização) e as tempestades constituem os três geradores principais no circuito eléctrico global. São também apresentados neste trabalho a várias correntes eléctricas que ocorrem e que fecham o circuito global e os vários mecanismos que mantêm o circuito global carregado.

É analisado também o modo como as alterações climáticas podem perturbar este sistema eléctrico pois os parâmetros eléctricos atmosféricos podem ser bons indicadores de modificações no clima eléctrico planetário. As medições eléctricas atmosféricas constituem assim uma fonte promissora de informação ambiental.

Por fim introduz-se então a questão da electrificação das nuvens, tema que constitui o centro deste trabalho, apresentando algumas teorias que, não respondendo totalmente à questão, pelo menos fornecem pequenos contributos, que representam os passos em frente na sua clarificação.

## 2 - O CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL

Desde sempre que os fenómenos eléctricos da atmosfera têm intrigado o Homem pelo sua vertente mística e espectacular. Muitos investigadores nesta área têm desenvolvido inúmeros estudos científicos e experiências laboratoriais, com medições de parâmetros atmosféricos, que representam hoje uma base de dados valiosa, na procura de respostas a tantas questões que permanecem ainda por explicar.

### 2.1 - Introdução histórica

Após a descoberta das primeiras propriedades eléctricas da matéria, tornou-se evidente que os relâmpagos deveriam ser uma forma de electricidade, associada de algum modo às tempestades. Benjamin Franklin, representa uma referência nesta área de estudo, realizando experiências inovadoras e arrojadas para a época (século XVIII), questionando a natureza do relâmpago e relacionando-o com os raios produzidos em laboratório. Mais intrigante ainda revela-se a descoberta de Lemonnier (1752), que conseguiu detectar uma carga eléctrica fraca na atmosfera, mesmo na ausência de nuvens. Notou ainda uma diferença na intensidade eléctrica durante a noite e o dia. A descoberta de Lemonnier deu origem a um novo campo de pesquisa na física da atmosfera, a chamada electricidade de bom tempo.

Mais tarde, o cientista italiano Beccaria (1775) confirmou as descobertas de Lemonnier, verificando que varas pontiagudas e fios eléctricos isolados suspensos na atmosfera tornavam-se positivamente carregados em relação à superfície da terra durante bom tempo, sob céu limpo. Notou também uma polaridade contrária quando passava uma nuvem de trovoada, indicando a introdução de carga negativa por cima (fig. 1). Assim ele reforçou as descobertas de Franklin de que as nuvens de trovoada são geralmente carregadas negativamente na base e positivamente no topo.

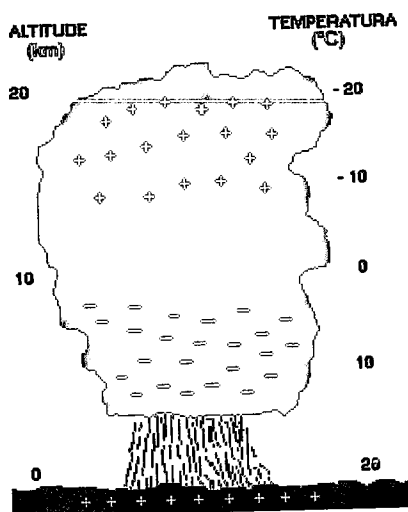


Fig. 1 - Nuvem de tempestade.

Beccaria confirmou também a existência da variação diurna da electrificação na condição de tempo bom.

Em 1779, Saussure mediu pela primeira vez a carga induzida num condutor imerso na atmosfera, com um instrumento construído por si, um precursor do electrómetro. Além de confirmar os resultados de Beccaria, Saussure descobriu uma variação anual da electrificação na condição de bom tempo, bem como uma variação com a altitude. Ele acreditava que elas poderiam ser explicadas assumindo que o ar continha uma carga positiva.

Em 1785, Coulomb descobriu que o ar é condutor, observando que um objecto condutor isolado exposto ao ar perdia gradualmente a sua carga. A sua descoberta, entretanto, não foi compreendida na época, visto que os gases eram então considerados como isolantes, e ficou completamente esquecida (Wahlin, 1989).

Em 1842, Peltier estabeleceu que a Terra é carregada negativamente mas não consegue explicar como é mantida essa carga na presença da corrente de escoamento.

Os anos que se seguiram foram de grandes progressos no conhecimento acerca da electricidade e magnetismo da atmosfera, inteiramente dependentes do desenvolvimento de novos instrumentos para realização de novas medições.

Apesar deste progresso significativo permanecem ainda questões essenciais acerca de temas tão fundamentais como os mecanismos pelos quais as tempestades produzem relâmpagos (MacGorman and Rust, 1998).

A primeira tentativa relevante para explicar a origem da electricidade de bom tempo foi avançada por W. Thomson (Lord Kelvin). Em 1860, Kelvin defendeu a ideia de que deveriam existir na atmosfera cargas positivas de modo a explicar a sua electrificação em condições de céu limpo. Ele foi também o primeiro a reconhecer a electrificação da atmosfera como uma manifestação de um campo eléctrico (Wahlin, 1989).

Para explicar o campo eléctrico de bom tempo Lord Kelvin propôs a hipótese de que a superfície da Terra e a "ionosfera", camada que fica a 50 Km de altura, formavam um condensador esférico gigante, com uma diferença de potencial de 200.000 Volts entre estas "placas" (fig. 2). A ionosfera representa a placa positiva do condensador, a superfície da Terra representa a placa negativa. O campo de bom tempo pode ser representado por linhas de campo que se estendem desde a superfície da terra e terminam nas cargas na atmosfera. A direcção do campo é em direcção à superfície da terra (Bering III et al., 1998).

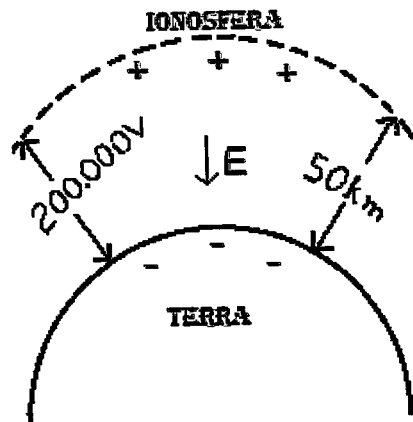


Fig. 2 – O condensador de Kelvin.

## 2.2 - O campo eléctrico de bom tempo

A definição de bom tempo considera condições de céu limpo ou com nuvens não electrificadas o suficiente de modo a inverterem a polaridade do campo eléctrico da superfície da terra (MacGorman and Rust, 1998). Chalmers (1949) define bom tempo quando “não existem processos de separação de cargas na atmosfera” ou quando “os fenómenos eléctricos são calmos o suficiente de modo a verificar-se o principio do estado quase-estacionário”, o movimento das cargas para o interior da região iguala a saída de carga da região, a distribuição vertical de cargas deve ser sensivelmente a mesma em diferentes tempos e aplicam-se as leis da electrostática.

O campo eléctrico de bom tempo é descendente, entre 100 a 300 volts/metro à superfície da Terra, no entanto é-nos imperceptível devido ao facto de tudo à nossa volta, inclusive o nosso corpo, ser bom condutor comparado com o ar. Por essa razão, o potencial do nosso corpo fica igual ao potencial do solo e as linhas equipotenciais (da mesma voltagem) distorcem-se em volta do corpo (fig. 3). Este campo eléctrico, de 100 V/m perto da superfície da Terra, vai diminuindo com a altitude até cerca de 10 V/m a 3km (camada limite), e é praticamente nulo a cerca de 50 km de altura (Bering III et al., 1998).

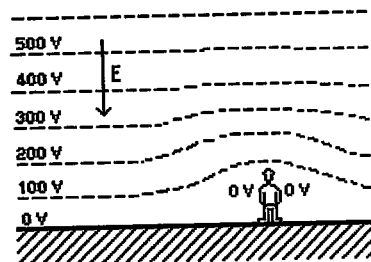


Fig. 3 - Linhas de campo eléctrico.

Este valor, no entanto, pode variar devido a diversos factores tais como a existência de nuvens, a poluição, a turbulência atmosférica e a precipitação. Os parâmetros eléctricos de bom tempo podem constituir assim importantes indicadores quanto a alterações do clima eléctrico planetário. Os dados obtidos no âmbito da electricidade atmosférica

constituem uma informação de grande importância mas, muito trabalho de análise e investigação está ainda por ser feito.

Os dados obtidos do campo eléctrico não são de fácil interpretação, pois existe uma grande variedade de factores externos que o influenciam.

O campo eléctrico de bom tempo pode ser perturbado por movimentos turbulentos [XI]

O campo eléctrico de bom tempo é quase inteiramente devido ao excesso de iões positivos existentes na atmosfera em relação aos negativos na superfície terrestre. A superfície da Terra capta um certo número de iões negativos à população atmosférica de pares de iões, originando um leve excesso de carga negativa à superfície e um igual excesso de carga positiva na atmosfera. Cada carga capturada produzirá uma linha de campo eléctrico que deverá terminar num excesso positivo de iões deixado na atmosfera (fig. 4). Os iões positivos em excesso são mais ou menos misturados uniformemente perto da superfície, até cerca de 3 km de altitude, a camada limite.

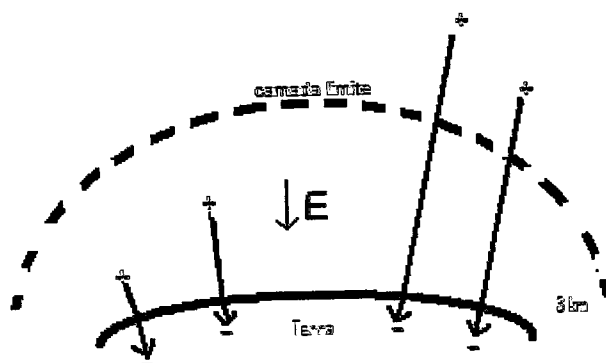


Fig. 4 – O campo eléctrico de bom tempo.

O número de linhas de campo por unidade de área de superfície produzidas pela carga positiva ou espaço carregado (space charge) acima da superfície da terra representa uma medida da intensidade do campo eléctrico. Assim, a intensidade do campo eléctrico será tanto maior à superfície da terra quanto maior o número de linhas de campo por unidade de área (Wahlin, 1989).

### 2.3 - A camada eléctrodo

Como os iões se encontram num volume de ar entre dois eléctrodos as cargas não se mantêm uniformemente distribuídas. O campo eléctrico de bom tempo conduz iões positivos para baixo e negativos para cima. Ambas as polaridades dos iões contribuem para a corrente total. Considerando uma camada infinitesimal de ar em equilíbrio, logo acima do solo, o fluxo de iões de cada polaridade move-se através da região mais elevada da camada igualando o fluxo pela região mais baixa. Não há assim acumulação de iões. No entanto, quando essa região inferior é o solo não há compensação de iões, como apenas se deslocam os iões negativos ascendentemente não há fluxo de iões negativos em baixo para substituírem aqueles que saem no topo da região. Acumula-se uma carga net positiva na camada perto do solo retardando o fluxo de ambas as



polaridades através da região superior (fig. 5). O limite superior da camada eléctrodo ocorre a níveis em que a concentração de iões negativos a altitudes inferiores é suficiente para compensar o atraso do fluxo ascendente necessário ao campo eléctrico modificado.

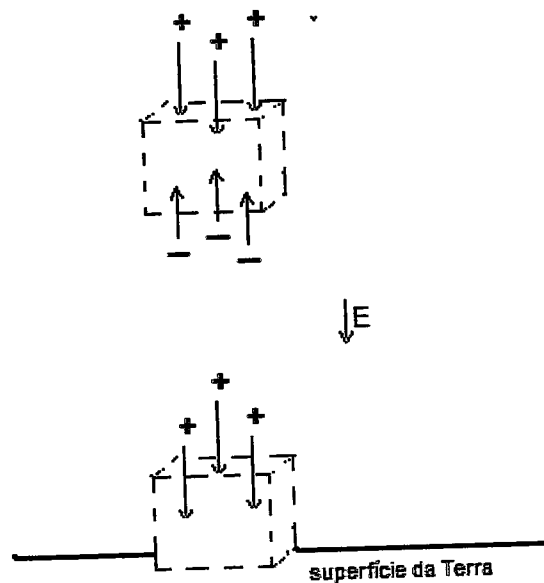


Fig. 5 - O efeito eléctrodo.

O efeito eléctrodo representa um mecanismo de separação de cargas perto da superfície. Numa atmosfera sem aerossóis, esta região tem uma espessura de sómente uns poucos de metros. A presença de aerossóis faz com que esta região seja maior.

## 2.4 - O condensador esférico de Wilson

A origem da densidade de corrente, sempre presente na atmosfera, foi conhecida no início do século 20 como o problema fundamental da electricidade atmosférica. A primeira tentativa para resolver este problema foi sugerida por Wilson em 1920. Foi Wilson quem completou o conceito de circuito propondo que todas as tempestades à volta do mundo são geradores eléctricos, através das suas violentas descargas fornecendo continuamente carga ao circuito. Wilson estabeleceu a hipótese, conhecida como a teoria do condensador esférico, de que a superfície da Terra e uma superfície equipotencial, a uma certa altitude, constituíam placas de um condensador esférico. A camada equipotencial foi denominada electrosfera e localizada entre 40 e 60 km. Mais tarde considerou-se ser coincidente com a ionosfera.

A corrente eléctrica que flui ascendentemente das trovoadas para a ionosfera é conhecida como a corrente de Wilson. Esta corrente espalha-se pelo globo através da ionosfera e também pela magnetosfera ao longo das linhas de campo magnetico para o hemisfério oposto. A corrente regressa à superfície da Terra como uma corrente eléctrica de bom tempo (fair weather air-Earth current). A descarga do raio nuvem-solo recupera a carga das tempestades e fecha o circuito global (Bering III et al., 1998).

