



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

SÂNZIA NAYARA FERREIRA ALVES DE ARAÚJO

CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL: ASPECTOS BÁSICOS

**CAMPINA GRANDE
2022**

SÂNZIA NAYARA FERREIRA ALVES DE ARAÚJO

CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL: ASPECTOS BÁSICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito à obtenção do título de licenciado em Física.

Área de concentração: Ciências Exatas e da Terra.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni

**CAMPINA GRANDE
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A663c Araujo, Sanzia Nayara Ferreira Alves de.
Circuito elétrico atmosférico global [manuscrito] : aspectos básicos / Sanzia Nayara Ferreira Alves de Araujo. - 2022.
25 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni, Coordenação do Curso de Física - CCT."

1. Campos elétrico atmosférico. 2. Circuito elétrico global.
3. Atmosfera. I. Título

21. ed. CDD 621.319 2

SÂNZIA NAYARA FERREIRA ALVES DE ARAÚJO

CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL: ASPECTOS BÁSICOS

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito à obtenção do título de graduada em Licenciatura Plena em Física.

Área de concentração: Ciências Exatas da Terra.

Aprovada em: 30/11/2022.

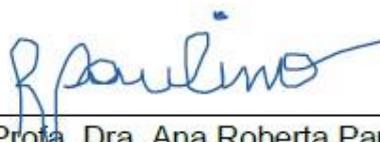
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Lourivaldo Lima Mota
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Ana Roberta Paulino
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	CAPÍTULO I - A ATMOSFERA TERRESTRE	6
2.1	Aspectos da Composição	6
2.2	Estrutura Básica da Atmosfera	6
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1	Fatores que alteram o campo elétrico atmosférico	12
3.1.1	<i>Eventos solares</i>	13
3.1.2	<i>Raios cósmicos</i>	13
3.1.3	<i>Concentração de aerossóis</i>	13
4	INSTRUMENTAÇÃO	14
4.1	Carnegie	14
4.2	Sensores atuais	15
5	CONCLUSÃO	18
	REFERÊNCIAS	19

CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL: ASPECTOS BÁSICOS

RESUMO

Sanzia Nayara Ferreira Alves de Araújo¹

Este trabalho aborda o circuito elétrico atmosférico global e seu objetivo é apresentar conceitos básicos a seu respeito. A metodologia utilizada neste trabalho foi uma pesquisa bibliográfica e para chegar ao objetivo, começamos uma revisão da teoria das camadas da atmosfera na qual se envolve sua formação. Em seguida, fizemos uma pequena revisão sobre circuito elétrico atmosférico global. E por fim, fizemos uma revisão sobre os fatores que afetam o campo elétrico atmosférico. Com base em resultados qualitativos, concluímos que o campo elétrico atmosférico global se mantém por meio de tempestades e nuvens de chuvas.

Palavras-chave: campo elétrico atmosférico; circuito elétrico atmosférico global; atmosfera.

ABSTRACT

This work addresses the global electrical atmospheric circuit and its objective is to present basic concepts about it. The methodology used in this work was a bibliographical research and to reach the objective, we started a review of the theory of the layers of the atmosphere in which its formation is involved. Then, we did a little review on global atmospheric electrical circuit. Finally, we reviewed the factors that affect the atmospheric electric field. Based on qualitative results, we conclude that the global atmospheric electric field is maintained by means of storms and rain clouds.

Keywords: atmospheric electric field; global electrical atmospheric circuit; atmosphere.

¹ Graduanda em Licenciatura em Física pela Universidade Estadual da Paraíba - UEPB
sanzianayara15@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é uma camada de ar formada por vários gases e um pequeno percentual formado por outros gases. Por ela ser uma camada de gases, a lei geral dos gases é aplicável aos estudos atmosféricos.

A atmosfera terrestre pode ser dividida em camadas, e os critérios para suas nomeações são altitude, temperatura e composição. De acordo com o critério baseado na temperatura, a troposfera é a primeira camada da atmosfera acima da superfície da Terra, a temperatura decai em uma taxa de 10K/km, e tem seus limites finais na tropopausa entre 10-12km. Na sequência vem a segunda camada, a estratosfera, com altitude inicial de aproximadamente 17 km, a temperatura aumenta com a altitude e tem seus limites finais na estratopausa. A terceira camada, conhecida como mesosfera, tem altitude inicial de aproximadamente 50 km e tem seus limites na mesopausa, nessa camada, ao contrário da estratosfera, a temperatura decresce com a altitude. A quarta camada, nomeada como termosfera, com altitude inicial de aproximadamente 90 km, nessa camada, por ser a que mais absorve a radiação do extremo ultravioleta do sol, é nela onde possui as maiores temperaturas da atmosfera terrestre (HARGREAVES, 1992).

Durante o século XVIII, que em regiões de tempo bom há a existência de um campo elétrico vertical na atmosfera terrestre (PARSONS e MAZEAS, 1753, apud TACZA, 2015). Esse campo elétrico aponta em direção ao centro do planeta (ROBLE e TZUR, 1986, apud TACZA, 2015). Harrison e Nicoll (2018) apresentaram alguns requisitos para que se possa considerar um dia como sendo de tempo bom, que são: a inexistência de hidrometeoros, aerossol e neblina, também figura nesta lista dias com coberturas mínimas de nuvens cumuliformes e nenhuma nuvem do tipo estrato com sua base abaixo de 1500 m, como velocidade do vento superficial entre 1 m/s e 8 m/s. Na tentativa de obter mais informações sobre esse campo elétrico atmosférico, o Instituto Carnegie de Washington realizou alguns cruzeiros ao redor do mundo no início do século XX medindo o valor desse campo elétrico a cada hora no ar sobre o oceano. A análise dos resultados medidos no ar oceânico a bordo de um navio mostrou que o valor do campo elétrico atmosférico de tempo bom só dependia apenas da hora universal (UT), independentemente da posição onde era realizada a medida. Tal vínculo com a hora universal é conhecido como a curva de Carnegie (HARRISON, 2013). Apesar de todos esses estudos, algumas dúvidas de como esse campo elétrico era mantido e a sua origem, ainda persistem. Como solução para esse fenômeno, Wilson em 1929 sugeriu que o campo elétrico atmosférico de tempo bom se originava e era mantido por tempestades e nuvens de chuva em algumas regiões do planeta. Essa relação entre eles faz parte do conceito do circuito elétrico atmosférico global (RYCROFT et al., 2000).

As tempestades que ocorrem em todo planeta, agindo juntas, fornecem uma grande quantidade de carga para a condutora ionosfera. Essas cargas chegam até a ionosfera por meio de correntes ascendentes que saem do topo das nuvens de tempestades e fluem por meio da condutora ionosfera até as regiões de tempo bom no solo. Nessas regiões, correntes descendentes fluem da ionosfera terrestre para o solo. Devido à alta condução do solo, correntes horizontais fluem pela superfície do planeta até as regiões de tempestade que ocorrem em todo o mundo, fechando o circuito. Esse fenômeno é conhecido como circuito elétrico atmosférico global (RYCROFT et al., 2000).

Ainda não existe uma compreensão exata entre os mecanismos que geram a energia elétrica do circuito elétrico atmosférico global e a curva de Carnegie, por isso

é necessário um monitoramento contínuo do campo elétrico atmosférico em diferentes áreas da Terra (RYCROFT et al., 2012). Mas a interpretação desses dados não é tão simples, pois o campo elétrico atmosférico é bem sensível às condições meteorológicas.

