

Teorias de Eletrificação

Considerações Básicas

- As cargas devem ser inseridas nos hidrometeoros, logo a sua capacidade de se mover sob a ação de uma força elétrica é drasticamente reduzida.
- Cargas de uma polaridade devem se manter isoladas das cargas de sinal oposto ou serem transportadas pelo vento ou gravidade para criarem regiões de cargas resultantes

Características Típicas da estrutura de cargas em tempestades:

- 1 – As cargas negativas usualmente se concentram na parte inferior das tempestades. Tipicamente em temperaturas $T > -25^{\circ}\text{C}$ e às vezes $T > -10^{\circ}\text{C}$.
- 2 – As cargas positivas estão situadas tipicamente acima da região de carga negativa. Evidências experimentais suportam que se concentram na região superior das tempestades e na bigorna (“anvil”).
- 3 – Diferentes polaridades de carga podem existir ao longo de uma região.

4 – Perfis verticais de E_z indicam mais do que 3 regiões de cargas (modelo tripólo).

5 – Camadas de blindagem geralmente existem nas bordas das nuvens, em especial no topo das nuvens.

6 – A maioria dos íons pequenos advectados debaixo das tempestades são produzidos por pontos de descarga, ex: arvores, grama, antenas e etc.

7 – A chuva transporta em geral cargas positivas para baixo da nuvem. As cargas de chuva próximas da superfície são afetadas significativamente pelos íons produzidos pelos pontos de descarga.

Fluxo de Corrente em Tempestades:

- 1 – Correntes a partir do topo da nuvem:
- 2 – Corona ou ponto de descarga:
- 3 – Correntes de Precipitação
- 4 – Relâmpagos
- 5 – Correntes de Maxwell

Correntes a partir do topo da nuvem:

Em 1920, Wilson propôs que o Fluxo de corrente do topo das tempestades para a alta atmosfera adiciona corrente de bom tempo (circuito elétrico global). Esta condução ocorre devido a resposta que os íons pequenos reagem ao Campo Elétrico da carga positiva resultante no topo da tempestade;

Corona ou ponto de descarga:

Corrente de corona é produzida a partir da quebra e ou ionização das moléculas de ar na presença de um Campo Elétrico alto, próximo a pontos condutores abaixo de tempestades (grama, arvores, postes, antenas, etc.)

Correntes de Maxwell

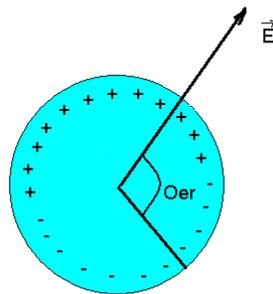
Krider e Massur, 1982, propõe o cálculo do fluxo total de corrente em tempestades a partir das medidas da densidade de corrente de Maxwell.

Mecanismos de carregamento de cargas:

Pode haver a existência ou não de um Campo Elétrico para polarizar os hidrometeoros:

a) *Mecanismo Indutivo*: Sob a ação de um Campo Elétrico os hidrometeoros se polarizam.

Um hidrometeoro não carregado inicialmente, sob a ação de um campo elétrico, pode induzir cargas de polaridade oposta na superfície do hidrometeoro, logo o hidrometeoro torna-se polarizado.



- b) *Mecanismo Não Indutivo*: não precisa de um Campo Elétrico;
- c) *Mecanismo de Captura de Íons*: Íons gasosos são capturados por hidrometeoros;

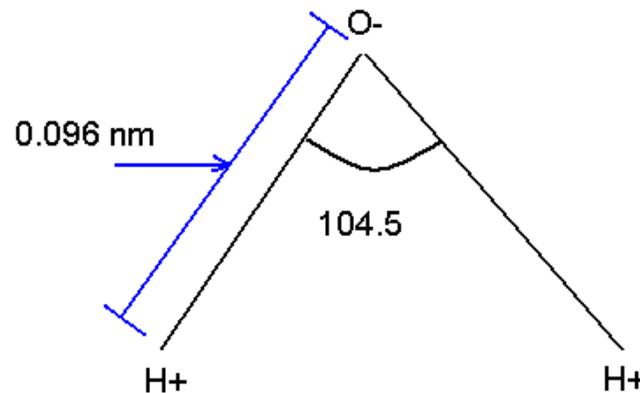
Este processo pode distribuir as cargas de um sinal sistematicamente em diferentes regiões de uma tempestade. Dessa maneira, as regiões afetadas podem ter uma carga resultante sem a necessidade de ter movimentos adicionais no hidrometeoro.

d) *Mecanismo Indutivo de Partícula-partícula*: Interação a partir da colisão de partículas/hidrometeoros ou quebra de pequenas partículas sob a superfície de um hidrometeoro.