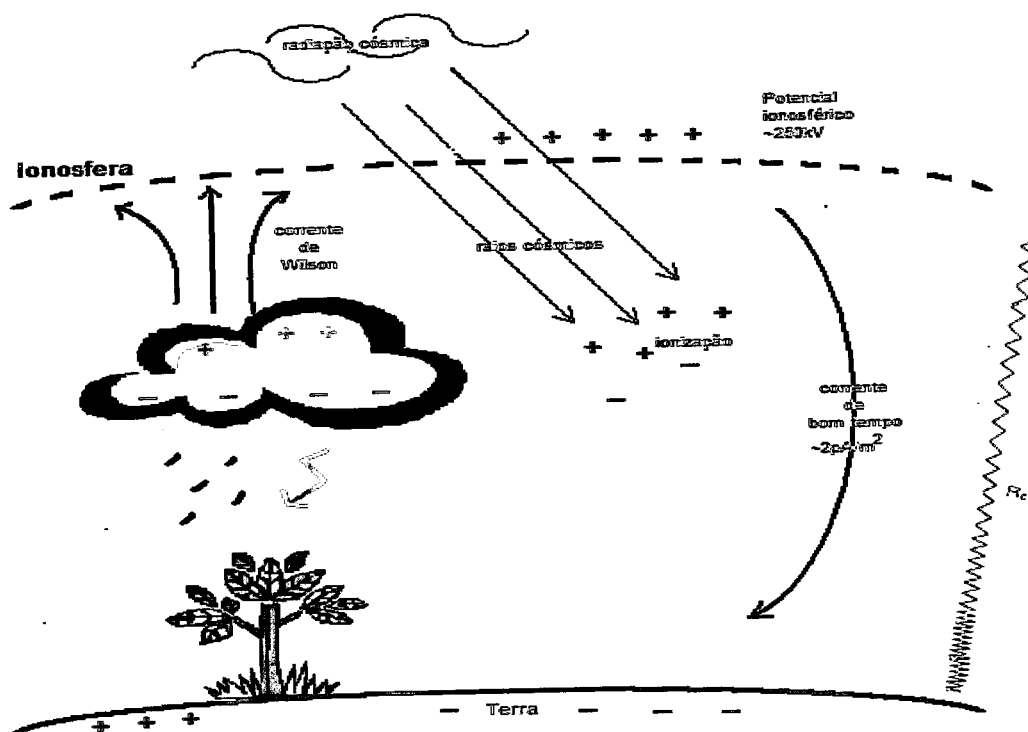


Fig 6 -- Circuito eléctrico global.

O circuito global surge do balanço entre a geração de carga nas regiões perturbadas e uma distribuição global de corrente de pequenos iões fluindo nas regiões de bom tempo. As tempestades, geradores de corrente eléctrica, conduzem correntes eléctricas ascendentes através da atmosfera condutora e mantém a ionosfera a um potencial de cerca de +250kV em relação à superfície da Terra. O circuito eléctrico global é completado pelas correntes de condução, distante das tempestades e pelas correntes transitórias devidas a descargas negativas nuvem-solo dos raios (fig. 6).

$R_c$  é a resistência colunar, ou seja, a resistividade verticalmente integrada e é medida em  $\Omega m^2$ . A resistência atmosférica é maior perto do solo, o trabalho para manter o circuito global carregado é realizado inicialmente na baixa atmosfera, coerente com a ideia de que as tempestades são importantes no circuito eléctrico global (MacGorman and Rust, 1998).

Uma consequência do aumento da condutividade com a altitude é a de que a resistência colunar da atmosfera é concentrada perto da superfície. Aproximadamente um meio da resistência colunar total ocorre nos primeiros 3 km da atmosfera. Por isso, superfícies de grande altitude, tal como o planalto interior central da Antárctica têm resistências colunares menores do que superfícies a nível do mar. Por toda a Terra a resistência entre a superfície e a ionosfera é de cerca de 200 ohms.

## 2.5 - A ionosfera

Ao contrário do que se passa na atmosfera inferior e na média atmosfera, na atmosfera superior existem, além dos iões negativos e positivos, uma considerável quantidade de electrões livres produzidos pela absorção da radiação solar por átomos e moléculas. Este processo é chamado de fotoionização. Os electrões podem então unir-se a moléculas neutras criando iões negativos. Os electrões e iões criados por este processo tornam a atmosfera um razoável condutor, formando a região chamada ionosfera. A densidade de electrões na ionosfera varia consideravelmente com a hora do dia, altitude, latitude, actividade solar e outros efeitos locais. A maior variação da densidade de electrões ocorre ao longo do dia, em função da variação da radiação solar. À noite, a fotoionização é devida à radiação solar espalhada por átomos de hidrogénio das camadas mais externas da atmosfera e é muito menor do que de dia.

Na ionosfera também ocorrem os fenómenos conhecidos por Auroras polares, que se devem à excitação produzida nas partículas desta camada atmosférica pela radiação cósmica.

Os raios cósmicos vindos do espaço e a radioactividade da superfície da Terra ionizam uma diminuta fracção das moléculas da atmosfera, permitindo-lhes mover-se em resposta ao campo eléctrico existente. Contudo a condutividade abaixo da ionosfera é relativamente baixa (MacGorman and Rust, 1998).

A ionosfera estende-se entre os 50 km e os 500 km de altitude, dividindo-se em várias camadas (fig. 7) que variam conforme a hora do dia, as estações do ano e as condições solares. Durante o dia podem haver na ionosfera 4 regiões ou camadas chamadas D, E, F1 e F2.

As suas alturas aproximadas são:

- Região D de 50 a 90 Km.
- Região E de 90 a 140 Km.
- Região F1 de 140 a 210 Km
- Região F2 mais de 210 Km de altura.

A camada D é a mais próxima do solo, é a que absorve a maior quantidade de energia eletromagnética, o seu comportamento é diurno, aparece no momento em que as moléculas começam a adquirir energia solar. Esta camada permanece por alguns instantes no início da noite, iónicamente é a menos energética. É a responsável pela absorção das ondas de rádio durante o dia.

A camada E é semelhante à D, durante o dia forma-se e mantém-se, durante a noite dissipa-se. Em algumas ocasiões, dependendo das condições da radiação cósmica e da energia absorvida durante o dia, a camada E pode permanecer esporadicamente à noite, quando isto ocorre é chamada de camada *E Esporádica*.

A camada F1 existe durante os horários diurnos, acompanhando o comportamento da camada E, podendo esporadicamente estar presente à noite. Serve de reflectora em determinadas frequências, esta reflexão varia conforme a espessura que adquire ao receber energia solar. Normalmente a radiofrequência incidente que atravessa a *camada*

*E*, atravessa a F1. Ao fazê-lo refracta-se, alterando o seu ângulo de incidência sobre a camada F2, reflectindo nesta.

A camada F2 é a mais alta das camadas ionosféricas, o seu aparecimento ocorre ao nascer do Sol, quando a camada F se desmembra em F1 e F2. Situa-se entre os 200 e os 400 km de altitude dependendo da hora do dia, época do ano, condições de vento e ciclo solares. Esta região é o principal meio de reflexão ionosférico utilizado para as comunicações em altas frequências a longa distância.

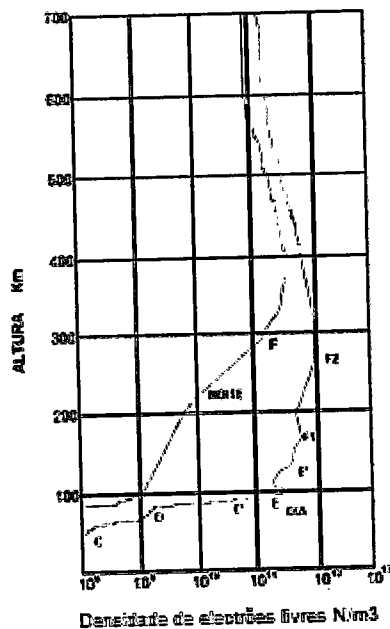


Fig. 7 - As camadas ionosféricas (MacGorman and Rust, 1998).

Este gráfico foi realizado em Dezembro de 1987 no Hemisfério Sul, os dados constantes mostrados são dinâmicos, a distribuição média de electrões por metro cúbico varia muito, deve ser usado apenas para ilustração de como se procede a distribuição iónica na ionosfera.

O tempo constante do circuito, cerca de 2 minutos, demonstra que as tempestades devem ocorrer continuamente para manter o campo eléctrico de bom tempo (Rycroft and Israelsson, 2000).

As correntes de condução só podem fluir porque existem partículas carregadas (os iões) presentes, suficientemente móveis para ser aceleradas por pequenos campos eléctricos presentes na atmosfera. Os iões desempenham um importante papel na manutenção deste circuito eléctrico global atmosférico.

## 2.5 - Mecanismos de ionização

A ionização é um processo de ruptura dos laços electrónicos nos átomos, que produz a formação de pares de iões de cargas opostas. Os principais mecanismos de ionização ocorrem na atmosfera através de colisões de partículas neutras, da acção dos raios cósmicos, pela radioactividade natural e por fotoionização.

As três primeiras são responsáveis pela produção de iões na atmosfera inferior e na média atmosfera enquanto que a última é típica da atmosfera superior.

Os raios cósmicos são originários da chama solar e de outros objectos galácticos tais como as supernovas e estrelas explosivas. São partículas sub-atómicas, com velocidades próximas da da luz (300.000 km/s), que preenchem todo o espaço cósmico e eventualmente atingem a Terra. Raios cósmicos primários são aqueles, provenientes do espaço, que atingem a Terra. A radiação cósmica primária atinge a alta atmosfera e interage com os seus átomos. Na colisão, além do núcleo atingido se desintegrar nos seus nucleões constituintes (protões e neutrões), é produzida uma imensidão de partículas secundárias. A partícula primária, que retém a maior parte da sua energia após a colisão, bem como as partículas produzidas, interagem com novos núcleos, formando uma cascata de partículas radioactivas.

A produção de iões devido à radiação natural da Terra depende das características do solo. Em particular, nos oceanos ela é várias ordens de magnitude menor do que nos continentes. Em geral, a razão média de ionização (produção de pares de iões) sobre os continentes devida a substâncias radioactivas é predominante sobre aquela devida a raios cósmicos abaixo de 1 km. Acima de 1 km, a razão de ionização é dominada por raios cósmicos.

A fotoionização consiste na criação de partículas carregadas devido à absorção de radiação solar, a comprimentos de ondas menores que 102,7 nm, por moléculas e átomos atmosféricos. A energia vinda desta radiação ultravioleta extrema é transferida para um electrão na molécula que então se escapa para se tornar um electrão livre, deixando a molécula com um excesso de carga positiva. Toda a radiação solar a frequências extremas de ultravioleta é absorvida na ionosfera. Abaixo da ionosfera a atmosfera é fracamente condutora.

A ionização na baixa atmosfera é maioritariamente causada por raios cósmicos e radioactividade natural. Também são produzidos iões no interior da nuvem e nas suas proximidades através de descargas de raios e processos de descarga de coroa, como veremos de seguida.

Como resultado da ionização das moléculas, são criados electrões livres e iões positivos. Os electrões são então rapidamente ligados a outras moléculas neutras produzindo iões negativos.

A razão de ionização é também dependente das condições meteorológicas e da actividade geomagnética e solar. Ocasionalmente, a ionização criada por partículas energéticas durante períodos de alta actividade geomagnética e solar pode dominar sobre a ionização produzida por raios cósmicos acima de 20 km. Também o ciclo solar de 11 anos produz uma variação na razão de ionização na atmosfera. Esta variação torna-se mais pronunciada com o aumento da altura e com o aumento da latitude geomagnética.

## 2.6 - Corrente eléctrica global ou a corrente de Maxwell

Em resposta à existência de um campo eléctrico vertical orientado para baixo e à presença de iões negativos e positivos, uma densidade de corrente, denominada densidade de corrente de Maxwell, flui constantemente na atmosfera. Nas regiões de tempo bom, a densidade de corrente é basicamente uma densidade de corrente de condução, é aproximadamente constante com a altitude e da ordem de  $2 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$  (MacGorman and Rust, 1998).

### 2.6.1 - A corrente eléctrica atmosférica

Como já mencionado a atmosfera é condutora e o potencial ou o campo eléctrico terrestre deve causar uma corrente que flui na atmosfera. Desde que haja um excesso de iões positivos residentes na atmosfera e uma carga oposta negativa correspondente na superfície terrestre, a carga deve fluir para a terra na forma de uma corrente de iões positiva.

O efeito da geração de carga pelas tempestades conduz a uma pequena corrente de condução através das regiões de bom tempo de densidade de corrente de cerca de  $2 \text{ pAm}^{-2}$ .

A realização de medições directas de correntes eléctricas na atmosfera são difíceis, se não mesmo impossíveis de obter. Geralmente, obtém-se estes valores indirectamente através da condutividade e dos valores do campo eléctrico, usando a lei de Ohm, que se traduz na equação:

$$J = \sigma E$$

Onde  $J$  é a densidade de corrente de condução,  $\sigma$  é a condutividade e  $E$  o gradiente de potencial (igual em magnitude ao campo eléctrico vertical).

Integrando através da superfície de todo o planeta, a corrente de condução iónica total é de cerca de 2000 A (Harrison and Aplin, 2003).

Os pequenos iões dominam os movimentos de cargas que originam as correntes de bom tempo. Com diâmetros entre  $10^{-10} - 10^{-9} \text{ m}$ , a sua massa é suficientemente pequena para que se desloquem consideravelmente sob a acção de um campo eléctrico, mesmo o fraco campo eléctrico presente em bom tempo.

Isolando uma porção da superfície da terra e medindo a carga recolhida num certo tempo pode ser um método de obtenção das medidas directas de corrente ao nível do solo. No entanto alguns estudos nesta área vieram mostrar que a corrente indirecta dá frequentemente um valor duas vezes maior que o método directo. Esta discrepância pode ser explicada pelo facto de haver sempre convecção e perturbação na atmosfera, que origina o deslocamento mecânico ascendente de cargas para a atmosfera, gerando assim uma corrente mecânica ou de convecção na direcção oposta do escoamento de corrente (Wahlin, 1989).

## 2.6.2 - Descarga pontual

A carga eléctrica em excesso num corpo condutor distribui-se apenas pela superfície exterior do corpo e concentra-se nas zonas mais pontiagudas (ou de menor raio). Na proximidade destes corpos existem sempre átomos e moléculas ionizadas. A grande concentração de cargas eléctricas numa zona pontiaguda provoca a atracção para essa zona de iões de sinal contrário. Os iões atraídos provocam a descarga pontual.

É difícil determinar a carga total transportada para a superfície da terra através da descarga pontual sob nuvens electrificadas. Wormell (1930) fez algumas estimativas por um período de 4 anos, chegando a valores de Ele fez uma suposição de que a descarga total da corrente da ponta à volta do mundo traz carga negativa à superfície a uma taxa de cerca de 1500 amperes o qual pode fornecer cerca de 75% da corrente total de bom tempo leakage. Outros investigadores deram valores levemente mais baixos para a média da corrente de descarga de ponta mas não menos de 25% da corrente de bom tempo. A fonte da corrente de descarga de ponta são as nuvens electrificadas as quais claro também trazem carga para o solo pelo raio. A corrente de descarga de ponta é de um certo modo, cancelada por uma larga quantidade de raios positivos para o chão e através de cargas positivas a atingir a superfície da terra por precipitação (Wahlin, 1989).