Fatores atmosféricos tais como ventos e raios podem influenciar nos valores do campo elétrico atmosférico (HARRISON e NICOLL, 2018). Porém, o campo elétrico atmosférico também pode sofrer alterações devido a outros elementos como à atividade solar, por meio do seu intenso campo magnético e das partículas originadas nos eventos de prótons e, os raios cósmicos, através das partículas altamente energéticas. Esses dois fatores são capazes de ionizar a atmosfera provocando alterações nesse campo elétrico e, conseqüentemente, no circuito elétrico atmosférico global (HARRISON e USOSKIN, 2010; RYCROFT et al., 2000).

2 CAPÍTULO I - A ATMOSFERA TERRESTRE

2.1 Aspectos da Composição

A atmosfera terrestre é a camada de gases que envolve a Terra sendo, que sua manutenção, ao redor do planeta, deve-se pela força de atração gravitacional. É composta principalmente de nitrogênio (78%), oxigênio (21%), argônio (0,93%), dióxido de carbono (0,039%), gases traço e vapor d'água (ver, por exemplo, Hargreaves, 1992). Gases como dióxido de carbono, dióxido de enxofre, vapor d'água e nitrogênio podem ser liberados para a Atmosfera da Terra, por meio de emissões vulcânicas, entre outros processos (de origem antropogênica). A atmosfera recebe nomenclaturas segundo determinados critérios. Sua estrutura pode ser classificada com vários fatores, como o de temperatura, processos físicos dominantes e composição iônica. A constituição da atmosfera de qualquer planeta se dá pela forma de como a estrutura do planeta se originaram e também dos processos químicos, físicos e orgânicos que sempre ocorrem.

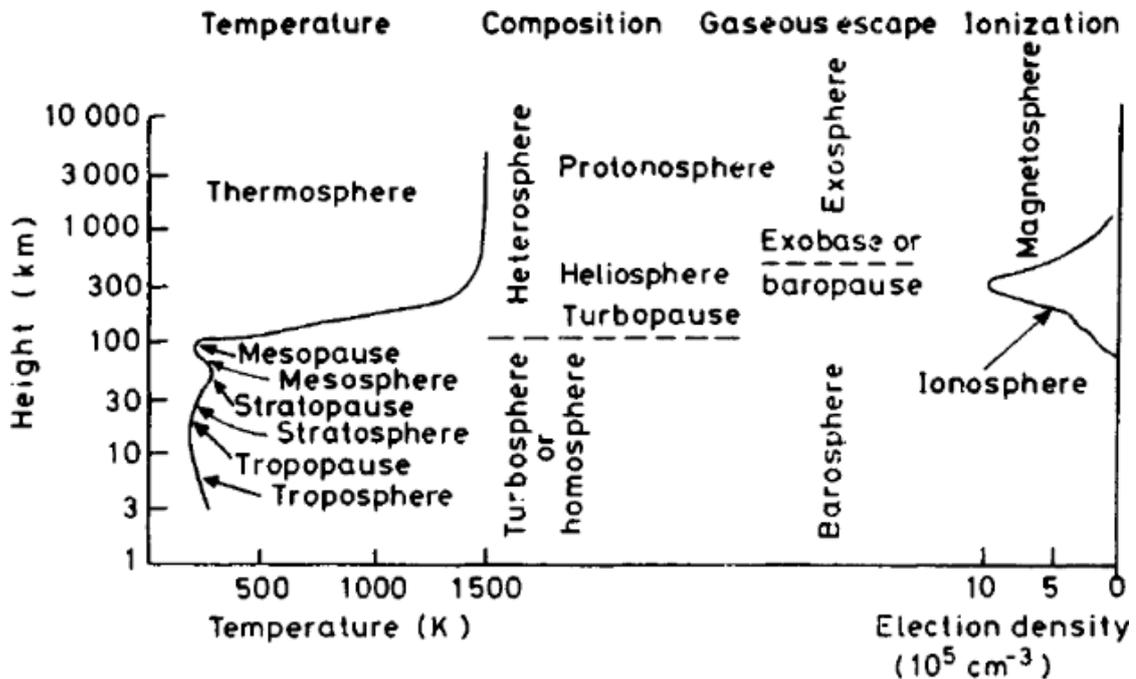
Considerando-se que na atmosfera da Terra contém a presença de matéria e radiação, pois não só a matéria, mas também a radiação presente são conseqüências de vários aspectos específicos do Planeta Terra, como: sua origem, sua densidade, sua posição relativa ao sol, seu campo elétrico, entre outros, propriedades que a Terra tem que a diferenciam de outros planetas, que por sua vez, terão matéria e radiação diferentes de outros planetas. A composição no que tange à matéria pode variar de acordo com a altitude.

2.2 Estrutura Básica da Atmosfera

A atmosfera terrestre possui estrutura vertical complexa e é classificada de acordo com determinados critérios tais como temperatura, composição, mistura e ionização. Na Figura 1, apresentam-se os perfis, segundo esses critérios, com os respectivos nomes das camadas atmosféricas.

De acordo com o perfil de temperatura, a atmosfera é dividida em camadas, as quais podem ser definidas quando o gradiente vertical de temperatura muda de sinal. As camadas são Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera. As regiões em que ocorre mudança no sinal do gradiente de temperatura são Tropopausa, Estratopausa e Mesopausa.

Figura 1 - Nomenclatura da atmosfera, de acordo com temperatura, ionização e condutividade elétrica.



Fonte: Hargreaves (1992).

Troposfera é a região onde as condições climáticas acontecem na camada inferior da atmosfera, chamada de troposfera. É na troposfera que ocorrem os fenômenos meteorológicos, como as chuvas, formação das nuvens. A temperatura da troposfera diminui com o aumento da altitude. Essa camada se estende até 15-20 km do solo, na região equatorial e a aproximadamente, com uma temperatura de 195 K. Nos polos, com aproximadamente 10-15 km, com temperatura de 220 K. O topo da troposfera é delimitado pela tropopausa, região na qual ocorre um mínimo de temperatura

Chegando a aproximadamente 50 km do solo, encontra-se a estratosfera. A temperatura aumenta com a altitude até um máximo de 270 K. A estratosfera contém ozônio, um gás que absorve os prejudiciais raios ultravioleta do Sol. Na estratosfera, o processo de radiação é o principal agente dissipador de calor.

O topo da mesosfera fica a 80-100 km do solo, é muito fria, com temperatura abaixo de 100°C negativos. A parte inferior é mais quente pois absorve calor da estratosfera. Na altura da mesopausa encontram-se as temperaturas mais baixas de toda a atmosfera terrestre.

A termosfera fica cerca de 450 km acima da terra, é a única camada mais quente, uma vez que suas raras moléculas absorvem a radiação do sol. As temperaturas no topo chegam a 2000°C .

A camada superior da atmosfera, a exosfera, fica a mais ou menos 900 km acima da terra. O ar é muito rarefeito e as moléculas de gás "escapam" constantemente para o espaço. É a parte externa da atmosfera.

Apesar de todos os fatores, existe um aquecimento diferencial em altura, onde a atmosfera está sujeita ao movimento de rotação terrestre, que provoca recebimento diferencial de energia em diferentes pontos da atmosfera, isto gera perturbações complexas. As principais perturbações de grande escala encontradas na atmosfera são os ventos médios, ondas planetárias e as marés atmosféricas. As

ondas planetárias, as quais são de grande escala e as ondas atmosféricas de gravidade, estas apesar de possuírem menor escala, também são importantes para a dinâmica atmosférica.