Já que cargas iguais e opostas ficam depositadas nos hidrometeoros, temos que a medida que elas interagem e se separam, estas regiões permanecem eletricamente neutras até que os hidrometeoros carregados negativamente começam a se mover dos carregados positivamente. Além disso, as forças de gravidade e empuxo, devem agir para que este mecanismo se torne importante na eletrificação das tempestades. Para ser efetivo, esta hipótese propõe que os hidrometeoros tenham velocidades terminais de queda diferentes (se aproximando da teoria de precipitação).

Propriedades elétricas da água

- A água tem momento de dipolo permanente ($p = 6.18 \times 10^{-30} \text{ cm}$), e é uma molécula polar.
- A distribuição de elétrons implica:
 $q+$ nos núcleos de H e $q-$ no de O_2 .
- A geometria molecular é angular e não linear. Se fosse linear, $P = 0$



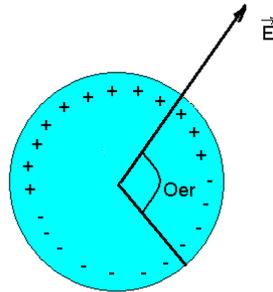
- Sob a ação de um Campo Elétrico, as moléculas se alinham e formam um dielétrico.
- Isto implica em uma redução do Campo Elétrico interno do hidrometeoro e um aumento fora dele.

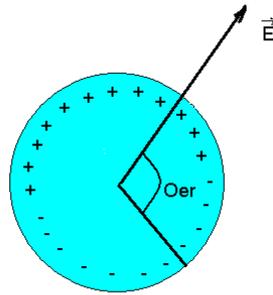
Em dielétricos: as cargas polarizadas se aglutinam

Em condutores: induz-se uma carga na superfície

Como a molécula de H_2O tem um momento de dipolo permanente, um campo elétrico externo tende a alinhar as moléculas, apesar que as agitações térmicas inibam um perfeito alinhamento.

No hidrometeoro, o parcial alinhamento causa um excesso de **q-** na superfície de um lado e um excesso de **q+** no lado oposto da superfície ao longo da direção do campo elétrico. Quando isso ocorre a **molécula** é dita como **polarizada**. Logo no caso da **água**, temos um **dielétrico polar**.





O efeito de polarização é o de reduzir o campo elétrico dentro do hidrometeoro e aumentar fora dele, logo a **densidade de corrente** σ_q induzida na superfície de um condutor esférico sob a ação de um campo elétrico constante é

$$\sigma_q = 3\varepsilon |\vec{E}| \cos \theta_{E,r}$$

Onde $\theta_{E,r}$ é o ângulo formado pelo vetor do campo elétrico a partir da superfície aonde se quer calcular. ε é a constante dielétrica.

Para um dielétrico temos

$$\sigma_q = 3\varepsilon \left(\frac{\varepsilon_{diel} - 1}{\varepsilon_{diel} + 2} \right) |\vec{E}| \cos \theta_{E,r}$$

Mas como $\varepsilon_{dielétrico}$ da água é elevada (x 80), gotas de água são comumente tratadas como condutores quando se considera uma indução de cargas pela presença de uma força elétrica.

Logo

$$\sigma_{qdieletrico} = \sigma_{qcondutor}$$

Se integrarmos a densidade de corrente sobre um hemisfério, temos

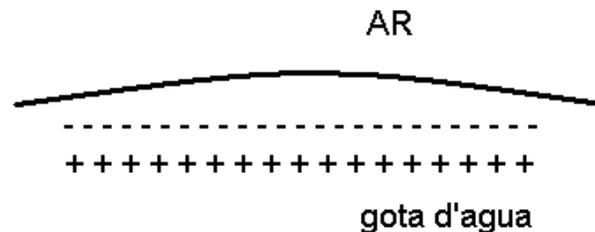
$$q = \sigma_q Area = \int \sigma_q d\theta d\varphi r dr$$

Logo

$$q = 3\pi\varepsilon |\vec{E}| r^2$$

Camada Elétrica Dupla

- Esta hipótese assume que existe uma dupla camada elétrica entre as interfaces da água e o ar, gelo e ar ou gelo e água:



Fletcher (1968, 1962): Termodinamicamente, as moléculas de água orientam-se com seus vértices negativos para fora na superfície da água pura com o ar.

Em termos de superação de cargas entre as gotas, temos que na maior parte delas, mais cargas da região externa são removidas da camada dupla do que as internas.