## 2.6.3 - Corrente de precipitação

A electricidade da precipitação tem tido um importante papel na pesquisa atmosférica devido a acreditar-se que a carga das partículas de precipitação pode, de certo modo, relatar qual deverá ser o mecanismo que está activo nas nuvens. No entanto, isto não é sempre verdade porque a carga final numa gota da nuvem é determinada no espaço entre a base da nuvem e o chão e é normalmente de sinal oposto à carga da base da nuvem de onde vem. Este fenómeno peculiar é chamado de efeito imagem-espelho. Na figura 8 as duas curvas mostram a alteração da intensidade do campo eléctrico e a quantidade de carga da precipitação que atinge a superfície da terra em função do tempo. Pode-se verificar facilmente que quando o campo eléctrico se torna negativo (carga negativa na base da nuvem) a corrente de precipitação torna-se positiva e viceversa. Como diz Chalmers uma gota deve demorar alguns minutos a cair da base da nuvem para o chão. Como a carga da precipitação muda com o gradiente de potencial abaixo da nuvem, isto pode significar que as gotas também obtêm a sua carga final abaixo da nuvem ou muito perto do solo. Em contraste com a chuva, as correntes de precipitação trazidas para o solo pela neve são usualmente sempre negativas sob potencial gradientes entre  $\pm 800$  V/m (Chalmers 1956). A corrente de precipitação total à volta da terra estima-se ser de cerca de +340 amperes.

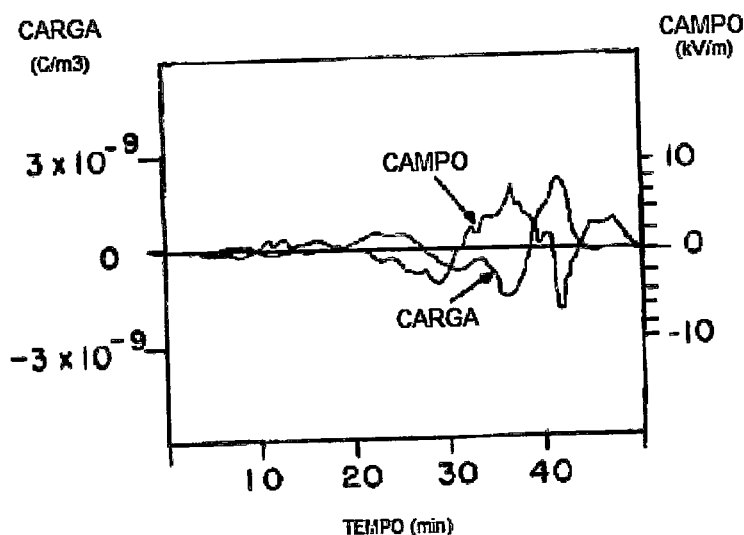


Fig. 8 - O efeito imagem-espelho (Wahlin, 1989).

#### 2.6.4 - Os raios

A carga transportada para a terra pelos raios estima-se de cerca de -340 amperes o que anularia a corrente de precipitação. Deve-se lembrar que uma corrente média de -340 amperes representa o excesso de carga negativa sobre a positiva que atinge o solo pelos raios e que a razão da descarga de raios negativos/positivos para o solo é de cerca de 25000 amperes, mas a carga total média apenas de 25 coulomb. Descargas positivas trazem normalmente 10 vezes mais carga e corrente que as negativas, no entanto eles são excedentários à razão de 10:1 (Wahlin, 1989).

Pela complexidade inerente aos mecanismos associados às tempestades, a importância relativa destas correntes, como geradoras para o circuito global, permanece em estudo. É também possível que outros geradores não associados às tempestades possam ter um papel significativo no circuito global. Outras nuvens electrificadas, além das de tempestade, são um possível candidato mas devido ao pouco conhecimento que se tem actualmente da estrutura eléctrica destas nuvens, a sua importância permanece uma incógnita.

#### 2.7 - As lacunas da teoria de Wilson

Verifica-se que a teoria do condensador esférico para o circuito eléctrico atmosférico global tem várias limitações. Antes da descoberta da magnetosfera tratava-se a ionosfera como uma superfície equipotencial, mas a investigação mais recente tem mostrado que isso não é correcto a todas as altitudes (Bering III et al., 1998). Embora a condutividade da ionosfera seja bastante elevada, ela aumenta sistematicamente com a altitude, de modo que não existe uma camada equipotencial. Tem sido proposta uma versão electrostática mais completa do circuito eléctrico atmosférico global sem considerar a existência de uma camada equipotencial superior. Tal facto torna possível a influência dos campos eléctricos ionosféricos e magnetosféricos sobre a atmosfera inferior, principalmente perto das regiões polares (MacGorman, 1998).



O circuito global depende directamente da variação no número global de tempestades e também a variações na intensidade da radiação cósmica. Variações no fluxo de raios cósmicos que atingem a atmosfera podem causar uma considerável alteração na resistividade eléctrica da atmosfera acima das tempestades, produzindo sensíveis variações no circuito. O circuito global também apresenta variações anuais e semianuais, como veremos a seguir, em resposta às assimetrias nas áreas com continentes e oceanos e variações semi-anuais da temperatura do ar nos trópicos, que apresentam máximos valores nos equinócios quando o sol está centrado sobre o equador.

Se não existisse uma fonte contínua de carga, após um certo tempo toda a carga na atmosfera fluiria para a superfície da Terra anulando a sua carga, de modo que não existiria um campo eléctrico na atmosfera.

As cargas entre as placas, movendo-se em direcção ao solo, constituem uma corrente de fuga. Esta corrente pode ser calculada multiplicando a densidade de corrente em condições de bom tempo pela área da superfície da Terra. Obtém-se uma corrente total de descarga do condensador de cerca de 1000 A (Wahlin, 1989). De modo a manter o condensador esférico carregado, a actividade das tempestades em todo o mundo deve actuar como um gerador de corrente, separando cargas e originando o transporte de cargas positivas da Terra para a ionosfera na mesma razão de 1000 A. Considerando que existem à volta de 1000 tempestades sempre a ocorrerem na Terra, cada tempestade geraria cerca de 1 A. Se esta teoria estiver correcta, deve existir uma relação entre a actividade global das tempestades (a intensidade do gerador) e o campo eléctrico em condições de bom tempo.

A similaridade entre a variação diurna da actividade global de tempestades e a curva de Carnegie, com valores máximos e mínimos aproximadamente nas mesmas horas universais (fig. 9), tem sido usada para atribuir a variação diurna do campo eléctrico à actividade global das tempestades, sendo este o argumento mais forte a favor da teoria do condensador esférico.

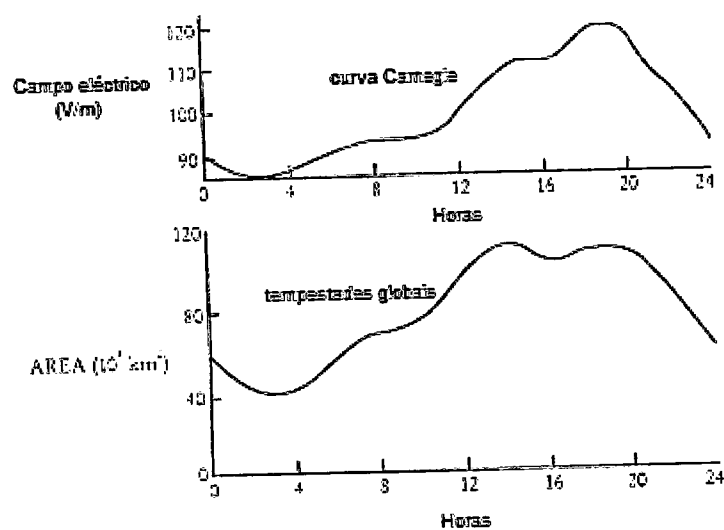


Fig. 9 – Comparação entre a curva de Carnegie e a actividade global das tempestades (Bering III et al., 1998).

A típica variação diurna do campo eléctrico em função da hora universal foi pela primeira vez identificada através das medidas realizadas pelo navio Carnegie na década de 20. A curva de Carnegie é um resultado de valores médios horários do campo eléctrico tomados ao longo de muitos dias.

A grande questão se o circuito global é realmente conduzido pela actividade das tempestades tem levado à comparação da actividade total das tempestades com o gradiente potencial medido à superfície. Appleton (1925) estudou a variação diurna concluindo que o padrão era semelhante ao da ocorrência de tempestades, com a maioria das tempestades a ocorrerem na vasta cintura equatorial. Notou também que a América do Sul e a África do Sul eram “o centro de gravidade” das regiões de tempestade (fig. 10).

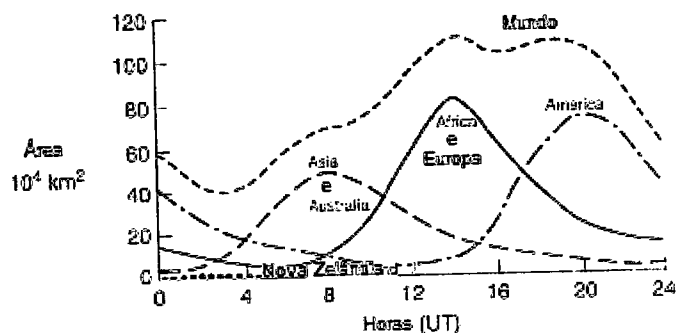


Fig. 10 - Variação diurna global de tempestades em terra (MacGorman and Rust, 1998).

A hipótese da tempestade geradora proposta por Wilson (1920) foi baseada nas suas observações em que, abaixo da nuvem de tempestade é transferida carga positiva para o topo da atmosfera condutora. Uma descoberta subsequente é a correlação estreita entre a variação diurna (Tempo Universal) na corrente do gerador tempestade (representada pela frequência da ocorrência da tempestade) e a corrente de carga representada pelo campo eléctrico de bom tempo do solo, ou densidade de corrente ar-Terra, integrado pela superfície da Terra (Rycroft and Israelsson, 2000).

Os dados apresentados por Imyanitov e Chubarina (1967) não apoiam muito a teoria de um circuito fechado na medida em que mostram que as variações anuais no campo de bom tempo não estão em fase com a típica actividade das trovoadas através do mundo no mesmo período.

Num controverso artigo de 1993, Earle Williams e Stan Heckman construíram um modelo adicionando a soma global das correntes de descarga pontual e de coroa do fogo de Santelmo produzida pelas nuvens electrificadas para a corrente da actividade do relâmpago e produziu uma curva com uma amplitude de modulação que está em melhor acordo com a curva de Carnegie. Concluíram que uma fracção significativa da corrente que flui no circuito global é mais provável ser transportada por correntes de descarga pontual do que pelos raios dos relâmpagos.

Também Kasemir fez notar que a curva que representa as variações diurnas do campo de bom tempo é demasiado suave para se ajustar aos dados da actividade das trovoadas

do globo, porque imagens recentes de satélite mostram que as trovoadas são maioritariamente activas em terra continental do que nos oceanos.

O campo eléctrico médio também apresenta variações sazonais com valores máximos na Primavera e no Verão no Hemisfério Norte, indicando que existem mais tempestades nestas estações no Hemisfério Norte do que nestas mesmas estações no Hemisfério Sul (MacGorman, 1998). Whipple (1929) foi um pioneiro no estudo deste tema, mostrando que o número de tempestades era 15% superior durante o verão no hemisfério sul que durante o verão no hemisfério norte. O seu trabalho continua a ser uma referência na investigação da hipótese do papel que desempenham as tempestades no circuito global.

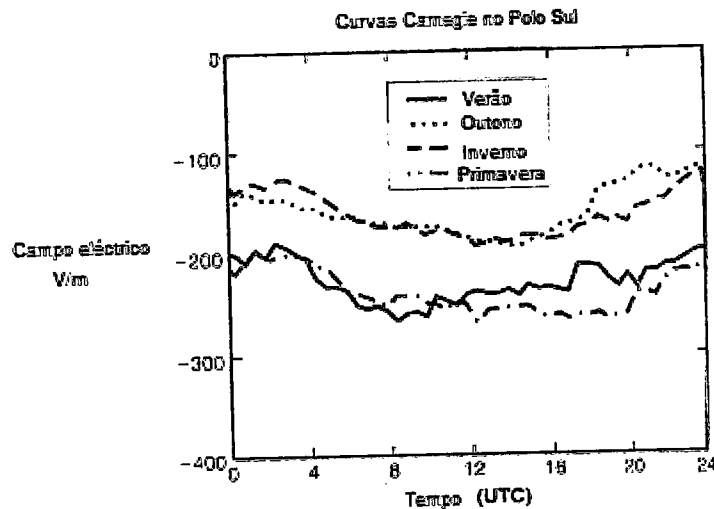


Fig. 11 - Variação sazonal no Hemisfério Sul em tempo bom.

A diferença entre o Verão e o Inverno, como se define no Hemisfério Norte, é um resultado do facto de que aí há mais terra. Porque as trovoadas ocorrem principalmente sobre terra esta distribuição significa que há mais trovoadas durante o verão do norte do que durante o Verão do sul (Bering III, 1998).

## 2.8 - Mecanismos que mantêm o circuito global carregado

Uma questão crucial permanece ainda por ser respondida: O que causa a carga positiva na atmosfera e como é a carga negativa contrária mantida na superfície terrestre?

Há vários processos básicos de carga propostos os quais de um modo ou de outro podem contribuir para o fenómeno eléctrico atmosférico. Alguns dos mais importantes são o mecanismo electroquímico, por influência, por difusão e mecanismos envolvendo congelamento e formação de partículas de gelo. Muitos destes mecanismos foram criados para explicar o carregamento das nuvens de tempestade. Algumas teorias, tais como as envolvendo processos por influência por exemplo, não operam nos primeiros estágios do crescimento da nuvem, e outros, envolvendo congelamento e gelo, não

podem ser considerados dominantes desde que existam tempestades quentes tropicais as quais não contêm gelo. Há numerosas outras teorias as quais não serão mencionadas aqui e há mesmo teorias que argumentam que uma combinação de todos os mecanismos de carga pode actuar em conjunto, como um só, e ao mesmo tempo.

A última teoria a ser proposta é a do processo electroquímico avançada por Wahlin. O mecanismo de carga electroquímico tem a vantagem de ser capaz de explicar tanto o carregamento da tempestade e electricidade de bom tempo. Até agora é o único mecanismo de carga que pode ser facilmente demonstrado por modelos laboratoriais.

Já conhecemos a teoria de Wilson, de que todas as tempestades à volta do mundo carregam o sistema terra-atmosfera. Uma teoria mais recente, proposta por Wahlin (1973), considera o efeito electroquímico como o mecanismo de carga onde os iões negativos da atmosfera são preferencialmente capturados pela superfície terrestre deixando atrás iões positivos na atmosfera circundante. Na opinião deste autor, ambos os mecanismos são certamente capazes de fornecer carga necessária e energia ao sistema terra-atmosfera, mas há ainda muita investigação a realizar nesta área de forma a encontrar as respostas certas.

### 2.8.1 - Electrificação por contacto

A electrificação por contacto envolve contacto mecânico entre sólidos onde os electrões de camadas mais baixas saltam para mais altas. Potenciais contactos são da ordem de poucos décimos de volt e podem ocorrer na atmosfera quando partículas sólidas de precipitação de diferentes temperaturas colidem ou quando partículas sólidas de precipitação saltam saltam (bounce off material surfaces) tanto no solo como na atmosfera.