A camada de ozônio é uma camada de gás (O_3), situada na estratosfera, que cobre a Terra e absorve diferentes tipos de radiação, principalmente o ultravioleta (UV). A temperatura na estratosfera aumenta em virtude desse processo de absorção de UV pela presença do O_3 , onde as moléculas de oxigênio presentes nessa camada absorvem radiação ultravioleta emitida pelo Sol, levando à formação de ozônio e, conseqüentemente, da camada de ozônio. Existe a dispersão de muitos gases que atuam quimicamente na camada de ozônio dissolvendo-a, como é o caso dos Clorofluorcarbonetos (CFC's), Óxido Nítrico (NO), Ácido Nitroso (HNO_2) e Dióxido de carbono (CO_2), sendo que ainda existe a possibilidade dessa camada de se renovar.

A atmosfera terrestre é comumente classificada em três regiões básicas: baixa, média e alta atmosfera. A baixa atmosfera é representada pela troposfera e parte da estratosfera, estendendo-se do solo a aproximadamente 30 km de altitude. A média atmosfera é considerada entre a alta estratosfera e a mesosfera, estendendo-se entre aproximadamente 30 km e 90 km de altitude. Acima, considera-se a alta atmosfera que se constitui da alta mesosfera e a termosfera.

É interessante salientar que a aproximadamente 100 km de altitude ocorre uma importante transição do regime de mistura dos gases atmosféricos e, segundo esse critério, há uma diferenciação entre o que se denomina a homosfera (ou turbosfera) e a heterosfera.

Na primeira, os gases seguem aproximadamente as proporções dos gases mencionados anteriormente de forma homogênea, devido a processos de convecção e regimes de turbulência, daí o nome turbosfera.

Acima dos 100 km de altitude, os gases atmosféricos se distribuem diferenciadamente. Os gases moleculares e, portanto, com maior massa molar, tais como N_2 , NO, O_2 , por exemplo, distribuem-se em maiores concentrações nas regiões entre 100 km e 150-200 km e gradativamente gases atômicos passam a ser mais abundantes. Em altitudes de 200 km, há abundância e predominância de Oxigênio atômico, acima de altitudes de 300-400 km (esses limites são aproximados) há predominância do Hidrogênio atômico.

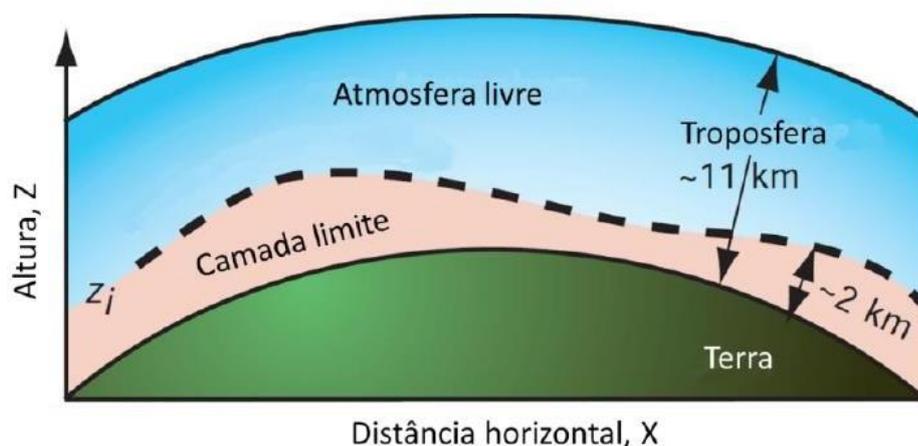
Na alta mesosfera e baixa termosfera encontra-se a baixa ionosfera e, acima de 150-190 km, encontra-se a alta ionosfera, região na qual ocorrem as maiores concentrações de pares íon-elétron, ou do plasma ionosférico, em meio aos gases neutros da atmosfera terrestre.

Nas considerações a respeito do Circuito Elétrico Atmosférico Global, por razão dos modelos propostos no século XX (ver, por exemplo, Wilson, 1921), primeiramente propôs-se o solo terrestre e a baixa ionosfera como placas de um grande capacitor esférico e a atmosfera neutra se constituindo, dada sua baixa condutividade elétrica, como o dielétrico de tal capacitor. Daí a importância de estudos a respeito das possíveis influências que eventos relacionados à área denominada por clima espacial podem ter sobre o clima terrestre e conseqüentemente ao Circuito Elétrico Atmosférico Global como um todo.

Por outro lado, conforme mencionado anteriormente, é na troposfera onde todos os eventos meteorológicos e climatológicos terrestres ocorrem (chuvas, descargas elétricas atmosféricas, sistemas de tempestades de pequena, média e grande escala, entre outros fenômenos atmosféricos) e, portanto, onde grande influência sobre aspectos referentes à variabilidade do Circuito Elétrico Atmosférico

Global pode ocorrer, convém também salientar a importância da denominada Camada Limite Planetária a qual se encontra na baixa troposfera a aproximadamente 1-2 km de altitude em relação ao solo. Na Figura 2, apresenta-se um desenho esquemático da camada limite planetária (Wallace e Hobbs, 2006, Marques, 2017).

Figura 2 - Perfil vertical esquemático da troposfera e detalhe da camada limite planetária.



Fonte: Adaptado de Wallace e Hobbs (2006), apud Marques (2017).

A camada limite planetária é caracterizada por processos de turbulência entre o solo e o ar atmosférico, processos com escala de tempo inferior a algumas horas até 1 dia, por meio dos quais ocorre interação entre solo e ar mais proximamente à superfície. Na camada limite planetária a eletricidade pode ser influenciada pelos processos de turbulência, produção de íons e de suas propriedades físicas (Tacza, 2019).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

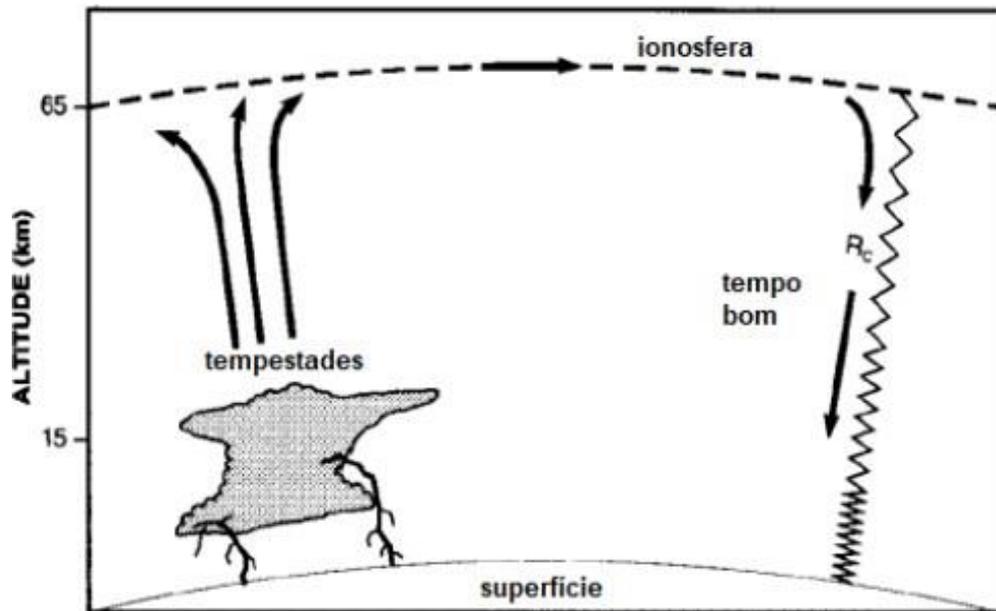
O nosso planeta apresenta em sua atmosfera a existência de um campo elétrico. Mas, o mesmo, pode receber o nome de campo elétrico de tempo bom se a região do planeta apresentar determinados aspectos como a ausência hidrometeoros, aerossol e neblina, assim como, mínimas nuvens cumuliformes e nenhuma nuvem do tipo estrato com sua base abaixo de 1500 m e, a velocidade do vento superficial entre 1 m/s e 8 m/s (HARRISON e NICOLL, 2018). Esse campo elétrico atmosférico surgiu porque a Terra se comporta como um gigantesco capacitor esférico. As placas do capacitor são formadas pela superfície da Terra e a outra pela ionosfera (uma camada da atmosfera). Por ter uma condutividade muito baixa, o ar que fica entre as duas placas (superfície da Terra e a ionosfera) pode ser considerado como o dielétrico do capacitor. Essa explicação foi dada por Wilson em 1929 (RAKOV e UMAN, 2003).