Portanto existe um excesso de cargas internas que está sendo deixado.

Mecanismos que podem causar a separação de cargas nesta configuração:

- Bolhas de CO₂ no líquido ou no gelo.

Uma bolha emerge para a superfície e se rompe, logo as gotículas que escapam levarão as cargas da parte mais externa da camada, deixando então um excesso de cargas residindo na parte interior.

- 2 superfícies de gelo com diferentes propriedades são esfregadas.

Se uma partícula raspa mais cargas da camada superior do que a camada inferior da outra partícula, uma carga resultante poderá ser transferida da camada externa.

- Em 1860, Faraday sugeriu que a interface gelo-ar agia como se fosse uma camada fina de água quase-líquida sobre uma partícula de gelo. Mais tarde Baker e Dash (1994) sugerem que as partículas iriam trocar material desta camada se a espessura das camadas das 2 partículas fosse diferente, com a massa fluindo da camada mais espessa para a mais fina e a carga poderia ser transferida durante esta troca de massa por causa da camada dupla.
- A massa tenderá a fluir da superfície mais quente para a mais fria, de regiões com curvaturas superficiais altas e de regiões com crescimento de vapor alto para com baixo crescimento ou evaporação.

Efeito termo-Elétrico:

Na água algumas moléculas se separam em Cátions H^+ e Anions OH^- .

Se estes elementos têm diferentes mobilidades, eles terão diferentes taxas de difusão ao longo de um gradiente térmico.

Portanto existirá uma separação de cargas de acordo com o gradiente de temperatura imposto.

Apesar da mobilidade do H^+ ser maior que o OH^- , já que o H^+ tem menor massa, isso não é geralmente aplicado para a água líquida

Na fase líquida, esta mobilidade é muito pequena, entretanto no gelo a mobilidade do Cátion (H^+) é muito maior que a do Anion. (OH^-).

Portanto, se houver um gradiente de temperatura ao longo de um pedaço de gelo, os íons H^+ se difundirão mais rápido para a parte mais fria do gelo, deixando uma resultante de cargas negativas na região mais quente.

Medidas de laboratório indicam que a diferença de potencial ao longo de um gradiente de temperatura pode ser $2\Delta TmV$, onde ΔT é a diferença de temperatura ao longo de dx .

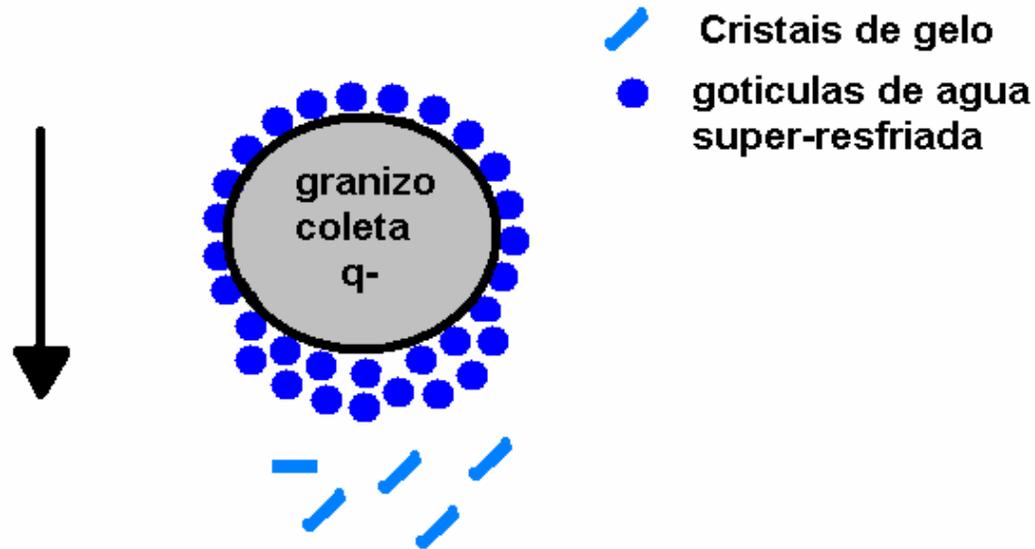
A separação máxima de carga ocorre entre 5 a 10 mili-segundos.

Logo supondo uma diferença de 2°C temos 4 mV .