### 2.8.2 - Electrificação por influência

Este processo lida com cargas que surgem na superfície de materiais e que são expostas a um campo eléctrico. Por exemplo poeira sobre a superfície da Terra pode ser negativamente carregada durante condições normais de bom tempo porque as linhas de campo eléctrico do espaço positivo na atmosfera acima deve terminar na superfície da Terra negativamente carregada (a superfície neste exemplo sendo coberta de pó). Durante ventos fortes as partículas de pó carregadas negativamente podem ser transportadas pelo vento e formar nuvens de poeira altamente electrificadas. Tempestades de areia e poeira são na maioria das vezes carregadas negativamente. Foram detectadas aumentos significativos do campo eléctrico durante a passagem de uma massa de ar tropical que continha poeira do Sahara (Reiter, 1992).

A mesma explicação pode ser aplicada à electricidade da queda de água (cascata) onde a carga negativa induzida pelo campo de bom tempo à superfície da água, é trazida pelo eixo da cascata. A electricidade de uma queda de água resulta de gotas de água instáveis que se dispersam quando atingem uma velocidade crítica. Então saltam e explodem. As pequenas gotas que surgem trazem carga eléctrica negativa, as maiores positiva. Este processo funciona assim excepto quando a água contém substâncias químicas em concentrações consideráveis.

Também se observou carga positiva na explosão das bolhas na crista branca da onda da superfície do oceano. Este processo depende dos sais dissolvidos na água do mar. Devido à vastidão da superfície dos oceanos e da intensa agitação na sua superfície, tem-se questionado se a carga positiva produzida perto da sua superfície pode contribuir para o circuito global. Esta questão mantém-se em discussão devido ao tamanho das partículas (iões grandes e gigantes) e a necessidade de auxiliar as partículas carregadas da superfície a elevarem-se por convecção a um nível que pode ocorrer o transporte adicional de ventos à escala sinóptica (Reiter, 1992).

### 2.8.3 - Electrificação por indução

Carregamento por indução nas nuvens de tempestade tem sido considerado por vários investigadores baseado na ideia de que as gotas das nuvens, polarizadas enquanto sujeitas ao campo eléctrico de bom tempo, preferencialmente capturam carga negativa das gotas menores. Como as gotas grandes caem e colidem com as gotas menores acredita-se haver uma transferência de carga quando a metade superior ou o polo negativo de uma gota menor cede a sua carga durante o encontro. A carga negativa colectada neste modo desceria e ocuparia a mais baixa porção da nuvem enquanto as gotas menores com excesso de carga positiva permanecerá atrás para formar uma região positiva mais elevada.

### 2.8.4 - o processo Elster-Geitel

Este processo lida apenas com a electrificação das partículas de precipitação. Assume que as gotas da nuvem, polarizadas no campo eléctrico de bom tempo, colidem umas com as outras e alteram a carga superficial de um modo que irá aumentar o campo de bom tempo para uma magnitude semelhante à encontrada nas tempestades. Como a gota grande é polarizada no campo eléctrico de bom tempo a sua superfície superior atingirá um pequeno excesso de carga negativa enquanto a mesma quantidade de carga positiva aparecerá na superfície inferior. Uma gota pequena saltando da superfície inferior captará alguma da carga positiva no momento do contacto, e traze-la-á até ao topo da nuvem enquanto a gota maior e mais pesada, agora negativa, continuará a cair e a trazer carga negativa para a região mais baixa da nuvem. Pode-se ver facilmente que à medida que a carga vai sendo separada o campo eléctrico aumentará o que intensificará por sua vez o processo de carga.

Parece que este processo é demasiado fraco. A teoria deverá possivelmente funcionar se o campo eléctrico inicial for igual ao encontrado nas tempestades no caso em que algum outro processo deverá prevalecer.

### 2.8.5 - O efeito Wilson

O efeito Wilson é semelhante ao processo Elster-Geitel com a excepção de que em vez das pequenas gotas colidirem com as gotas maiores polarizadas, crê-se que os iões negativos são arrastados pelas gotas maiores à medida que elas caem através do ar

ionizado normalmente. A carga positiva induzida na metade inferior da gota grande deve captar preferencialmente iões negativos à medida que a gota cai para altitudes mais baixas deixando assim um excesso positivo de carga atrás a níveis superiores. Uma objecção séria a esta teoria é a de que não há produção suficiente de iões dentro de uma nuvem de tempestade para explicar a quantidade de carga separada.

#### 2.8.6 - Electrificação por difusão

Gunn (1957) considera um mecanismo de carga baseado na diferença de mobilidade entre os iões positivos e negativos. Como os iões negativos apresentam uma mobilidade maior, num campo eléctrico, em relação aos iões positivos eles devem ser menos massivos e assim também ter um maior coeficiente de difusão na ausência de campos eléctricos. O resultado esperado é o de que os iões negativos se difundam pela gotas da nuvem a uma taxa maior que os iões positivos possam ou sejam capazes. As gotas da nuvem tornar-se-ão assim mais negativamente carregadas e à medida que caem para a região inferior da nuvem deixam um excesso de carga positiva atrás na região superior.

#### 2.8.7 - O mecanismo electroquímico

Este mecanismo considera a terra como um electrodo imerso num fraco electrólito gasoso, a atmosfera naturalmente ionizada. A superfície da terra absorverá iões negativos e adquire um potencial eléctrico de cerca de -0,25 volts o qual aparecerá na interface terra-atmosfera na forma de uma dupla camada eléctrica. Isto é análogo a uma bateria onde um electrodo se torna carregado relativamente a um electrolito. A espessura da dupla camada eléctrica é muito pequena, cerca de 1 mm na atmosfera normalmente ionizada. A camada dupla pode ser representada como contendo linhas de campo, as quais conectam cada ião negativo capturado da superfície da terra com um excesso de iões positivos deixado na atmosfera. Como a convexão e as perturbações dispersam o excesso de iões positivos para elevações mais altas as linhas de campo estendem-se aumentando o potencial com a altitude. O resultado é a criação de um campo eléctrico o qual seguirá um padrão completamente ditado pelos mecanismos de mistura e difusão na atmosfera. O valor do campo da superfície da terra igualará o potencial electroquímico dividido pela espessura da dupla camada ( $0,25 \text{ volts/mm} = 250 \text{ V/m}$ ) o qual está de acordo com as medições. Salvo algumas excepções (Griffiths e Vonnegut 1975, Moore e Vonnegut 1977 e Willet 1980) não têm sido feitas sérias críticas ao mecanismo de carga electroquímico talvez porque é uma teoria relativamente nova. Os investigadores referidos acima crêem que é o mecanismo de contacto, de que falaremos a seguir, o responsável pelos resultados reportados pelo autor, em vez do electroquímico, e que um tal mecanismo de carga é muito insignificante para representar tão importante parcela na electricidade atmosférica (Wahlin, 1989).

O processo electroquímico pode possivelmente explicar o efeito de imagem-espelho se se considerar que a relação entre a concentração de iões positivos/negativos perto do solo é influenciada pelo forte campo eléctrico debaixo da nuvem. Assim, uma carga positiva na superfície da terra, induzida pela forte carga negativa abaixo da nuvem, deverá atrair e remover parte da população de iões negativos perto da superfície. O resultado deverá ser uma relação maior entre a concentração de iões positivos/negativos a níveis mais baixos.

## 2.9 - Como pode a alteração climática influenciar o sistema eléctrico?

Um trabalho de Williams (1994), sugere que o relâmpago produzido por tempestades tropicais está relacionado, dum modo não linear, com a temperatura de superfície. Baseado em evidências empíricas que a temperatura do termómetro molhado mais elevada pode associar-se a um aumento no CAPE-Convective Available Potential Energy, a nuvens maiores, e a nuvens de gelo mais alta, Williams argumenta que um aumento na temperatura de superfície conduzirá por último a mais relâmpagos. Os seus resultados sugerem aumentos nos relâmpagos de 10% por 1°C de aumento na temperatura de superfície. Esta sensibilidade tem o seu máximo nos trópicos (Harrison, 1997).

Os raios contribuem para a fixação de azoto na atmosfera e assim indirectamente regulam os níveis de ozono troposférico. Um estudo recente por Toumi 1996 sugere que o duplicar de raios pode levar a um aumento de 20% de ozono nos trópicos, com um forçamento radiativo médio associado de +0,1 W.m<sup>-2</sup>. Outro possível feedback climático positivo é através do aumento de raios na iniciação de incêndios florestais e o dióxido de carbono gerado pela sua combustão (Harrison, 1997).

Uma propriedade fundamental do circuito eléctrico global atmosférico é o tempo de relaxamento a várias altitudes, o qual é definido como o tempo que a corrente eléctrica demora a ajustar-se a 1/e do seu valor final após ser subitamente aplicado, um campo eléctrico assumindo que a condutividade permanece constante.

A grandes altitudes, perto dos 70 km, o tempo de relaxamento é de cerca de 10<sup>-4</sup> s, aumentando com o decréscimo de altitude de cerca de 4 s perto dos 18 km e de cerca de 5-40 min perto da superfície da Terra.

O tempo de relaxamento eléctrico da superfície da Terra é de cerca de 10<sup>-5</sup> s.

O valor máximo de cerca de 40 min na atmosfera perto da superfície da Terra é o tempo característico que o circuito global deveria tomar para descarregar se toda a actividade das tempestades cessasse de repente. Nenhuma medição mostrou nunca uma completa ausência de campo eléctrico de bom tempo para nenhuma duração de tempo, sugerindo, deste modo, uma contínua operação das tempestades e de outros geradores mantendo o fluxo de correntes no circuito global.

Para variações de tempo mais longas que cerca de 40 min uma aproximação quase estática pode ser aplicada quando se modela as propriedades eléctricas do circuito global. (Rycroft and Israelsson, 2000).

Ogawa (1985) tem considerado um circuito equivalente simples para a atmosfera mostrado na figura 11. Com R<sub>1</sub> sendo o resistor de carga, R<sub>2</sub> a resistência do gerador tempestade onde existe diferenças de potencial de cerca de 100 MV entre o topo positivamente carregado da nuvem de trovoadas e a base negativamente carregada, e R<sub>3</sub> a resistência da camada limite da atmosfera, todos eles muito maiores que r, a resistência da atmosfera de bom tempo, segue-se que:

$$I = R_2 I_0 / (R_1 + R_2 + R_3).$$

Esta equação representa a corrente através da atmosfera de bom tempo, I, para a corrente no gerador tempestade, I<sub>0</sub>.

É claro que R<sub>1</sub> e R<sub>3</sub> são particularmente importantes nesta relação; R<sub>3</sub> pode ser reduzido significativamente pelas descargas pontuais devido ao vasto campo eléctrico

debaixo da tempestade, na região das correntes de ar ascendentes e pelo aumento da altura da superfície do solo acima do nível médio do mar.

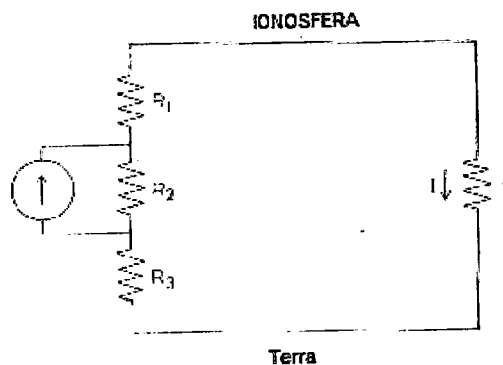


Fig. 11 - Modelo do circuito eléctrico global (Ogawa, 1985)

Deste ponto de vista, medições de  $I$  num observatório a alta altitude (montanha) longe das tempestades activas pode dar alguma informação de  $I_0$  se  $R_1$  e  $R_2$  forem consideradas constantes.

O circuito eléctrico global é ainda hoje encarado como um dos problemas fundamentais da ciência, continuando a suscitar o interesse da comunidade científica na procura de respostas a questões tão essenciais como a electrificação das nuvens. Permanecem ainda muitas questões por explicar, resta-nos, no âmbito deste trabalho analisar as várias teorias que têm vindo a ser propostas comparando-as tanto os seus argumentos mais fortes como as suas fragilidades.



### 3 - TEORIAS DE ELECTRIFICAÇÃO

No capítulo anterior foi revisto o circuito eléctrico global e de como a partir dos vários processos de ionização surgem iões na atmosfera, que transportam carga. De como essas cargas tendem a separa-se na atmosfera originando o campo eléctrico, surgindo então as correntes eléctricas que fecham o circuito (fig. 13).

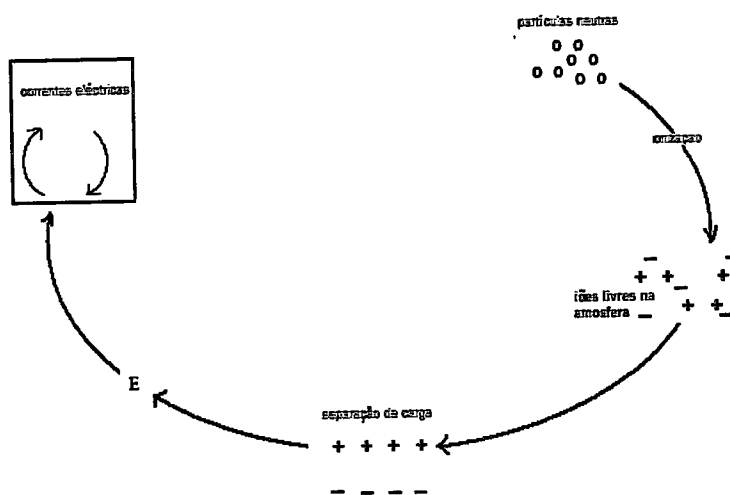


Fig. 13 - A fenomenologia do circuito eléctrico global.

Os processos eléctricos na atmosfera surgem de efeitos combinados entre a ionização natural e campos eléctricos naturais, gerados indirectamente pela separação de cargas nas nuvens de tempestade.

Nas regiões de bom tempo, que deve provavelmente constituir a maioria da área global de nuvens, os processos eléctricos não originam os vastos campos eléctricos associados às tempestades, mas partículas de aerossóis microscópicos adquirem cargas por difusão de iões moleculares formados por ionização. Deste ponto de vista o efeito de pequenas cargas em partículas de aerossóis e gotas é considerável (Harrison, 2001).

No momento actual muito ainda se desconhece sobre electricidade atmosférica e a sua origem. Que mecanismos são responsáveis pela electrização e crescimento das nuvens e o que mantém o campo eléctrico de bom tempo. Como é a carga escoada de uma nuvem ou como o relâmpago influencia as inúmeras gotas carregadas na nuvem. Como se mantêm as cargas separadas, de onde vem a energia que mantém o circuito carregado. Estas são ainda questões válidas e a razão porque a electricidade atmosférica é um dos maiores desafios no campo da ciência de hoje (Wahlin, 1989).