Realizando medições do campo elétrico atmosférico em dias de tempo bom no início do século XX, Wilson identificou que existia uma densidade de corrente vertical. (WILSON, 1906, apud OLIVEIRA, 2020). Essa densidade de corrente de fuga era capaz de descarregar o capacitor Terra-ionosfera em alguns minutos, pois ela era da ordem de 2×10^{-12} A. O que resulta em uma corrente de fuga de

aproximadamente de 1020 A, isso se levarmos em conta todas as áreas de tempo bom da Terra (RYCROFT et al., 2000).

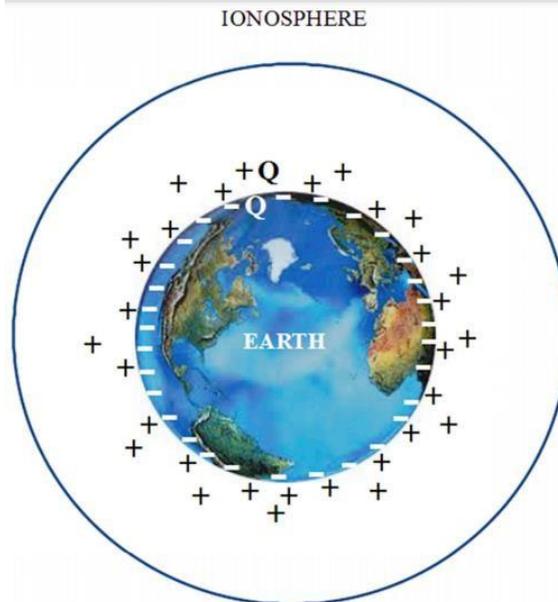
Foi apresentado um modelo para este assunto, segundo o qual as tempestades e seus raios funcionam como baterias, gerando corrente e alimentando o circuito elétrico atmosférico global trazendo cargas negativas para a superfície da Terra e levando uma carga positiva equivalente até a ionosfera (MACGORMAN et al, 1998; RYCROFT et al., 2012). Com isso, o capacitor se mantém sempre carregado, pois como já mencionado acima, em regiões de tempo bom existe uma corrente de fuga então, no fim, os dois efeitos se compensam, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Circuito Elétrico Atmosférico Global.



Fonte: MacGorman et al. (1998, com adaptações).

Em um estudo mais recente, Haldoupis et al. (2017) apresenta um modelo mais atualizado a respeito da formação do circuito elétrico atmosférico global. Os autores trazem a proposta de um novo capacitor esférico sendo uma de suas placas formada pela superfície da Terra com uma carga negativa e, uma segunda placa formada pela camada esférica de ar na baixa atmosfera, com uma carga espacial igual à da superfície terrestre, porém positiva, mas distribuída de forma irregular. Como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Capacitor esférico Terra-atmosfera.

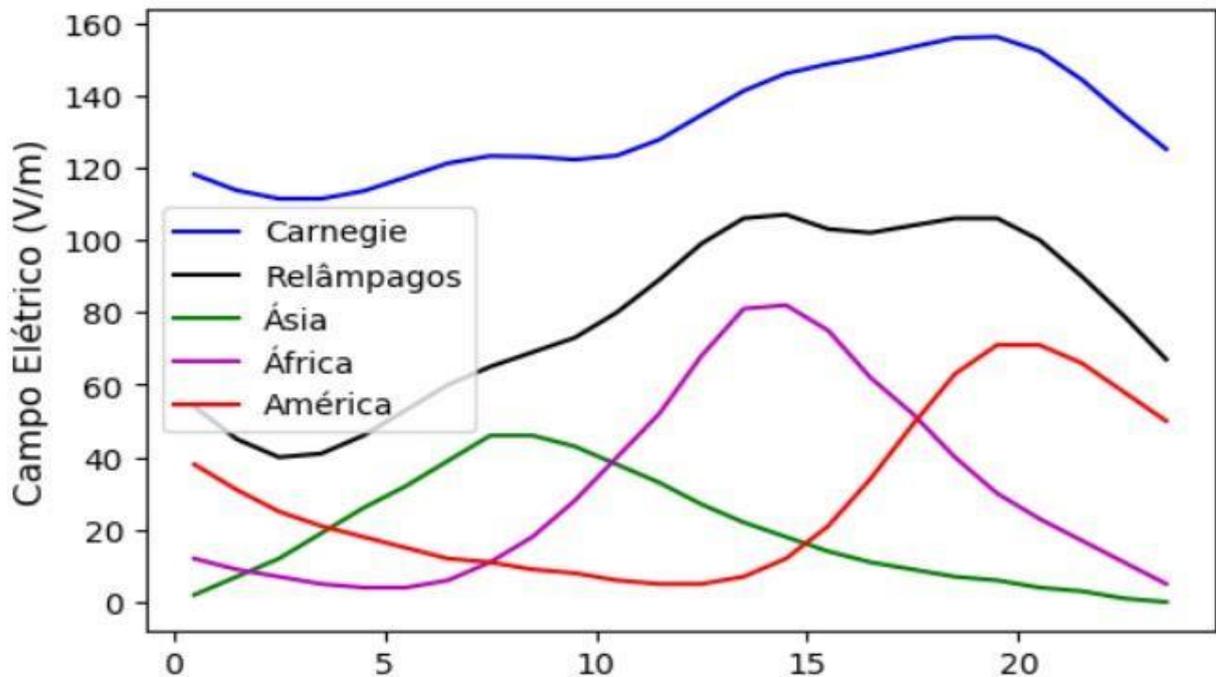
Fonte: Haldoupis et al. (2017).

Ainda no século XX, o Instituto Carnegie de Washington realizou medições do valor do campo elétrico atmosférico pelo mundo. Para evitar a interferência de meios externos como, por exemplo, aerossóis, o Instituto Carnegie optou por fazer essas medições a bordo de navios, inicialmente a bordo do navio Galilee (agosto de 1907, Harrison, 2013) e após, a maior parte das medições a bordo do navio Carnegie em vários cruzeiros e diversos pontos pelos oceanos Pacífico e Atlântico. O campo elétrico atmosférico foi medido a cada hora e em condições de tempo bom, com isso, foi possível obter uma curva a partir da média da variação diurna dos valores de campo elétrico. Foi no cruzeiro VII do navio Carnegie entre 1928 e 1929, principalmente, após desenvolvimento de instrumentação e obtenção de medidas bem confiáveis que ficou constatado que o campo elétrico de tempo bom tinha uma dependência apenas com a hora universal e não com a posição em que o navio se encontrava. Essa relação existente é conhecida como a curva de Carnegie (HARRISON, 2013).