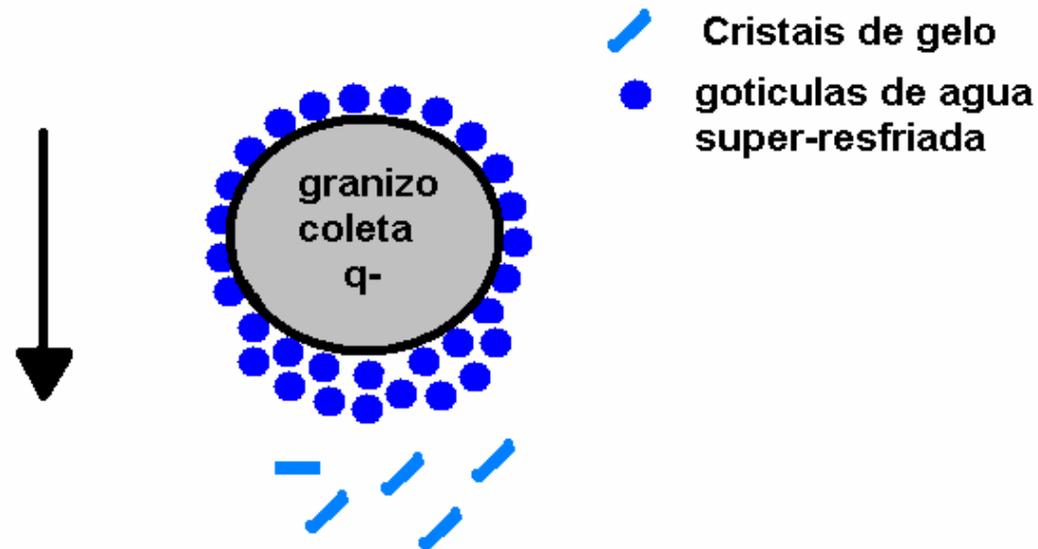
O efeito termo-elétrico no gelo é relativamente demorado para as escalas relevantes para a colisão de partículas e possivelmente não é um fator se as partículas trocam cargas durante a colisão.

Basicamente temos que pensar como um acoplamento, ou seja, efeito termo-elétrico auxiliado pelas colisões. Dessa maneira podemos considerar os dois exemplos a seguir:

a) Considere um granizo e ou um graupel caindo em uma nuvem com água super-resfriada e pequenos cristais de gelo, figura abaixo:



Durante a colisão do granizo com os cristais de gelo, a superfície do granizo estará mais quente que a dos cristais de gelo, porque ocorre liberação de calor latente de congelamento devido ao maior número de gotículas de água super-resfriada que colidem com o granizo.



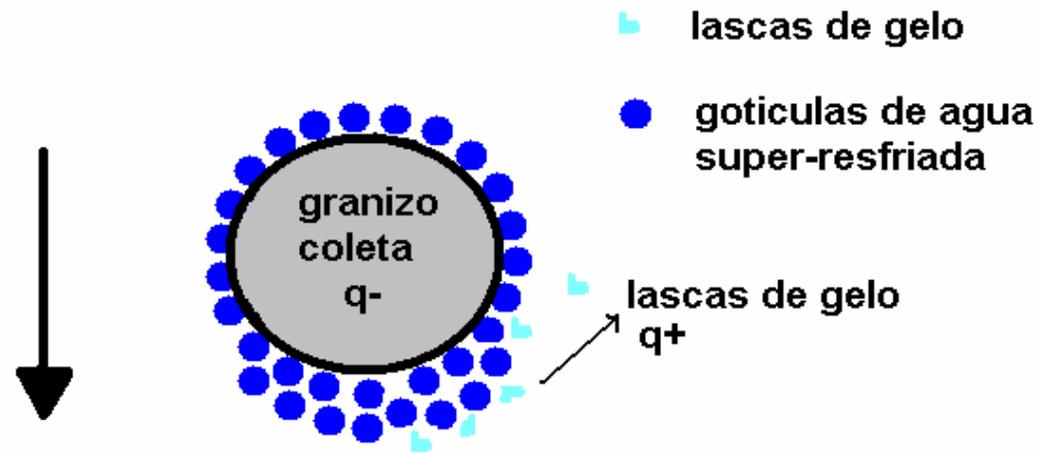
Portanto durante o tempo que o cristal está em contato com a superfície do granizo, o granizo se tornará carregado negativamente e o cristal positivamente (H^+ migrarão para a parte mais fria).

Logo quando os cristais de gelo rebatem do granizo, eles irão reter as cargas positivas e se a velocidade terminal for menor que a velocidade da corrente ascendente do ar na nuvem, eles serão transportados para a parte superior da nuvem.

Por outro lado, os granizos se tornarão negativos e como têm velocidade terminal maior irão para a parte inferior da nuvem.