Até agora não há um conhecimento satisfatório dos vários mecanismos que se pensa causarem a electrificação da nuvem. No entanto, tem sido acumulada uma vasta informação sobre tempestades (Vonnegut, 1994). Neste capítulo vamos tentar compreender quais os processos envolvidos na electrificação de uma tempestade, apresentando e analisando as várias teorias que tentam explicar estes fenómenos.

O cerne deste trabalho incide na parte esquerda do circuito global: a parte convectiva do circuito global, onde ocorrem as tempestades.

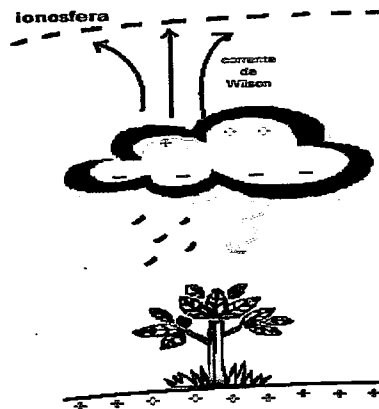


Fig. 14 - Parte convectiva do circuito eléctrico global.

### 3.1 - Breve abordagem histórica

Antes da descoberta da electricidade, era obviamente impossível saber que a atmosfera da Terra é percorrida por correntes eléctricas e que os relâmpagos são uma forma de electricidade. Civilizações antigas atribuíam este fenómeno à ira dos Deuses. Já no século VI a.C, o grego Tales de Mileto notou que o âmbar, ao ser friccionado, adquiria a "estranha" propriedade de atrair objectos leves. Parece ter sido a primeira observação de uma atracção electrostática. Após vários séculos, William Gilbert (1544-1603) retomou a mesma experiência de Tales, acrescentando que a propriedade do âmbar era comum a várias outras substâncias. Gilbert chamava-lhe fenómeno eléctrico, derivação da palavra elektron, que significa âmbar em grego.

Pensa-se ter sido o inglês William Wall (1708) a primeira pessoa a sugerir uma relação entre a electricidade e o relâmpago. Ele reparou que a faísca que saía de um pedaço de âmbar eletrizado assemelhava-se muito à descarga de um relâmpago.

Muitos mais cientistas questionaram a natureza do relâmpago, reconhecendo a sua similaridade com os raios produzidos em laboratório.

Benjamin Franklin (1706-1790) destacou-se nesta área, com experiências cheias de imaginação, embora com poucos recursos. Já na época Franklin descreve como o "fluido" eléctrico é atraído por condutores pontiagudos, surgindo assim a ideia do pára-raios. O pára-raios, pelos seus aspectos teóricos e práticos, foi a coroa de glória dum homem incansável, com uma vida cheia de participação activa no mundo da sua época, nos mais variados domínios, tendo sido o primeiro americano reconhecido internacionalmente no domínio da Ciência.

Na sequência dos seus estudos, Franklin avança a hipótese, inovadora na época, das nuvens estarem carregadas de electricidade, sendo os raios das trovoadas um fenómeno eléctrico.

Em 1751 muitos dos seus apontamentos foram publicados em Inglaterra em forma de livro e logo traduzidos em Francês pelo naturalista D'Alibart, que de tão intrigado que estava com estas experiências, decidiu testá-las ele mesmo, demonstrando que a sugestão de Franklin estava certa, conseguindo provar com sucesso que as nuvens de trovoadas são na verdade electricamente carregadas, e que os relâmpagos eram portanto um fenómeno eléctrico.

Na América, umas semanas depois, Franklin sem saber do sucesso de D'Alibart, realizou a sua famosa experiência com um papagaio de papel. Era uma experiência de um homem pobre, simples e brilhante, que não desistia apesar da ausência de incentivos financeiros. Usou um papagaio pois este atingia maiores altitudes e poderia ser usado em qualquer lado. Ligou um fio de seda ao papagaio e colocou uma chave na outra extremidade e ligada à terra. A aproximação duma trovoadas permitiu-lhe verificar que as nuvens estavam carregadas de electricidade, quando pôde comprovar a descarga recebida e que lhe permitiu carregar uma garrafa de Leyden.

Franklin continuou o seu estudo sobre a natureza da electrificação das tempestades conseguindo determinar que a base das nuvens de tempestade era negativa.

É interessante notar que Franklin já falava de electricidade positiva e negativa. Franklin via a electricidade como um fluido, onde um corpo tanto podia ter excesso como défice de fluido. Um défice ou perda de fluido representava um estado menos (-) e o excesso de fluido o estado mais (+). A soma da electricidade positiva e negativa era sempre neutra, assim, nos corpos onde não se observavam os efeitos da electricidade, o tal fluido encontrava-se em quantidade normal (o corpo estava no *estado neutro*).

Uma consequência actual da teoria de Franklin é a convenção de marcar a direcção da corrente eléctrica. Apesar de nos metais a carga ser transportada pelos electrões fluindo do *menos* para o *mais*, somos agora forçados a admitir que a corrente eléctrica ou a carga flui do *mais* para o *menos* de modo a manter as coisas algébricamente consistentes.

### 3.2 - Desenvolvimento eléctrico de uma nuvem de tempestade

A nuvem de tempestade é a primeira fonte de energia no fenómeno eléctrico da atmosfera (Chalmers, 1967).

Num dia quente de céu limpo o calor é absorvido pela superfície da Terra originando vapor de água e ar quente que sobe aos níveis superiores da atmosfera. O poder de uma tempestade reside na quantidade de vapor de água presente. A energia latente do vapor de água é a chave na formação e electrificação da tempestade (Wahlin, 1989).

Ao evaporar a água retira calor à superfície de contacto, a uma taxa de cerca de 540 calorias ou 2250 joules por grama. Quando a água condensa para formar gotas, liberta-se a mesma quantidade de energia, na forma de calor. A nuvem de tempestade começa



com a formação de uma pequena nuvem cumulo de bom tempo, aparentemente não diferente de todas as outras nuvens à volta. Como as suas vizinhas, forma-se quando o ar húmido e quente sobe numa corrente ascendente e arrefece por expansão adiabática. Quando a humidade relativa aumenta e excede a saturação, a humidade condensa para formar as pequenas gotículas que constituem a nuvem visível (fig. 15) (Vonnegut, 1994).



Fig. 15 - Nuvem cúmulo. Primeira etapa no processo de formação de uma nuvem de tempestade com uma única célula.

A electrificação já está presente durante o primeiro estado da formação da nuvem de bom tempo, embora os campos eléctricos à volta e dentro da nuvem não sejam muito elevados (fig. 16). São originados pela sobreposição do campo eléctrico de bom tempo produzido pela carga positiva no ambiente atmosférico e do enriquecimento do espaço de carga na camada da superfície de ar que é advectada na nuvem. Na maioria dos casos o campo eléctrico na nuvem e abaixo dela é na direcção do tempo bom (negativo ou descendente). Acima e dentro da parte superior da nuvem normalmente positiva é na direcção anti bom tempo (positivo ou ascendente) (Vonnegut, 1994).

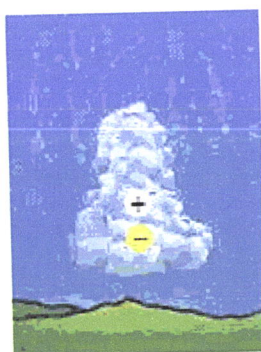


Fig. 16 - Nuvem de tempestade com uma única célula no estágio de desenvolvimento.

Devido ao facto de o ar que circunda a nuvem ser condutor, pequenas correntes eléctricas da ordem dos microamperes fluem para a nuvem positivamente carregada trazendo iões negativos para a superfície superior da nuvem. Nos primeiros estágios de desenvolvimento da nuvem não há grande alteração na composição, concentração ou dimensão das pequenas gotículas que compõem a nuvem. Os campos eléctricos e as correntes eléctricas causam um pequeno fluxo restante.

Muitos cúmulos de bom tempo nunca crescem muito. Eles apenas se formam, crescem um pouco, regridem, evaporam-se e desaparecem. São os excepcionais cumulos de bom tempo que sobrevivem e se desenvolvem para se tornar uma tempestade. Talvez por casualidade, ou por condições meteorológicas favoráveis, estas nuvens crescem mais que as vizinhas e começam a desenvolver-se para uma tempestade. O seu volume aumenta rapidamente e a sua energia eléctrica também. A intensidade da convecção aumenta enormemente e a nuvem torna-se muito mais activa que as suas vizinhas (Vonnegut, 1994).

Durante a condensação o calor latente libertado aquece o ar em volta, que subirá mais (o efeito do balão de ar quente) ainda, obrigando à entrada de mais ar húmido na base para ocupar o seu lugar. Inicia-se uma reacção em cadeia quando ar húmido é alimentado em baixo bombeando mais e mais energia para dentro da nuvem na forma de calor e convecção (Wahlin, 1989).

Uma nuvem pode crescer até 20 km de altura em colunas muito estreitas. As correntes ascendentes podem atingir velocidades de 30 m/s. Cada coluna tem uma média de tempo de vida de 30 minutos. Uma célula atinge a altitude máxima no estágio maduro, no momento em que a nuvem aplanada e forma a típica bigorna (fig. 17). O plano superior da nuvem ocorre quando esta atinge a estratosfera, ou seja, a zona da atmosfera onde as temperaturas começam a aumentar com a altitude, obrigando a nuvem a evaporar outra vez.

No estágio de crescimento de uma nuvem as gotas aumentam de tamanho à medida que atingem níveis superiores e eventualmente tornam-se pesadas o suficiente para vencer as velocidades ascendentes da convecção. Neste ponto a chuva ou a precipitação começa a cair e a célula atinge o seu estágio de dissipação. A latitudes maiores a precipitação atinge sempre temperaturas de congelamento, forma-se cristais de neve, gotas de chuva, graupel, que frequentemente caem e atingem o solo antes da fusão. Esta precipitação fria arrefece o ar na célula que se torna então pesado e começa a descer também. Este ar frio mais pesado pode originar consideráveis correntes descendentes, que ao atingir o solo fornecem uma corrente externa de ar frio (sensação de alívio que muitas vezes se sente após um dia de calor) (Wahlin, 1989).

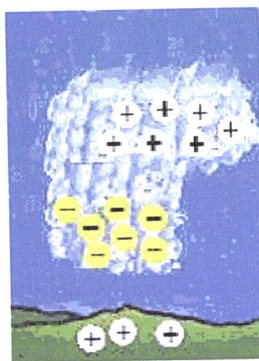


Fig. 17 - Nuvem de tempestade no estágio maduro, apresentando dois centros de cargas eléctricas.



Durante este período o campo eléctrico da nuvem pode súbitamente começar a aumentar exponencialmente. Isto indica o crescimento de uma região de carga negativa na parte da baixo e de carga positiva na parte de cima da nuvem (fig. 17). Sob a influência deste grande aumento do campo eléctrico, as correntes de condução externa que fluem para a nuvem crescem de microamperes para amperes. Mais, à superfície da terra abaixo da nuvem o campo eléctrico torna-se suficientemente intenso para produzir correntes de descarga pontual na vegetação e noutros pontos elevados, os quais conjuntamente podem equivaler a um ampere. Finalmente a intensidade dos campos eléctricos atingem tais valores que provocam a quebra de rigidez dieléctrica na nuvem. Isto inicia a descarga dos raios, entre nuvens, ou nuvem-solo. (Vonnegut, 1994).

Quando ocorrem as correntes descendentes e a precipitação, a célula está no seu estado de dissipação (fig. 18).

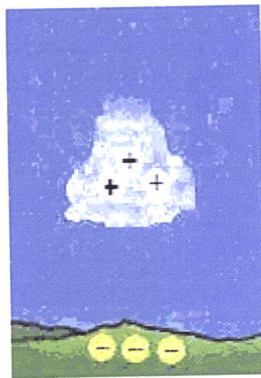


Fig. 18 - Nuvem de tempestade no estágio dissipativo. Neste estágio apenas permanecem cargas positivas na nuvem.

Normalmente o estado electrificado da nuvem mantém-se por muitos minutos por regiões carregadas equivalente a dezenas de coulombs, positivo no topo e negativo na parte de baixo da nuvem. Estas cargas são responsáveis por causar raios que transferem cerca de 10C de carga em intervalos de 10 segundos, tanto entre nuvens como nuvem-solo. Correntes de condução acima da nuvem e correntes de descarga de coroa abaixo continuam a transferência de carga do ambiente para a nuvem (Vonnegut, 1994).

Depois de uma nuvem se tornar electrificada, outra nuvem electrificada semelhante pode desenvolver-se na vizinhança. Isto produz descargas nuvem-solo adicionais e correntes externas da mesma polaridade. Por vezes agregações destas nuvens deslocam-se por muitas horas continuando a produzir principalmente, se não exclusivamente, raios nuvem-solo negativos. Esta predominância de raios negativos para o solo é reflectida nos números do National Lightning Detecting Network, que mostra que os 10 milhões anuais de raios nuvem-solo nos Estados Unidos, cerca de 95% são de polaridade negativa (Demerjian et al., 1992).

O excepcional meio milhão de raios que anualmente trazem carga positiva para o solo têm duas origens. Muitos são produzidos pelas vulgares tempestades que originam raios de ambas as polaridades. Outros, contudo, são produzidos pelas raras tempestades que originam apenas raios positivos nuvem-solo. Por estas nuvens não serem frequentes há poucas observações detalhadas das condições meteorológicas ou eléctricas sob as quais

se desenvolvem. Não foram ainda notadas diferenças meteorológicas significativas que possam explicar estas nuvens pouco comuns. Devido às poucas medidas eléctricas de bom tempo disponíveis em regiões onde as nuvens que produzem raios positivos nuvem-solo se formam, é pouco evidente se o desenvolvimento eléctrico muito precoce destas nuvens anómalas é diferente das normais tempestades descritas antes. A única informação disponível sobre este tema é a fornecida pelas experiências de Moore et al. (1986) em que foi introduzido deliberadamente num cumulo em crescimento carga negativa. Esta nuvem desenvolveu-se com um topo negativo e consequentemente produziu raios nuvem-solo positivos. Outra possibilidade pode ser fornecida pelas tempestades geradas pelo fogo florestal relatado por Latham (1991), que produziu só raios positivos nuvem-solo. Com base nas experiências de Volta (1782) mostrando que uma chama liberta carga negativa, presume-se que o crescimento da nuvem acima do fogo deva ter recebido carga negativa superiormente (Vonnegut, 1994).

Após a electrificação ter começado numa simples célula e outras células se terem formado e se tornado electrificadas também o sistema nuvem se torna complexo. Linhas e agrupamentos de tempestades activas podem formar-se, por vezes dividirem-se, por vezes unindo-se, e outras vezes desaparecendo (Demerjian et al., 1992). Na maioria das vezes estes complexos produzem quase sempre raios nuvem-solo negativos (Vonnegut, 1994).