O campo elétrico atmosférico, em condições de tempo bom possui intensidade da ordem de -130 V/m , também é referido por alguns autores como gradiente de potencial (PG, do inglês Potential Gradient) (Harrison, 2013).

O valor negativo do campo elétrico atmosférico denota que ele aponta para a superfície terrestre, enquanto que o PG,, apresenta valores positivos, porém com mesma magnitude do campo elétrico atmosférico (Tacza, 2015).

Figura 5 – Curva de Carnegie (curva em azul) e contribuições continentais da América (curva em vermelho), da África (curva em lilás), da Ásia (curva em verde) e contribuições de relâmpagos ao redor do globo (curva em preto).



Fonte: Oliveira (2020).

As diferentes contribuições de cada continente por meio das tempestades elétricas são responsáveis pelas variações do valor do campo elétrico de tempo bom na curva de Carnegie. Na Figura 5, é possível observar que a curva de Carnegie apresenta dois picos, um por volta das 14:00 UT e outro um pouco maior às 20:00 UT, que é o seu pico máximo. O primeiro coincide diretamente com o máximo de atividade vista na África e o segundo com o máximo de atividade vista na América. Diante disso, podemos notar que os continentes africano e americano são os que exercem maior influência na curva de Carnegie. Esses continentes exercem forte influência porque em seus territórios existem grandes áreas de florestas tropicais que por sua vez possui um clima úmido e quente, favorecendo assim a formação de tempestades elétricas nestas regiões. Em contrapartida, o continente asiático não apresenta grandes contribuições na curva Carnegie, mesmo sendo o maior continente do planeta em termos territoriais. Sua influência corresponde a quase metade da influência dos continentes americano e africano. Isso acontece devido à baixa quantidade de tempestades elétricas que ocorre no continente (WHIPPLE, 1929, apud OLIVEIRA, 2020).

3.1 Fatores que alteram o campo elétrico atmosférico

As variações meteorológicas, além de outros fatores, podem causar alterações na condutividade da atmosfera gerando assim, complexidade nas interpretações das curvas de campo elétrico atmosférico. Nesta seção apresentam-se alguns fatores que podem causar a alteração na curva do campo elétrico atmosférico.

3.1.1 Eventos solares

O Sol, pode liberar para o meio planetário uma quantidade de energia superior a ordem de 10^{25} J através de eventos denominados de explosões solares. Essas explosões solares além de liberar grandes quantidades de energia, também liberam grandes quantidades de matéria que podem ultrapassar a ordem de 10^{13} kg (LIN et al., 2003).

Durante um evento de explosão solar foi observado um aumento significativo do valor do campo elétrico atmosférico no primeiro dia, permanecendo até o quarto dia após o evento. Essas medidas foram realizadas em duas estações localizadas a 48° de latitude, porém com altitudes diferentes, uma está situada a 1780 metros acima do nível do mar e a outra está a 2964 metros acima do nível do mar. Para a estação de menor altitude o aumento foi de 25%, já para a estação de maior altitude o aumento foi entre 50% e 60% (REITER, 1967, apud TACZA, 2015).

Eventos de prótons solares também podem causar alterações no campo elétrico atmosférico, como mostram Farrell e Desch (2002). Nesse estudo, os autores sugerem que o campo elétrico atmosférico de tempo bom na superfície da terra pode ser alterado durante eventos de prótons solares. Esses eventos podem aumentar a condutividade atmosférica acima de regiões com nuvens de tempestades, permitindo que mais corrente flua para o circuito elétrico atmosférico global.

3.1.2 Raios cósmicos

As explosões solares ainda podem influenciar nas medidas de curvas de campo elétrico atmosférico de uma maneira indireta, pois durante o período de grande atividade solar a velocidade do vento solar é aumentada consideravelmente, tornando-se assim, um obstáculo ainda maior a chegada dos raios cósmicos extragalácticos até a Terra, este fenômeno é conhecido como *Decréscimo Forbush* (CANE, 2000).

Os raios cósmicos extragalácticos são partículas energéticas vindas de outras galáxias que chegam até a Terra (LAGANÁ, 2011). Quando essas partículas interagem com a média e a baixa atmosfera terrestre, modificam sua condutividade elétrica. A química da atmosfera é mudada de acordo com o fluxo dessas partículas (RYCROFT et al., 2000). As alterações feitas na atmosfera por meio dos raios cósmicos fazem com que haja uma redistribuição do fluxo de corrente do circuito elétrico atmosférico global, além da densidade de corrente vertical. Durante um período de baixa atividade solar, ou seja, um maior fluxo de raios cósmicos, nota-se uma diminuição do campo elétrico atmosférico e um aumento na densidade de corrente na superfície (HARRISON e USOSKIN, 2010).

3.1.3 Concentração de aerossóis

Aerossóis são partículas que possuem um diâmetro inferior a $10 \mu\text{m}$ e podem permanecer suspensas no ar por muito tempo. Essas minúsculas partículas podem ser originadas por processos naturais, como partículas de poeira de desertos, sal marinho, vulcões, etc. No entanto, os aerossóis também podem ser gerados por atividades humanas, como o revolvimento do solo na agricultura, gases liberados pela indústria, a queima de combustíveis fósseis, entre outros. Essas partículas possuem propriedades resistivas elétricas, causando uma diminuição na

condutividade elétrica da atmosfera, afetando diretamente o circuito elétrico atmosférico global e, portanto, o campo elétrico atmosférico de tempo bom. Assim, os dados sobre o campo elétrico atmosférico vêm sendo associados às taxas de poluição atmosférica (COBB et al., 1970; GURMANI et al., 2018).

4 INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se informação a respeito da instrumentação que se utiliza para efetuar medidas de campo elétrico atmosférico, bem como de detecção de descargas elétricas atmosféricas.

4.1 Carnegie

Para um breve apanhado histórico, inicia-se mencionando o trabalho realizado no início do século XX, entre 1909 e 1929, com medidas de campo elétrico atmosférico em regiões de tempo bom a bordo do navio Carnegie destinado a estudos geofísicos e pertencente ao Instituto Carnegie de Washington, EUA. O navio construído todo em madeira permitia fazer medições geomagnéticas, Figura 6 (Harrison, 2013 e referências nele contidas).

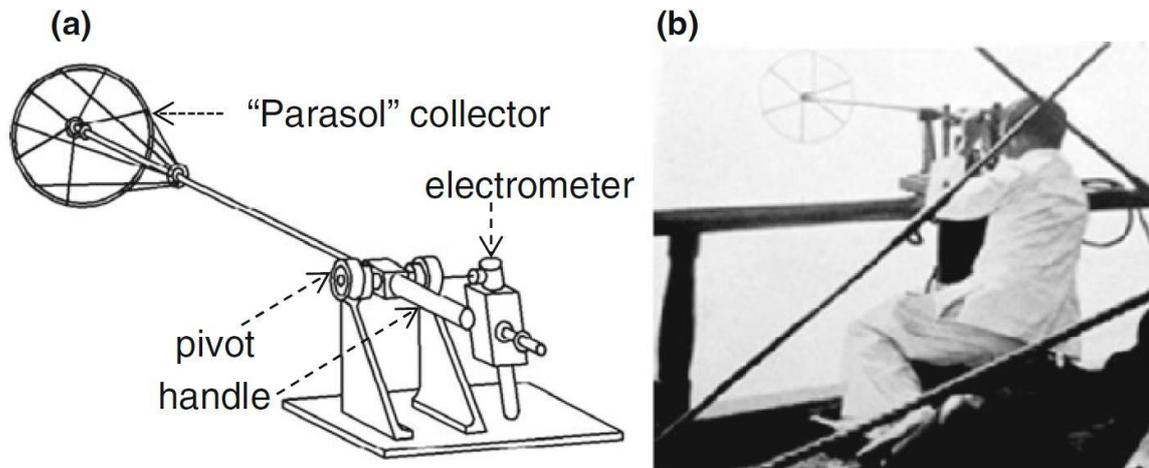
Figura 6 - Navio Carnegie do Instituto Carnegie de Washington, em 1909.