Este processo pode levar a um carregamento da ordem de $1\text{C}/\text{km}^3\text{min}$.

b) Assumindo granizo precipitando sobre gotículas de água super-resfriada.



Quando gotículas de água super-resfriada se congelam, uma grande quantidade de lascas pequenas de gelo são lançada no ar.

Considere ainda que a gotícula de água super-resfriada ao colidir com o granizo está em uma segunda fase de congelamento sobre a capa superficial do gelo e conseqüentemente está aumentando a espessura para dentro.

A parte interna da superfície desta casca está em contato com a água líquida, logo $T \sim 0^{\circ}\text{C}$ e a externa está se resfriando com a temperatura ambiente, $T \leq 0^{\circ}\text{C}$.

Conseqüentemente existe um gradiente de temperatura alongo desta casca de gelo, o que pelo efeito termo-elétrico irá causar um aumento de q^+ na parte externa da superfície.

Uma vez que as lascas de gelo que se quebram das gotículas vem predominantemente da parte externa da casca de gelo, elas irão carregar as cargas positivas e deixar cargas negativas no granizo.

Deslocamentos da estrutura do gelo:

Buracos ou deslocamentos em gelo com estruturas entrelaçadas ou cruzadas (lattice) criam redes de cargas associadas às moléculas. E

Estes deslocamentos podem mover-se através do gelo, e assim transportar cargas.

A concentração de deslocamento em gelos de congelamento (água super-resfriada que se congela espontaneamente por contato) aumenta com a diminuição da temperatura.

A densidade de deslocamento é pequena para cristais de gelo com crescimento lento.

Finalmente, deslocamentos de cargas positivas podem ser responsáveis pela transferência de cargas durante a colisão de graupel (rimed) e cristais de gelo.

Potencial de Contato:

Processo análogo ao potencial de contato entre 2 metais, ou seja, diferença de potencial e fluxo de corrente entre dois metais.

Sendo que neste caso, diferentes formações de gelo podem criar diferentes potenciais. Por exemplo, cristais de gelo formados por congelamento e não congelamento.

Observações indicam que a superfície do gelo congelado (rimed) tem potencial de contato negativo relativo ao não congelado. A magnitude do potencial de contato aumenta com a diminuição da temperatura para $\sim -200^{\circ}\text{C}$ e depois se mantém estável.

Camada Quase-Líquida

Além da dupla camada elétrica, alguns pesquisadores tais como Faraday (1860) e mais recentemente Baker e Dash (1994) sugeriram que a interface entre gelo e ar é realmente uma camada quase-líquida, mas com característica típica de gelo.

Analogia segue a seguinte fase de transição:

Vapor → Líquido → Gelo

Baker e Dash estudaram a troca de massa (molécula de água) entre partículas com diferentes espessuras na camada quase-líquida. Partículas com camadas superficiais mais expressas devem ter massa para as partículas com uma camada superficial mais fina, ou seja, o transporte pode ser visto como:

Temperatura

$T_{alta} \rightarrow T_{baixa}$

Curvatura

Alta \rightarrow Baixa

Esse raciocínio ainda gera controvérsias:

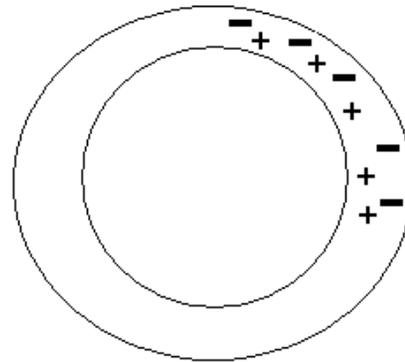
- a) A existência de uma camada quase-líquida;
- b) Espessura da camada líquida com a temperatura;

Exemplo:

Suponha que 2 partículas colidam, sendo que cada uma possui uma camada elétrica dupla, mas com espessuras diferentes, ou seja, camadas quase-líquidas diferentes;

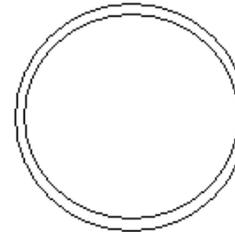
Camada Líquida

Crescimento Rápido

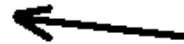


Mais espessa

Crescimento Pequeno



Mais fina



As diferentes espessuras da camada quase-líquida podem ter acontecido devido a forma de crescimento por deposição das partículas. Uma vez que ocorre colisão e separação, as partículas com camadas mais espessas perdem massa para as partículas que crescem devagar, deixando assim para as partículas que crescem mais rápido um excesso de cargas positivas (+).