Após a nuvem de tempestade se dissipar, apenas permanece a bigorna na forma de nuvens cirrostratus e altostratus (Fig. 19).



Fig. 19 - Nuvem de tempestade dissipada.

A energia de uma tempestade é determinado pela quantidade de vapor de água presente. Tipicamente, uma célula simples contém  $8 \times 10^8$  kg de água (Israel, 1973) do qual cerca de 60% é convertida em calor e precipitação. A energia total dissipada por uma célula é portanto  $1,4 \times 10^{14}$  joules por célula. Se a média de tempo de vida de uma célula é de 30 minutos então o poder médio por célula iguala  $7,8 \times 10^{10}$  watts. Como é estimado cerca de 2000 tempestades activas simultâneamente à volta da Terra, então a energia total dissipada é  $1,6 \times 10^{14}$  watts, o que representa cerca de 0,1% da energia que atinge a superfície da Terra vinda do Sol (Wahlin, 1989).

Israel (1973) apresenta o valor  $1,7 \times 10^{13}$  joules de energia eléctrica de uma tempestade.



A troposfera (baixa atmosfera) mostra variações de temperatura e conteúdo de água, e repartição da concentração de água entre os estados líquido, sólido e vapor crítica para a formação e distribuição das nuvens.

Em adição à variabilidade na temperatura e humidade, há uma variabilidade considerável nos tamanhos e abundância de partículas de aerossóis e gotas presentes na atmosfera.

A concentração de vapor de água no ar pode ser determinada pela sua pressão gasosa parcial e a dada temperatura há um valor máximo associado de pressão parcial devido ao vapor de água, a pressão de saturação de vapor.

Humidades relativas ligeiramente maiores (supersaturações) podem ocorrer em regiões localizadas, mas elas nunca são muito superiores a 100%, devido à abundância de partículas de aerossóis nas quais a água pode condensar. Diferentes tipos de partículas de aerossóis são capazes de actuar como núcleos de condensação. Abaixo de 0°C contudo gotas de água líquida podem persistir sem congelar (sobrefusão). Qualquer gota de água líquida com uma temperatura abaixo de 0°C está num estado termodinamicamente instável no qual o congelamento pode ser imediatamente iniciado por nucleação homogénea e heterogénea (Harrison, 2001).

A distribuição das cargas numa nuvem de tempestade depende dos processos mencionados e pode ser descrita, de forma simplificada, como uma estrutura tripolar (fig. 20). Basicamente existem dois centros principais de carga: um positivo, mais ou menos espalhado na parte superior da nuvem, até perto do topo; e outro negativo, concentrado na camada horizontal em que a temperatura se mantém perto de -10°C. Mas existe um terceiro centro menor e também positivo, junto à base da nuvem. Durante muito tempo o centro menor foi associado à captura, pela nuvem, de iões positivos presentes na atmosfera debaixo dela. Actualmente crê-se que tem a sua origem no processo termoeléctrico.

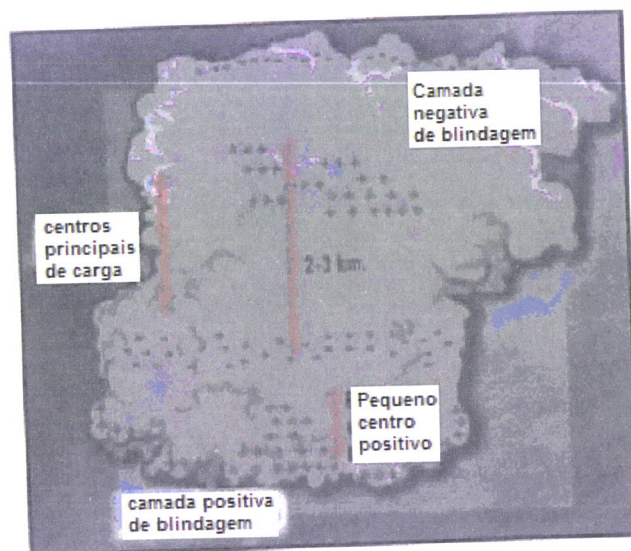


Fig. 20 - Estrutura eléctrica de uma nuvem de tempestade, com os três centros de cargas e as camadas de blindagem.



Geralmente a carga eléctrica dos centros principais é da ordem dos 30 Coulombs e a carga do centro menor, de cerca de 5 Coulombs. As altitudes em que eles se localizam variam de acordo com a latitude geográfica, e são maiores em regiões mais quentes. Além destes 3 centros, observam-se camadas finas de cargas, conhecidas como camadas de blindagem, nos bordos superior e inferior da nuvem, formadas a partir da captura de iões atmosféricos. Tais camadas reduzem parcialmente os campos eléctricos da nuvem quando são observados desde o seu exterior. Dentro de uma nuvem de tempestade o campo eléctrico pode alcançar valores da ordem de centenas de milhares de volts por metro. No solo, debaixo de essas nuvens e por influência delas, o campo pode alcançar cerca de 10000 volts por metro, valor 100 vezes maior que os das zonas sem nuvens.

As nuvens de tempestade isoladas podem produzir durante a sua existência até algumas centenas de relâmpagos. Geralmente ocorrem entre 1 a 4 relâmpagos até ao solo por minuto. A distância média entre o lugar da queda de dois relâmpagos de uma mesma nuvem é de 3 km e varia desde poucas centenas de metros a algumas dezenas de quilómetros (Pinto and Pinto, 1998).

A carga negativa presente numa fina camada envolvendo a parte superior da nuvem de tempestade, incluindo a bigorna, denomina-se camada de blindagem. Esta carga é produzida pelo aprisionamento de iões negativos, gerados por raios cósmicos na atmosfera, e capturados às partículas da nuvem na sua região superior.

### **3.3 - A indução de cargas e a quebra da rigidez dieléctrica**

As cargas distribuídas na base e no topo das nuvens produzem um campo eléctrico interno, denominado campo eléctrico intra-nuvem. Além disso, a acumulação de carga na sua superfície externa pode provocar uma indução electrostática na superfície de outras nuvens ou no solo imediatamente abaixo (apesar das nuvens serem formadas por moléculas de água, portanto isolantes eléctricas, a mobilidade dos seus iões confere-lhes um comportamento semelhante ao de um condutor). Neste caso cria-se um campo eléctrico entre nuvens ou entre a nuvem e o solo.

Enquanto os choques das partículas dentro da nuvem se intensificam, a quantidade de carga na sua superfície aumenta e, conseqüentemente, o campo eléctrico criado por essas cargas também aumenta. Com este aumento da intensidade do campo, as moléculas de ar entre as partes electrizadas sofrem polarização e orientam-se de acordo com o campo eléctrico. O efeito de polarização intensifica-se com o aumento da intensidade do campo, até ao ponto em que os electrões são arrancados às moléculas do ar. O ar, agora ionizado, transforma-se então num condutor gasoso. Genéricamente, o valor do campo eléctrico que provoca a ionização num meio é denominado rigidez dieléctrica desse meio.

No ar, a rigidez dieléctrica varia com as condições da atmosfera. Quando o campo eléctrico ultrapassa este valor limite, diz-se que houve uma quebra da rigidez dieléctrica do meio. Isso transforma o isolante num condutor. Como consequência, os iões negativos e os electrões livres do ar são atraídos fortemente pelas cargas positivas presentes nas nuvens ou induzidas no solo, formando um caminho chamado canal condutor. O movimento de cargas negativas no canal condutor pode ocorrer tanto intra-nuvem como entre nuvens ou entre nuvem e solo. Em cerca de 90% dos casos as descargas eléctricas originam-se na base da nuvem, quase sempre electrizada



negativamente. Portanto, em geral, é uma carga negativa que inicia o processo de descarga eléctrica atmosférica.

A quebra de rigidez é causada por um intenso campo eléctrico de cerca de 100-400 kV/m entre duas regiões de cargas opostas, em geral, na parte inferior da nuvem, valor este que excede o campo local para a quebra de rigidez.

A primeira carga a iniciar o movimento descendente da nuvem é a Carga Líder ou Líder Escalonado, devido ao facto de descer em etapas, como os degraus de uma escada, em intervalos de tempo quase uniformes (fig. 21). A certa altura algumas cargas tomam novos caminhos fora do canal principal, criando ramificações em muitos pontos, devido à existência de iões na atmosfera, distribuídos de maneira não uniforme, o que acaba por atrair ou repelir essas cargas para um lugar indeterminado. As bruscas variações de velocidade da Carga Líder produzem uma onda electromagnética de frequência superior à da luz visível, não sendo perceptível ao olho humano. O movimento da Carga Líder é seguido por outras cargas provenientes da base da nuvem criando-se uma corrente eléctrica denominada raio.

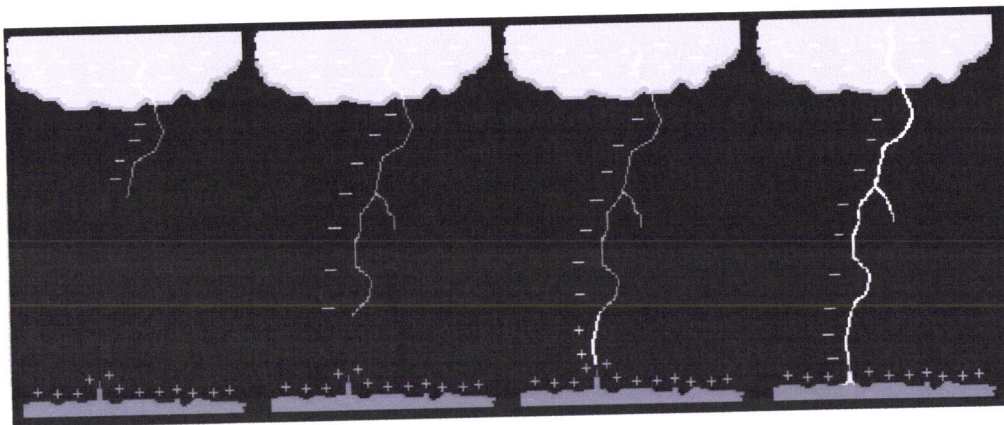


Fig. 23 - Descarga eléctrica.

A Carga Líder, em geral negativa, aproxima-se de cargas positivas localizadas no solo ou noutras nuvens, a carga acumulada no canal condutor produz um aumento na intensidade do campo eléctrico entre as cargas, gerando uma nova quebra da rigidez dieléctrica do ar. Devido ao alto nível de intensidade desse campo, a quebra de rigidez leva a que iões positivos sejam arrancados ao solo (ou à nuvem para onde as cargas negativas se dirigem). Isto explica a afirmação: “na maioria dos casos, a descarga eléctrica ocorre do solo para a nuvem”. A intensificação do campo eléctrico provoca o surgimento de vários caminhos (canais) por onde esses iões se deslocam ao encontro da Líder. Os iões positivos são denominados Líderes Conectantes ou Descargas Conectantes. No caso de descargas nuvem-solo, esse segundo rompimento da rigidez dieléctrica ocorre quando a Líder está cerca de 10 m de distância do local de onde os iões positivos são arrancados. Estas cargas encontram-se aproximadamente a meia distância do percurso. Assim se completa o canal do relâmpago. Todas as cargas negativas que seguem a Carga Líder movem-se através dos novos canais por onde passaram os iões positivos até alcançar os pontos de onde eles partiram. A descarga que



saiu do solo continua o seu movimento até à nuvem e passa a ser denominada Descarga de Retorno, a um terço da velocidade da luz, iluminando o canal e todas as outras ramificações.

A luz do relâmpago é bastante intensa devido à grande quantidade de moléculas excitadas. Pode-se observar que as ramificações do canal são menos brilhantes pela menor quantidade de cargas presentes nessa região. Os fótons produzidos no início da trajetória, apesar de chegarem primeiro à retina do observador, conseguem mantê-la sensibilizada até a chegada dos fótons provenientes do final da trajetória. Por isso, pensamos que o canal se iluminou todo de uma vez ou que o relâmpago *caiu*, vindo de cima para baixo, talvez por colocarmos a nuvem como nossa referência.

### 3.4 - Relâmpagos

Um relâmpago é uma corrente eléctrica muito intensa que ocorre na atmosfera com uma duração de cerca de meio segundo e trajetória típica com um comprimento de 5 a 10 km. É consequência do rápido movimento de electrões, tão rápido que o ar ao seu redor ilumina-se, resultando no clarão que observamos, e aquecendo o ar de tal modo que provoca o estrondo do trovão.

Existem dois tipos de relâmpagos: relâmpagos na nuvem e relâmpagos no solo.

Relâmpagos na nuvem originam-se dentro das nuvens cumulonimbus, normalmente na região onde as gotículas de água se transformam em gelo, e propagam-se dentro da nuvem (relâmpagos intranuvem) ou fora dela, rumo a outra nuvem (relâmpagos nuvem-nuvem) ou por vezes numa direcção qualquer no ar (descargas para o ar).

Os relâmpagos no solo podem originar-se naquela mesma região da nuvem ou em outras regiões dentro da nuvem cumulonimbus (relâmpagos nuvem-solo) ou no solo, abaixo ou perto da tempestade (relâmpagos solo-nuvem). Mais de 99 % dos relâmpagos no solo são relâmpagos nuvem-solo. Relâmpagos solo-nuvem são relativamente raros e, geralmente, ocorrem no topo de montanhas ou estruturas altas, ou podem mesmo ser gerados por foguetes lançados em direcção as tempestades.

Os relâmpagos no solo podem também ser classificados em termos do sinal da carga líder, negativa ou positiva, que inicia a descarga. Cerca de 90 % dos relâmpagos nuvem-solo que ocorrem no nosso planeta são negativos. No entanto, esta percentagem pode mudar em determinadas tempestades. Cerca de 70 % do total de relâmpagos são relâmpagos na nuvem, embora representem a maioria dos relâmpagos são menos conhecidos que os relâmpagos no solo, talvez em parte por serem menos perigosos, em parte por estarem escondidos pela nuvem.

Relâmpagos no solo também podem ser iniciados por líderes positivos descendentes, isto é, líderes positivamente carregados, o que corresponde a movimentos ascendentes de cargas negativas (electrões). A descarga de retorno resultante efectivamente transporta cargas positivas da nuvem para o solo. Neste caso, o relâmpago é chamado de relâmpago positivo.

Durante as duas últimas décadas, relâmpagos nuvem-solo tem sido detectados e mapeados em tempo real em vastas regiões através de sistemas de detecção de relâmpagos. Alguns países, como os Estados Unidos, o Japão e o Canadá, estão completamente cobertos por estes sistemas (Pinto and Pinto, 1998).

Actualmente é possível gerar relâmpagos com pequenos foguetes conectados a longos fios de cobre lançados na direcção das tempestades. Quando o foguete é lançado, o fio preso a ele é desenrolado criando um caminho condutor por onde o relâmpago se propaga. Esta técnica permite medir os campos eléctricos e magnéticos muito próximos do canal do relâmpago.