Fonte: Harrison (2013).

Durante os cruzeiros IV, V, e VI a instrumentação foi continuamente aperfeiçoada, o que resultou em um coletor com superfície de detecção que lembra um guarda-sol aberto (Fig. 7). “Este coletor foi feito de tela de arame, disposto em um braço pivô que se projeta horizontalmente. Em uso, ele foi girado de apontar para baixo (“zero”) para uma posição de medição horizontal, durante a qual a mudança associada na leitura do eletrômetro foi registrada” (Harrison, 2013, tradução).

Figura 7 – a) Esquema do aparelho de medição de gradiente de potencial projetado durante o Cruzeiro IV, montado na parte traseira do navio. O sensor “guarda-sol” foi elevado de apontando para baixo para horizontal usando uma alça isolada, e a mudança na leitura do eletrômetro mecânico adjacente registrada. b) aparelho PG(em inglês, gradiente de potencial)em uso, com o eletrômetro sendo observado a olho nu (Carnegie Institution of Washington, Department of Magnetismo.Terrestre).



Fonte: Harrison, 2013.

4.2 Sensores atuais

Atualmente há alguns sensores de campo elétrico atmosférico fabricados comercialmente por diferentes empresas, por exemplo, a empresa Boltek (EUA), especializada na elaboração de aparelhos capazes de monitorar a atividade elétrica na atmosfera e a empresa Vaisala (sediada na Finlândia).

Tais sistemas são capacitados a monitorar de maneira contínua o campo elétrico atmosférico, bem como detectar descargas elétricas atmosféricas, com finalidades diversas de além de fazer monitoramento contínuo, fazer proteção e prevenção de sistemas elétricos contra queda de raios elétricos.

O EFM-100, apresentado na Figura 8, fabricado pela empresa Boltek, sediada nos EUA, é capaz de coletar esses dados com uma resolução temporal variável de alta frequência, para fins de análise espectral de curvas de campo elétrico atmosférico em maior detalhe visando estudos de descargas elétricas atmosféricas.

Dois sistemas de monitoramento de campo elétrico atmosférico operam em modo de rotina, atualmente, em Campi da UEPB: um em Campina Grande (desde novembro de 2016) e outro em Lagoa Seca (desde maio de 2017). Esses dois sistemas são constituídos pelo monitor de campo elétrico (Figura 8, canto superior direito e sobre o telhado do edifício, da Escola de Agroindústria, Campus II, em Lagoa Seca), bem como um computador que armazena e gerencia os dados.

Esses sistemas de instrumentos foram instalados como parte de acordo de cooperação científica firmado entre UEPB e Universidade Presbiteriana Mackenzie, de São Paulo, configurando-se como duas estações de observação da rede denominada *Atmospheric Electric Field Network in South America (AFINSA)* (Tacza et al., 2014; 2019).

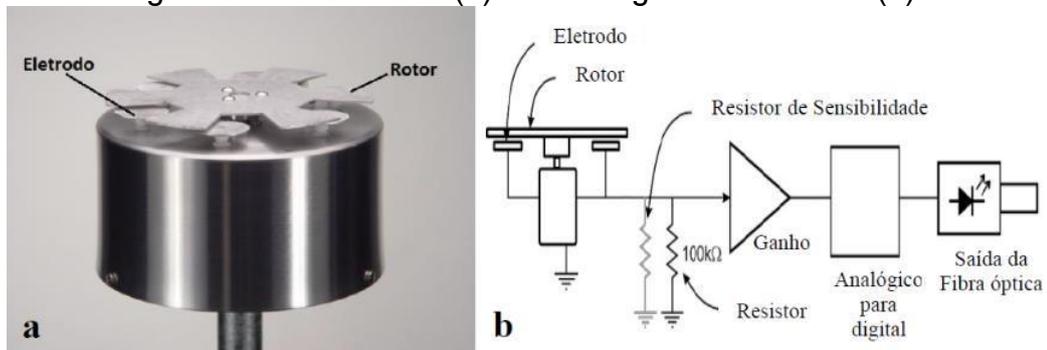
Figura 8 - Imagens do sensor de campo elétrico EFM-100 (canto superior direito), instalado sobre um prédio localizado no Campus de Lagoa Seca; sistema de gerenciamento de dados (canto inferior direito).



Fonte: Fernando Bertoni

Na Figura 9, mostram-se o sensor de campo elétrico atmosférico EFM100 (a) e o diagrama de blocos (b).

Figura 9 - Sensor EFM (a) e seu diagrama de blocos (b).



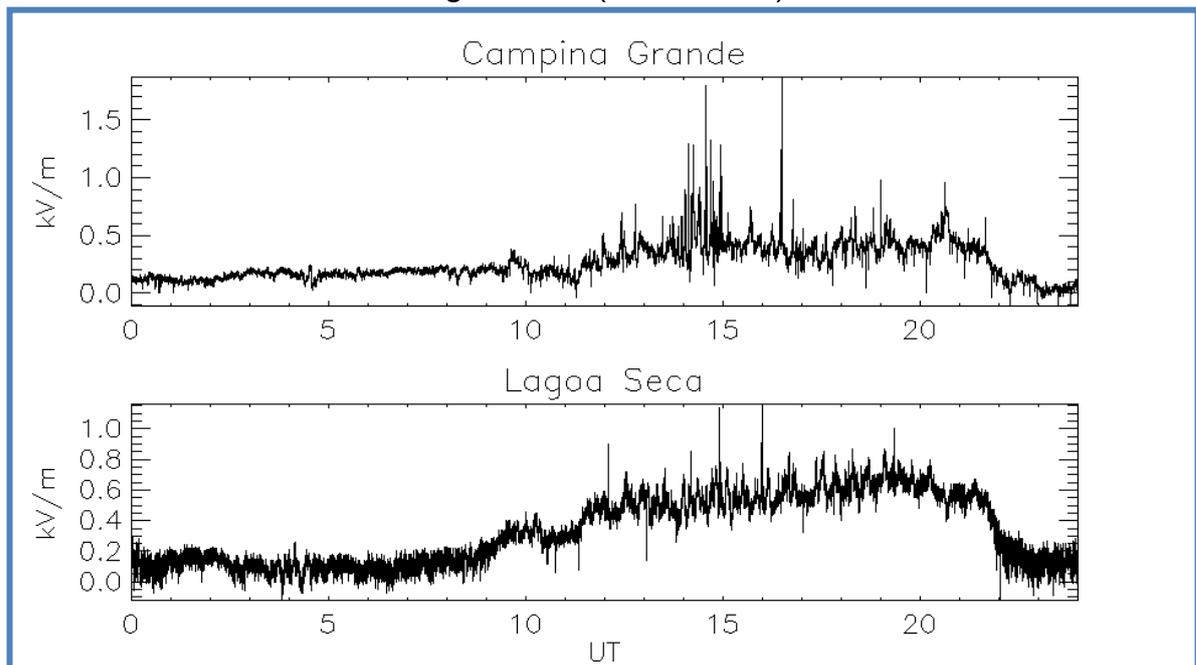
Fonte: Adaptado de Corporação Boltek, EFM100-1000120-050205 (Tacza, 2015)

A parte superior do sensor EFM (Figura 9a) contém um rotor com placas metálicas. Quando uma placa de condução é exposta a um campo elétrico, induz-se uma carga elétrica proporcional ao campo elétrico e a área da placa. Assim campos elétricos alternados são produzidos pelo arranjo de eletrodos e rotor acionado por motor. Na parte abaixo das placas rotativas ficam os componentes eletrônicos.