Também é possível detectar relâmpagos do espaço através de sensores ópticos a bordo de satélites e naves espaciais, no entanto os satélites não conseguem distinguir entre relâmpagos no solo e nas nuvens.

Os relâmpagos mais estudados, pelo seu poder de destruição, são os da nuvem para o solo, divididos em três tipos baseados no sinal da carga transferida: negativos, positivos e bipolares (fig. 22) Nos primeiros as cargas partem da região de cargas negativas da nuvem.

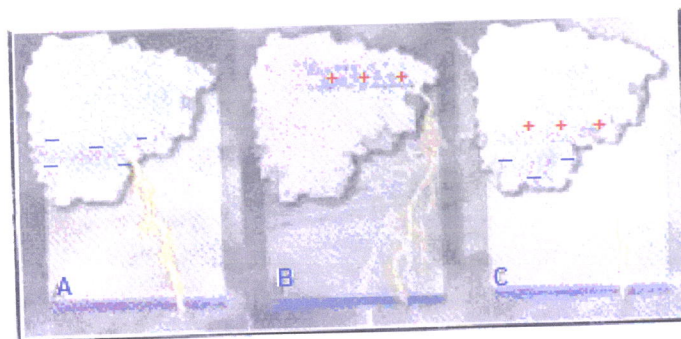


Fig. 22 - A - raios negativos, B - positivos, C - bipolares.

Nos positivos partem da região de cargas positivas, geralmente da mais próxima ao topo da nuvem. Finalmente os bipolares, que apresentam cargas de ambos os sinais, nascem nas regiões de separação de cargas dentro da nuvem. A maior parte dos relâmpagos da nuvem para o solo são negativos: 90% em média. Os restantes são quase sempre positivos já que os bipolares não passam de 1 %. Entretanto a frequência dos relâmpagos positivos parece ser muito variável e em alguns casos até superior aos negativos.

### 3.5 - A electrificação das nuvens

De acordo com a teoria mais aceite, as nuvens electrizam-se a partir das colisões de partículas de gelo acumuladas no seu interior. Outra causa, que não exclui a primeira, baseia-se nos efeitos resultantes da diferença de condutividade eléctrica do gelo devido a diferenças de temperatura no interior da nuvem. Durante as colisões, as partículas de gelo perdem electrões e transformam-se em iões. Isso torna a nuvem electricamente



carregada. As partículas têm tamanho variado e, segundo medidas feitas por sondas meteorológicas, as menores e mais leves ficam com carga positiva e as maiores e mais pesadas (granizo) com carga negativa. Alguns factores como os ventos, a temperatura e força da gravidade fazem com que cargas de mesmo sinal se concentrem em regiões específicas da nuvem. Geralmente a parte inferior, a base da nuvem, e a parte superior ou topo da nuvem, são os locais de maior acumulação de carga, de sinais contrários, funcionando assim como armaduras de um condensador.

### 3.5.1 - Processos micro físicos

Não se conhece exactamente como as nuvens de tempestade se tornam carregadas. A estrutura eléctrica de uma nuvem deste tipo é muito complexa resultando da ocorrência simultânea, no seu interior, de processos macrofísicos (que actuam em escalas de quilómetros) e microfísicos (que actuam em escalas de centímetros ou metros). Em função desses processos são geradas cargas intensas dentro das nuvens, com valores que podem variar de alguns poucos coulombs até centenas de coulombs. Os relâmpagos têm a sua origem nessas cargas.

Diversos processos microfísicos procuram explicar como as colisões das partículas de água e gelo geram as cargas. Há dois processos principais: um está baseado no campo eléctrico da atmosfera, outro na temperatura ambiente.

#### 3.5.1.1 - Os processos indutivo/não indutivo

O primeiro - processo indutivo - sustem que o campo eléctrico de bom tempo, pode separar as cargas pela polarização das partículas grandes (como o granizo). Como o campo eléctrico diminui com a altitude, a colisão de partículas menores (como cristais de gelo) na parte inferior do granizo transfere cargas positivas para tais cristais.

Este processo foi o mais aceite durante muito tempo, mas nos últimos anos experiências de laboratório indicaram que a intensidade do campo atmosférico não é suficiente para que este processo ocorra, pelo menos no período inicial de formação das cargas dentro da nuvem.

O processo indutivo considera que o campo eléctrico tem um papel preponderante sobre a formação de cargas, enquanto o processo não-indutivo considera que outros parâmetros são preponderantes, tais como temperatura, potencial de contacto, tamanho das partículas ou conteúdo de água. É provável que mais do que um parâmetro seja relevante e, também, que diferentes parâmetros devam ser considerados em diferentes casos. Após as partículas carregadas serem formadas, elas são separadas pelo efeito de correntes de ar ascendentes e descendentes e pela acção gravitacional (Pinto and Pinto, 1998).

### 3.5.1.2 - O processo termoelétrico.

O processo termoelétrico assume que a polaridade da carga transferida durante uma colisão depende da temperatura local.

Se ela for maior que a temperatura de inversão da carga, estimada em torno dos  $-15^{\circ}\text{C}$ , o granizo transferiria uma carga negativa ao cristal de gelo. No caso contrário faria-o com uma carga positiva.

Outros processos microfísicos têm sido sugeridos, como aqueles em que a separação de cargas ocorreria na mudança de estado da água a gelo ou dependeria do tamanho das gotas de água em queda dentro da nuvem. Tais processos estão ainda em fase de investigação.

### 3.5.2 - Processos macrofísicos

Os principais processos macrofísicos que podem explicar a distribuição das cargas elétricas nas nuvens são o processo gravitatório e o de convexão. O primeiro (fig. 23) sustenta que a gravidade é o factor mais importante: as cargas associadas às partículas maiores tendem a deslocar-se para a parte inferior e as associadas às partículas menores tendem a permanecer em cima (Pinto and Pinto, 1998).

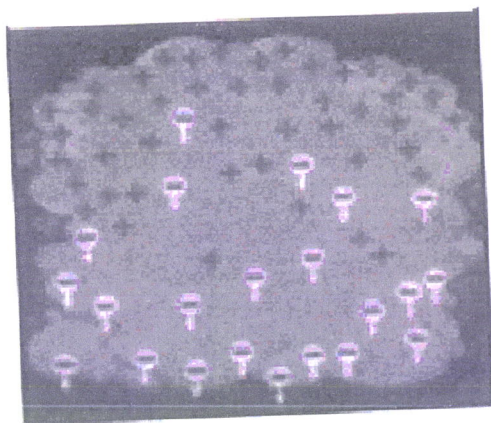


Figura 23 - Teoria gravitatoria. As cargas eléctricas dentro das nuvens de tempestade são separadas pela simples queda das partículas maiores.

O processo de convecção, hoje menos aceite, assume que as cargas internas resultam simplesmente da distribuição das cargas eléctricas existentes na atmosfera, sem a necessidade de considerar um processo dentro da nuvem (fig. 24).

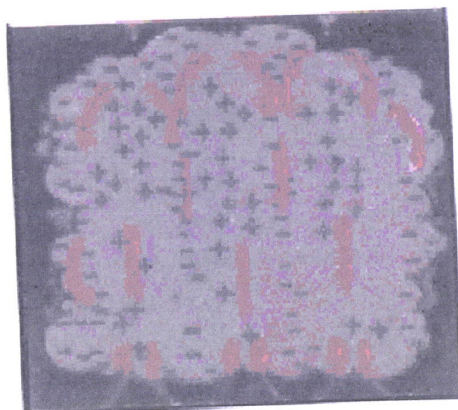


Figura 24 - Teoria da convecção. As cargas eléctricas dentro da nuvem resultam unicamente da distribuição das cargas que existem na atmosfera.

### 3.6 - A teoria de Wilson

Wilson tentou explicar o processo pelo que leva à separação de cargas na nuvem. Uma gota de água no interior de uma nuvem, cai por gravidade, mas encontra-se sob influência de um campo eléctrico de 100 V/m, havendo assim alguma separação de cargas dentro dela. A gota fica polarizada, com a parte de cima negativa e a de baixo, positiva. Na queda, a gota vai encontrando iões, positivos e negativos, que existem na atmosfera. Os iões positivos são repelidos pela gota em queda, e os negativos são atraídos. Deste modo, à medida que cai, a gota vai acumulando cargas negativas, arrastando-as para a base da nuvem e a parte de cima da nuvem fica cada vez mais positiva.

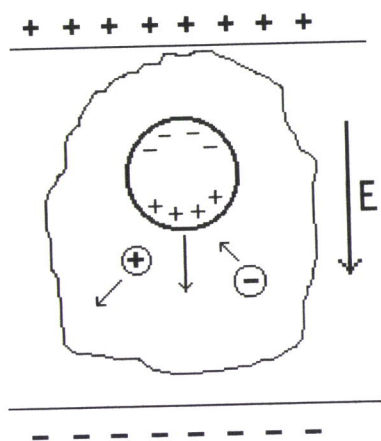


Fig. 25 - Teoria de Wilson - separação de carga numa gota de água.



A lacuna deste modelo é que a carga total envolvida numa nuvem de tempestade é muito grande e, aparentemente, o número de iões disponíveis não é suficiente para justificá-la.

### **3.7 - Um possível novo mecanismo molecular de electrificação das nuvens**

Enquanto os mecanismos de colisão na nuvem são já bem conhecidos, a natureza da carga transferida entre as partículas de gelo não está ainda estabelecida a nível atómico, e nenhuma teoria até agora consegue explicá-la em detalhe. Jungwirth et al. (2005) propõem um novo mecanismo de separação de carga, baseando-se em simulações da dinâmica molecular das partículas e das colisões, levando as cargas individuais a deslocarem-se na forma de iões de sais de uma partícula de gelo para outra.

Em condições normais, quando dominam os sulfatos na nuvem como núcleos de condensação, este mecanismo iónico é coerente com a prevalência de graupels negativos na nuvem. Mas, com escassez de aniões sulfato este mecanismo prevê um desvio em direcção à carga negativa. A dominância de  $\text{SO}_4^{-2}$  como núcleo de condensação mais comum coincide com as observações de que os raios negativos prevalecem em tempestades normais. Este novo mecanismo fornece uma nova maneira de interpretar os resultados de fortes relações entre áreas ardidas e a frequência de raios positivos. É até provável que estas descargas positivas sejam responsáveis pela ignição dos incêndios, já que os raios positivos nuvem-solo são mais energéticos.

### **3.8 - Origem do paradigma da electricidade atmosférica**

Um conhecimento razoável de como a tempestade funciona requiere séries continuadas de investigações para explorar as complexas interrelações deste fenómeno. Até agora o maior esforço tem sido investido em estudos de como a precipitação causa electrificação. Durante um século investigações sobre tempestades tem sido dominada pela ideia que os raios são produzidos pelo processo de separação de carga na nuvem causado pela queda de precipitação. Apesar de algumas aquisições os resultados da pesquisa baseada na teoria da precipitação tem vindo a revelar-se decepcionante. Durante o século vinte, com a descoberta dos raios cósmicos e da ionização que eles produzem no ar acima da nuvem, tornou-se evidente que outros processos, que não envolvem separação de carga por contacto ou queda de precipitação, também podem causar electrificação (Vonnegut, 1994).

O conceito central, no qual se baseia o paradigma, surgiu cedo depois de Franklin (1752) confirmar experimentalmente o que muitos apenas tinham suspeitado, que a nuvem de tempestade é um gerador eléctrico. Quando mostrou que o fenómeno ruído e luz numa nuvem de tempestade era semelhante ao produzido pela electrificação por fricção, era natural assumir que a nuvem gerava electricidade por um processo de separação de carga semelhante.

Uma ideia equivalente e mais popular que se tornou o foco do presente paradigma é que a principal causa de electrificação na nuvem é um processo de separação de carga produzido pelas colisões entre a queda de precipitação e as menores partículas da nuvem. A associação por vezes observada entre a chuva e o raio é tão impressionante



que quase todos os investigadores concluíram sem reservas que a queda de precipitação era a causa da electrificação. Wilson explicava que era por intermédio da precipitação que ocorria a separação de cargas positivas e negativas numa nuvem de tempestade e consequente produção dum campo eléctrico, as maiores gotas de chuva ou pedras de gelo transportam para baixo uma carga de um sinal enquanto a carga de sinal oposto é ligada a pequenas gotas ou partículas da nuvem transportadas para imanas correntes de ar ascendentes (Vonnegut, 1994).

### **3.9 - Elementos do presente paradigma**

Chalmers (1967), Mason (1971), Williams (1988), Gannon (1993), Saunders (1993) e Newcott (1993) mostraram que os elementos do presente paradigma na electricidade atmosférica são os seguintes:

- Os raios são causados pelo processo de separação de carga que tem lugar na nuvem, ela que no início era electricamente neutra.
- O processo de carga dominante responsável pela ocorrência de raios é produzido na nuvem por colisões entre grandes e pequenas partículas. Por este mecanismo, é transferida carga de um sinal para as grandes partículas e carga igual mas oposta para a mais pequenas.
- Quando as partículas de precipitação maiores, e mais rápidas a caírem, se afastam das pequenas resulta um processo de separação de carga a grande escala originando campo eléctricos intensivos e extensivos que eventualmente poderão ocasionar a quebra de rigidez dieléctrica e o raio.
- A energia eléctrica responsável pelo raio é derivada da queda das partículas de precipitação carregadas precipitação sob a influência da gravidade.
- A carga negativa residente na superfície da terra em bom tempo é o resultado da acção de muitas tempestades continuamente em progresso à volta do mundo.
- O fenómeno eléctrico de bom tempo não tem influência significativa na electrificação das tempestades ou em outros fenómenos meteorológicos.
- Excepto para os efeitos químicos produzidos pelo raio, a electricidade das tempestades não tem influência significativa nos processos que ocorrem na baixa atmosfera.
- O efeito do raio é neutralizar as partículas carregadas responsáveis pela electrificação da nuvem.

### **3.10 - Potenciais anomalias**

Desde o início foi assumido que um processo de separação de carga por contacto era o único mecanismo pelo qual as partículas na nuvem se poderiam tornar electrificadas. Durante o último século, contudo, a situação tem vindo a complicar-se com o

reconhecimento de que as nuvens não são uma entidade eléctrica isolada. Descobriu-se que correntes compatíveis com aquelas necessárias para produzir raios fluem do ambiente para a nuvem. Alguns estudos mostraram que sob influência do seu campo eléctrico externo há um fluxo de iões para a nuvem equivalente a 1 ampere. Quando estes iões chegam à nuvem são rapidamente capturados pelas partículas da nuvem, criando assim partículas electrificadas a taxas semelhantes às postuladas no processo de separação de cargas (Vonnegut, 1991). O paradigma não fornece alternativa viável à ideia de que a carga negativa que flui do topo da nuvem é transportada para níveis mais baixos pelas correntes descendentes.