Na Figura 9b, apresenta-se o diagrama de blocos simplificado. O eletrodo de detecção ao ser exposto ao campo elétrico atmosférico, uma corrente flui do solo, por meio do resistor de 100 k Ω (Figura 9b). Quando o eletrodo de detecção não está sob a influência do campo elétrico, a corrente flui para a Terra por meio do mesmo resistor. A queda de potencial elétrico através da resistência é proporcional à intensidade do campo elétrico atmosférico. Utilizando-se uma segunda resistência em paralelo, é possível alterar a sensibilidade da medida a fim de evitar a saturação devido a campos elétricos de intensidade mais altas (> 20 kV/m), durante períodos de tempestade ou de descargas elétricas (Tacza, 2015).

Alguns exemplos de curvas com variações diárias do campo elétrico atmosférico são apresentados na Figura 10. As curvas mostradas na Figura 10, foram obtidas em uma cadência de duas medidas a cada segundo. Resoluções maiores são possíveis, conforme mencionado anteriormente, conforme os objetos de estudos. Para os objetivos de avaliar a variabilidade em escalas de tempo maiores, a frequência de medição de dados atual é plenamente satisfatória. Os arquivos diários gerados pelos monitores possuem atualmente um tamanho de 3 MB.

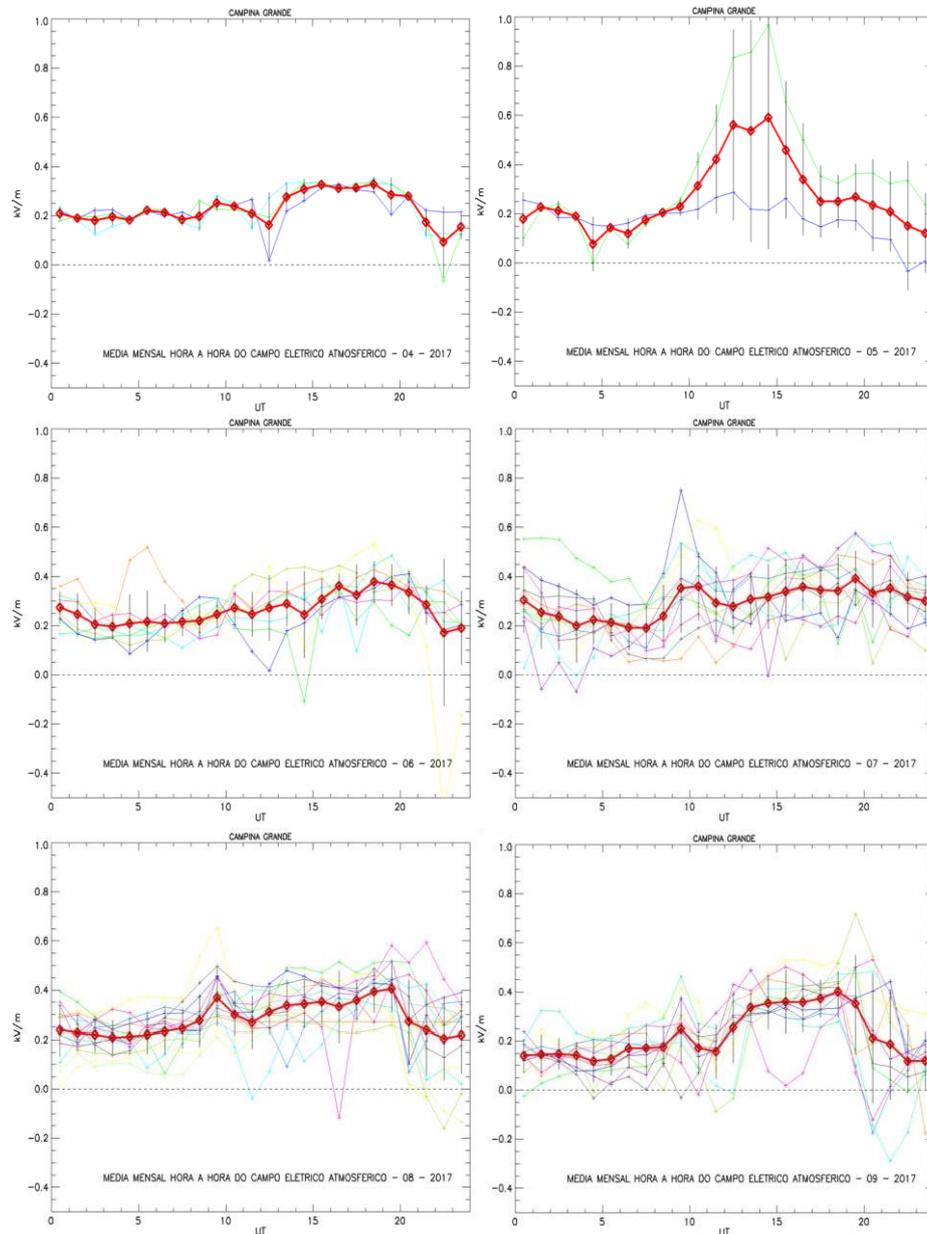
Figura 10 - Comportamento diário das curvas de campo elétrico atmosférico medido durante dias de tempo bom nas localidades de Campina Grande (22/02/2017) e Lagoa Seca (02/09/2017).



Fonte: Acervo Próprio

Com base nas curvas diárias apresentadas na Figura 10, Lucena (2021) apresenta resultados com médias horárias hora a hora para alguns períodos de observação feita nas estações de Campina Grande e Lagoa Seca, apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Dias compostos das médias mensais hora a hora (linhas contínuas em vermelho+diamantes) referentes aos meses entre abril e setembro, das medidas de campo elétrico atmosférico, juntamente com curvas diárias representando as respectivas média horárias (linhas contínuas coloridas, o número de linhas determina o número de utilizados nos cálculos), para o ano de 2017, em Campina Grande.



Fonte: Lucena (2021).

5 CONCLUSÃO

Retomando o assunto principal, o circuito elétrico atmosférico global se origina por tempestades e nuvens de chuva em algumas regiões do planeta. Essa relação faz parte do conceito do circuito elétrico atmosférico global. O objetivo geral deste trabalho foi entender como o campo elétrico atmosférico global se mantém, esse objetivo foi atingido pelo autor e, de acordo com os vários estudiosos da área da física atmosfera citados ao longo deste trabalho, verdadeira e os principais dados

que corroboram essa afirmação foram apresentações de artigos e trabalhos científicos, que fornecem um tratamento quantitativo dos dados.