Outra complicação, que tem sido quase sempre ignorada, é o enorme efeito que o raio terá na distribuição de partículas carregadas na nuvem. Até agora tem-se considerado que o raio neutraliza as partículas carregadas responsáveis por causar a electrificação na nuvem. Há estudos que revelam que o raio pode aumentar a população de partículas eléctricas na nuvem acrescentando-as assim ao número de partículas carregadas originadas por outros mecanismos.

Até aqui o paradigma não tem fornecido uma ideia satisfatória da razão porque as nuvens mais altas, rodeadas de ar altamente condutor e em que as suas partes mais elevadas são muito frias para a formação de precipitação, exibem no entanto a maior actividade eléctrica (Uman and Krider, 1989).

Alguns estudos têm mostrado que precipitação sem convecção não é suficiente para a produção de raios revelando a importância da convecção no processo de electrificação. O intenso e complicado movimento de ar na nuvem de tempestade deve desempenhar um papel fundamental nos movimentos das partículas carregadas responsáveis pela electrificação. Até agora o paradigma não tem lidado muito bem com a questão de como os movimentos das partículas carregadas são afectadas pela complicada, convectiva estrutura da nuvem.

A situação que não é fácil de encaixar no paradigma é a observação comum que a chuva forte é muitas vezes acompanhada por pequenos ou nenhuns raios.

Um anomalia pouco comum e negligenciável é a ocasional nuvem de tempestade que produz raios com pouca ou nenhuma precipitação.

Observações continuam a confirmar a descoberta de Franklin que a maioria dos raios nuvem-solo trazem para baixo carga negativa (Demerjian et al., 1992). Tem sido prestada pouca atenção de modo a fornecer uma explicação satisfatória para a predominância de raios negativos.

Um enigma por resolver é o de que apesar da carga negativa central parecer estar localizada na zona de precipitação da nuvem, ela não se estende para baixo no eixo da chuva para posições abaixo da base da nuvem. Mais, algumas observações não são consistentes com a ideia de que a precipitação ao cair transporta carga eléctrica responsável pelo raio. Contudo, o raio normalmente originado na nuvem talvez devido à precipitação electrificada, raramente origina ou termina no feixe visível de precipitação abaixo da nuvem. Os raios nuvem-solo abaixo da nuvem próximo da precipitação parecem ser pouco influenciados por qualquer carga transportada.

Incompreensivelmente a principal preocupação dos investigadores continua a ser as imensas nuvens de tempestade que desempenham o papel principal no processo meteorológico global.

Séculos antes da descoberta de Franklin a associação apertada por vezes observada entre vários fenómenos meteorológicos e raios serviu de base a especulações que a electricidade em certas circunstâncias pode ser uma causa em vez de um efeito.

## 4 - CONCLUSÕES

“Porque e Como se electrificam as nuvens de tempestade.”

Esta questão constitui o cerne do nosso trabalho. É feita uma avaliação de várias teorias que têm surgido ao longo dos últimos anos, na tentativa de encontrar uma explicação consensual e coerente para a questão que permanece ainda hoje por resolver. Não se pretende aqui decidir qual a correcta, mas sim compará-las nas suas vantagens e fragilidades de modo a encontrar soluções no conjunto delas para a questão que tanto tem intrigado a comunidade científica desde sempre.

Observações feitas actualmente continuam a confirmar a descoberta de Franklin que a maioria dos raios nuvem-solo trazem para baixo carga negativa (Demerjian et al., 1992).

No âmbito do circuito eléctrico global foi analisada a primeira teoria proposta por Wilson, e as várias que se seguiram por alguns autores, na tentativa de resolver as lacunas que a teoria de Wilson não conseguia preencher. A origem da densidade de corrente, constantemente presente na atmosfera, ficou conhecida como o problema fundamental da electricidade atmosférica explicada primeiramente por Wilson. Desde então este assunto tem sido alvo de muitos estudos por parte da comunidade científica, entre os quais se destacam Harrison, Kasemir, Ogawa e Wilson, largamente citados neste trabalho, que têm dedicado a sua vida à realização de estudos científicos nesta área contribuindo com pequenas, mas fundamentais, pistas na procura de respostas.

Surge desde logo a questão de como se mantém carregado e quem são os geradores de corrente de alimentação deste circuito. Em resumo podemos actualmente constatar que a radiação cósmica, a ionização que ocorre na ionosfera (fotoionização) e as tempestades constituem os três geradores principais no circuito eléctrico global

É analisado também o modo como as alterações climáticas podem perturbar este sistema eléctrico do ponto de vista em que os parâmetros eléctricos atmosféricos podem constituir bons indicadores das modificações no clima eléctrico planetário.

No momento actual muito ainda se desconhece sobre electricidade atmosférica e a sua origem. Que mecanismos são responsáveis pela electrização e crescimento das nuvens e o que mantém o campo eléctrico de bom tempo. Como é a carga escoada de uma nuvem ou como o relâmpago influencia as inúmeras gotas carregadas na nuvem. Como se mantêm as cargas separadas, de onde vem a energia que mantém o circuito carregado. Estas são ainda questões válidas e a razão porque a electricidade atmosférica é um dos maiores desafios no campo da ciência de hoje

Quanto à questão da electrificação das nuvens apresentam-se algumas teorias que, não respondendo totalmente à questão, pelo menos fornecem pequenos contributos, que representam os passos em frente na procura de resposta.

Tem sido aceite desde sempre que o processo de separação de carga por contacto era o único mecanismo pelo qual as partículas na nuvem se poderiam tornar electrificadas. Durante o último século, contudo, a situação alterou-se com o reconhecimento de que as nuvens não são uma entidade eléctrica isolada.

Tem sido quase sempre ignorada o vasto efeito que o raio terá na distribuição de partículas carregadas na nuvem. Até agora tem-se considerado que o raio neutraliza as partículas carregadas responsáveis por causar a electrificação na nuvem. Há estudos que revelam que o raio pode aumentar a população de partículas eléctricas na nuvem acrescentando-as assim ao número de partículas carregadas originadas por outros mecanismos.

Observações continuam a confirmar a descoberta de Franklin de que a maioria dos raios nuvem-solo trazem para baixo carga negativa (Demerjian et al., 1992). Tem sido prestada pouca atenção de modo a fornecer uma explicação satisfatória para a predominância de raios negativos.

Apresenta-se uma possível nova teoria, muito recente, um possível novo mecanismo molecular de electrificação das nuvens.

Enquanto os mecanismos de colisão na nuvem são já bem conhecidos, a natureza da carga transferida entre as partículas de gelo não está ainda estabelecida a nível atómico,

e nenhuma teoria até agora consegue explicá-la em detalhe. Jungwirth et al. (2005) propõem um novo mecanismo de separação de carga, em que as cargas individuais, na forma de íões de sais, se deslocando de uma partícula de gelo para outra.

Em condições normais, quando dominam os sulfatos na nuvem como núcleos de condensação, este mecanismo iónico é coerente com a prevalência de graupels negativos na nuvem. Mas, com escassez de aniões sulfato este mecanismo prevê um desvio em direcção à carga negativa. A dominância de  $\text{SO}_4^{-2}$  como núcleo de condensação mais comum coincide com as observações de que os raios negativos prevalecem em tempestades normais. Este novo mecanismo fornece uma nova maneira de interpretar os resultados de fortes relações entre áreas ardidadas e a frequência de raios positivos. É até provável que estas descargas positivas sejam responsáveis pela ignição dos incêndios, já que os raios positivos nuvem-solo são mais energéticos.

## BIBLIOGRAFIA

- Adlerman, E. J., Williams, E. R., 1996. Seasonal variation of the global electrical circuit. *Journal of Geophysical Research*, 101, n° D23, 29,679-29,688.
- Appleton, E. V., 1925. Replies to "Discussion on ionisation in the atmosphere." *Proc. Phys. Soc. Lond.*, 37, 48D-50D.
- Bering III, E. A., Few, A. A., Benbrook, J. R., 1998. The Global Electric Circuit, *Physics Today*, 51, 24-29.
- Chalmers, J. A., 1949. *Atmospheric Electricity*. First edition. Oxford University Press. London. Chapter II, XII.
- Chauzy, S., Soula, S. 1999. Contribution of the ground corona ions to the convective charging mechanism. *Atmospheric Research*, 51, 279-300.
- Driscoll, K. T., Blakeslee, R. J., 1996. Comment on "Current budget of the atmospheric electric global circuit" by Heinz W. Kasemir. *Journal of Geophysical Research*, 101, n° D12, 17,037-17,040.
- Ermakov, V.I., Bazilevskaya, G. A., Pokrevsky, P. E., Stozhkov, Y. I., 1997. Ion Balance Equation in the Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 102, n° D19, 23,413-23,419.
- Harrison, R. G., 1997. New Directions. Climate Change and the Global Atmospheric Electrical System. *Atmospheric Environment*, 31, n°20, 3483-3484.
- Harrison, R. G., 2001. *Atmospheric Electricity and Cloud Microphysics*. CERN, Geneva.
- Harrison, G., 2002. Twentieth century secular decrease in the atmospheric potential gradient. *Geophysical Research Letters*, 29, n° 14, 5-1 - 5-4.
- Harrison, G., 2003. Reply to Comment by E. R. Williams on "Twentieth century secular in the atmospheric gradient". *Geophysical Research Letters*, 30, n° 15, 6-1 - 6-2.
- Harrison, G., 2004a. Lon-term measurements of the global atmospheric electric circuit at Eskdalemuir, Scotland, 1911-1981. *Atmospheric Research*, 70, 1-19.
- Harrison, G., 2004b. The global atmospheric electrical circuit and climate. *Surveys in Geophysics*, 25, 441-484.
- Harrison, R. G., Aplin, K. L., 2003. Ions in the Atmosphere. *Atmospheric Electricity*, , 733-738.
- Harrison, G., Ingram, W. J., 2005. Air-eath current measurements at Kew, London, 1909-1979. *Atmospheric Research*, 76, 49-64.
- Hörrak, U., Mirme, A., Salm, J., Tamm, E., Tammet, H., 1998. Air ion measurements as a source of information about atmospheric aerosols. *Atmospheric Research*, 46, 233-242.
- Hörrak, U., Salm, J., Tammet, H., 2000. Statistical characterization of air ion mobility spectra at Tahkuse Observatory: Classification of air ions. *Journal of Geophysical Research*, 105, n° D7, 9291-9302.
- Hörrak, U., Salm, J., Tammet, H. Classification of Natural Air Ions Near the Ground.. ???? artigo
- Imyanitov, M., Chubarina, E. V., 1967. *Electricity of the free atmosphere*. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem.

- Israelsson, S., Tammet, H., 2001. Variation of fair weather atmospheric at Marsta Observatory, Sweden, 1993-1998. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63, 1693-1703.
- Jungwirth, P., Rosenfeld, D., Buch, V., 2005. A possible new molecular mechanism of thundercloud electrification. *Atmospheric Research*, 76, 190-205.
- Kraakevic, J. H., 1961. Measurements of current density in the fairweather atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 66, 3735-48.
- Kasemir, H. W., 1977: Theoretical problems of the global atmospheric electric circuit. In *Electrical Processes in Atmosphere*, Proceedings of the Fifth International Conference on Atmospheric Electricity held at Garmisch-Partenkirchen (Germany), 2-7 September 1974, Darmstadt. H. Dolezalek, R. Reiter (editors), 423-439.
- Kasemir, H. W., 1996a. Reply. *Journal of Geophysical Research*, 101, n° D12, 17,033-17,035.
- Kasemir, H. W., 1996b. Reply. *Journal of Geophysical Research*, 101, n° D12, 17,041-17,043.
- MacGorman, D. R., Rust W. D., 1998. *The Electrical Nature of Storms*. Oxford University Press, chapters 1-4.
- Mason, B. J., 1971. *The Physics of Clouds*. Oxford Monographs on Meteorology. Second edition, chapter 9.
- Mason, J., Mason, N., 2003. The physics of a thunderstorm. *European Journal of physics* 24, S99-S110.
- Ogawa, T., 1985. Fair-Weather Electricity. *Journal of Geophysical Research*, 90, n° D4, 5951-5960.
- Pinto, O. J., Pinto, I. R. C. A., 1998. Tormentas Positivas: Sorpresa en los Cielos Brasileños. *Ciencia Hoy*. Volume 8, n° 44, .
- Pruppacher, H. R., Klett, J. D., 1997. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Kluwer Academic Publishers.
- Reiter, R., 1992. Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity. *Developments in Atmospheric Science* 20. Elsevier Science Publishers. Amesterdam, The Netherlands. Cap. 3 - 5.
- Rycroft, M. J., Israelsson, S., 2000. The Global Atmospheric Electric Circuit, Solar Activity and Climate Change. C. Price. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62, 1563-1576.
- Serrano, C., Reis, A. H., Rosa, R., Lucio P. S., DATA. Variação do campo eléctrico da atmosfera com a meteorologia da região de Lisboa entre 1955-1985. Estudo da influência da Humidade relativa do ar. Universidade de Évora
- Vonnegut, B., 1994. The Atmospheric Electricity Paradigm. *American Meteorological Society*, 75, n° 1, 53-61.
- Vonnegut, B., 1997. Role of cumulus downdrafts in stratosphere-troposphere exchange and in cloud electrification. *Atmospheric Research*, 43, 197-199.
- Wahlin, L., 1989. *Atmospheric Electrostatics*. Colutron Research Corporation. Boulder, Colorado, USA, chapters 1-4.
- Williams, E. R., 1994. Global circuit response to seasonal variations in Global Surface Air Temperature. *Mon. Weather Rev.*, 122, 1917-1929.
- Williams, E. R., 1995. Comment on "Thunderstorm electrification laboratory experiments and charging mechanisms" by C. P. R. Saunders. *Journal of Geophysical Research*, 100, n° D1, 1503-1505.



Williams, E. R., 1996. Comment on "Current budget of the atmospheric electric global circuit" by H. W. Kasemir. *Journal of Geophysical Research.*, 101, n° D12, 17,029-17,031.

Williams, E. R., 2003a. Global Electrical Circuit. *Atmospheric Electricity*, 724-732.

Williams, E. R., 2003b. Comment to "Twentieth century secular decrease in the atmospheric potential gradient" by Giles Harrison. *Geophysical Research Letters*, 30, n° 15, 5-1 - 5-2.

Williams, E. R., Zhang, R., Rydock, J., 1991. Mixed-Phase Microphysics and cloud electrification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, n° 19, 2195-2203.

Williams, E. R., Zhang, R., 1996. Density of rime in laboratory simulations of thunderstorm microphysics and electrification. *Journal of Geophysical Research.*, 101, n° D23, 29,715-29,719.

Williams, E. R., Boldi, B., Matlin, A., Weber, M., Hodanish, S., Sharp, D., Goodman, S., Raghavan, R., Buechler, D., 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmospheric Research*, 51, 245-265.