REFERÊNCIAS

APLIN, KI, HARRISON, RG, RYCROFT, MJ, 2008. **Investigando a eletricidade atmosférica da Terra: um modelo para estudos planetários**. Ciência Espacial. Rev.

CANE, H. Coronal mass ejections and forrush decreases. **Space Science Reviews**, v. 93, p. 55 – 77, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225903522_Coronal_Mass_Ejections_and_Forrush_Decreases. Acesso em: 11 junho. 2022.

COBB, W. Evidence of a solar influence on the atmospheric electric elements at mauna loa observatory. **Monthly Weather Review** v. 95, n. 12, p. 905-911, 1967. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.395.3223&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 08 agosto de 2022.

COBB, W., WELLS, H. The electrical conductivity of oceanic air and its correlation to global atmospheric pollution. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 27, n. 5, p. 814-819, 1970.

DE MENDONÇA, R.R.S., RAULIN, J.-P., et al. Observation of cosmic ray and electric field variation in the surface atmosphere. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 73 (3), 1410-1416, 2009.

FARRELL, W.M., DESCH, M.D. Solar proton events and the fair weather electric field at ground. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 9, p. 37-1, 37-4. DOI: 10.1029/2011GL013908, 2002. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001GL013908>Acesso em: 22 agosto. 2020.

GURMANI, S., AHMAD, N., TACZA, J., IQBAL, T. First seasonal and annual variations of atmospheric electric field at a subtropical station in islamabad, Pakistan. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 179, p. 441-449, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328011788_First_seasonal_and_annual_variations_of_atmospheric_electric_field_at_a_subtropical_station_in_Islamabad_Pakistan. Acesso em: 04 setembro. 2022.

HALDOUPIS, C., RYCROFT, M., WILLIAMS, E., PRICE, C. Is the “Earth-ionosphere capacitor” a valid component in the atmospheric global electric circuit?. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 164, p. 127-131, 2017.

HARGREAVES, J. K. (John Keith) 1930.**The solar terrestrial environment: An introduction to geospace - the science of terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere**. (Cambridge atmosphere and space science series, 7) . University Press, 1992.

HARRISON, R. G. The Carnegie Curve. **Surveys in Geophysics**, v. 34, n. 2, p. 209-232, 2013. DOI 10.1007/s10712-012-9210-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-012-9210-2>. Acesso em: 16 setembro. 2022.

HARRISON, R. G., NICOLL, K. A. Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 139, p. 239 – 250, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682618301299>. Acesso em: 15 setembro. 2022.

HARRISON, R.G., USOSKIN, I. Solar modulation in surface atmospheric electricity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 72, p. 176-182, 2010. Disponível em: http://centaur.reading.ac.uk/5906/1/HarrisonUsoskin2010_postprint.pdf. Acesso em: 27 setembro. 2022.

KELLEY, Michael C. **The Earth's ionosphere**. International Geophysics Series, Vol. 43. New York, 1989.

LIN, J., SOON, W., BALIUNAS, S. Theories of solar eruptions: a review. **New Astronomy Reviews, Elsevier**, v. 47, n. 2, p. 53-84, 2003. Disponível em: <https://web.cfa.harvard.edu/~wsoon/myownPapers-d/LinSoonBaliunas03-TheoriesofSolarEruptions.pdf>. Acesso em: 05 outubro de 2022.

LUCENA, Jose Arthur Araújo de. Estudos sobre a variabilidade do campo elétrico atmosférico nas localidades de Campina Grande e Lagoa Seca, PB. 2021. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2021.

MACGORMAN, D., RUST, W. **The Electrical Nature of Storms**. Oxford University Press, 1998.

MARQUES, M. T. A. **Obtenção da altura da camada limite planetária através da análise espectral do campo de vento do lidar Doppler**. 2017. 65 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <www.teses.usp.br> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa).

MEDINA, R. L. **Construção de um instrumento para a medida e estudo do campo elétrico da atmosfera**. 2006. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia) - Universidade Federal de Pelotas - Pelotas, p. 161. 2006.

MICHAEL C. KELLEY. **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics**/ Michael C. Kelley. p. cm, - (International geophysics series; v. 96)
OLIVEIRA, R. R. **Análise de variações na radiação gama natural associada ao radônio e influência do campo elétrico atmosférico e efeitos meteorológicos**. 2020. Dissertação (Programa de Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, p. 105. 2020.

RYCROFT, M. J., NICOLL, K. A., APLIN, K. L. HARRISON, R. G. Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 90-91, p. 198-211, 2012. Disponível em:

http://centaur.reading.ac.uk/31502/1/31502RecentAdvances_Rycroftetal2012_Manuscript_revised_centaur.pdf. Acesso em: 11 outubro de 2022.

RYCROFT, M.J., ISRAELSSON, S., PRICE, C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, p. 1563-1576, 2000. Disponível em:

<https://www.pretemp.it/alterpages/files/Eletr-Atm.pdf>. Acesso em: 02 novembro de 2022.

SINGH, D.K., Singh, R.P., Kamra, A.K. The electrical environment of the Earth's atmosphere: A review. *Space Science Reviews*, 113 (3), 375-408, 2004. DOI: 10.1023/B:SPAC.0000046747.32359.d8

SCHUNK, R.W. Nagy, A., **Ionosphere, Physics, Plasma and Chemistry**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, (2000)

TACZA, J. **Análise da variabilidade do campo elétrico atmosférico durante tempo bom e distúrbios geofísicos**. Tese de Doutorado (Programa de Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2019.

TACZA, J., RAULIN, J.-P., MACOTELA, E., MARUN, A., FERNANDEZ, G., BERTONI, F. C. P., LIMA, L. M., SAMANES, J., BULEJE, Y., CORREIA, E., ALVES, G., MAKITA, K. Local and global effects on the diurnal variation of the atmospheric electric field in South America by comparison with the Carnegie curve. **Atmospheric Research**, 240, 104938, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104938>

TACZA, J. **Análise do campo elétrico atmosférico durante tempo bom e distúrbios geofísicos**. Dissertação de Mestrado (Programa de Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2015.

TACZA, J., RAULIN, J.-P., MACOTELA, E., NORABUENA, E., FERNANDEZ, G., CORREIA, E., RYCROFT, M. J., HARRISON, R. G., et al. (2014). A new south American network to study the atmospheric electric field and its variations related to geophysical phenomena. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 120, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.09.001>

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science, an introductory survey**. 2 ed., Capítulo 9, New York: Academic Press, 2006.

WILSON, C.T.R. Atmospheric electricity. *Nature*, 68, 101-104, 1903.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por todas suas bênçãos e o fortalecimento de todos os dias perante as dificuldades encontradas ao longo do caminho.

A minha mãe e irmãos que me proporcionaram apoio em todos os setores de minha vida.

A meu namorado Charles Ortiz, cujo amor único, amizade sem fim, palavras de incentivo, apoio e dedicação, foram suporte e inspiração para a conclusão desta etapa acadêmica e cuja importância em vida não se pode mensurar. Te amo! Ao nosso filho, que ainda está em meu ventre, me deu força e coragem para concluir esta etapa.

Aos meus avós, tios e sogros, obrigada por todo carinho!

O meu orientador, Dr. Fernando Celso Perin Bertoni, pela paciência e dedicação ao me orientar em meu trabalho de conclusão de curso

Aos meus amigos, Lucas, Yan, Wandson, Liliane, Flávia e tantos outros do qual a amizade não pode ser descrita, levarei a amizade para vida.

