



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Clara Castilho Oliveira

Desenvolvimento do software para cálculo da condutividade elétrica da ionosfera

**Brasília
2025**

Clara Castilho Oliveira

Desenvolvimento do software para cálculo da condutividade elétrica da Ionosfera

Monografia apresentada ao programa de pós-graduação em geociências aplicadas e geodinâmica como parte de obtenção do título de Mestre em geociências aplicadas sob orientação do Prof. Elder Yokoyama.

Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências

Prof. Dr. Elder Yokoyama

Brasília
2025

Clara Castilho Oliveira

Desenvolvimento do software para cálculo da condutividade elétrica da Ionosfera/
Clara Castilho Oliveira. – Brasília, 2025-
43 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Prof. Dr. Elder Yokoyama

monografia – Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências, 2025.

1. Ionosfera. 2. Condutividade na ionosfera. 3. Cálculo da condutividade de Pedersen.
I. Elder Yokoyama. II. Universidade de Brasília. III. Instituto de Geociências. IV.
Desenvolvimento do software para cálculo da condutividade elétrica da Ionosfera.

Abstract

The electrical conductivity of the ionosphere plays a fundamental role in the electromagnetic dynamics of the geospace environment. It governs the propagation of radio waves, the structure of ionospheric current systems, and the coupling processes between the ionosphere and the magnetosphere. Among the key components of ionospheric conductivity are the Hall and Pedersen conductivities, which vary with altitude, geographic location, solar activity, and the Earth's magnetic field strength. This study presents the development of CondIono 2, a Python-based computational library designed to compute vertical profiles of Hall and Pedersen conductivities using the empirical models IRI-2020, NRLMSIS 2.0, and IGRF-13. The new version expands upon its predecessor, CondIono 1, by incorporating a modular architecture, extended altitude coverage, support for multiple input formats (including NetCDF), and data visualization via Jupyter Notebooks. The results show good agreement with the Kyoto University model up to approximately 150 km altitude but reveal discontinuities above 200 km, possibly related to limitations in input data processing or collision frequency calculations. Despite these issues, CondIono 2 shows strong potential as a research tool for modeling ionospheric electrodynamics, with applications ranging from space weather modeling to the enhancement of radio-based communication and navigation systems.

Keywords: Ionosphere; Atmospheric conductivity; Pedersen Conductivity; Halls Conductivity; Programming.

Resumo

A condutividade elétrica da ionosfera exerce um papel central na dinâmica eletromagnética do sistema Terra-espço, influenciando diretamente a propagação de ondas de rádio, a formação e o fechamento de correntes ionosféricas, e os processos de acoplamento entre a ionosfera e a magnetosfera. Dentre os parâmetros que a descrevem, destacam-se as condutividades de Hall e de Pedersen, que variam espacial e temporalmente em função de fatores como a densidade de partículas, temperatura, composição da atmosfera superior e intensidade do campo magnético terrestre. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do CondIono 2, uma biblioteca computacional escrita em Python voltada ao cálculo automatizado dos perfis verticais dessas condutividades, com base nos modelos empíricos IRI-2020, NRLMSIS 2.0 e IGRF-13. A nova versão expande as capacidades do CondIono 1 ao incorporar uma arquitetura modular, maior faixa altitudinal, suporte a múltiplos formatos de entrada (incluindo NetCDF) e visualizações por meio de Jupyter Notebooks. Os resultados obtidos mostram boa concordância com o modelo da Universidade de Kyoto até 150 km de altitude, porém revelam descontinuidades a partir de 200 km, possivelmente associadas a limitações no tratamento dos dados de entrada ou no cálculo das frequências de colisão. Apesar dessas limitações, o CondIono 2 se mostra promissor como ferramenta de pesquisa em eletrodinâmica ionosférica, com aplicações que abrangem desde a modelagem do clima espacial até o aprimoramento de sistemas baseados em propagação ionosférica.

Palavras-chave: Ionosfera; Condutividade Atmosférica; Condutividade de Hall; Condutividade de Pedersen; Programação.

Agradecimentos

Agradeço profusamente à minha família, à minha psicóloga e ao meu orientador pelo apoio nesse longo projeto. Direciono agradecimentos também à UnB.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Sumário

1	Introdução	9
2	Fundamentação Teórica	11
2.1	Condutividade Elétrica	11
2.1.1	Componentes do tensor de Condutividade na Ionosfera	11
2.1.2	Equações para o Cálculo da Condutividade Elétrica	12
2.1.3	Termos da Equação	13
2.1.3.1	Giro-frequência Angular	13
2.1.3.2	Parâmetro de Contribuição Relativa das Espécies Iônicas	13
2.1.3.3	Frequências de Colisão	14
2.2	Teoria Cinética	15
2.2.1	Princípios de Física Estatística	15
2.2.1.1	Assembleia estatística	16
2.2.2	Livre caminho médio	17
2.2.3	Equação de Boltzmann	17
2.2.4	Distribuição de Maxwell-Boltzmann	18
2.2.5	Frequência de colisão	18
2.3	Plasma	19
2.3.1	Parâmetros do Plasma	19
2.3.1.1	Distância de Debye	20
2.3.1.2	Frequência de Oscilação	20
2.3.1.3	Quasi-neutralidade	20
2.3.2	Magnetização	21
2.3.3	Temperaturas do Plasma	21
2.3.4	Colisões	21
2.4	Ionosfera	22
2.4.1	Estrutura da ionosfera	23
2.4.1.1	Camadas	23
2.5	Campo Magnético Terrestre	24
3	Materiais e Métodos	26
3.1	Materiais	26
3.1.1	Programa CondIono	27
3.1.2	Modelos	27
3.1.2.1	IRI	27
3.1.2.2	NRLMSIS 2.0	28
3.1.2.3	IGRF	28
3.1.2.4	CondIono 1	28

3.2	Métodos	29
3.3	Programa	29
3.4	Programação	30
3.4.1	O formato NetCDF	30
3.4.2	Jupyter notebook	31
4	Resultados	32
4.1	Estrutura do código	32
5	Discussão e Conclusão	37
5.1	Comparação com o Modelo da Universidade de Kyoto	37
6	Considerações Finais	40
	Referências	41

1 Introdução

A ionosfera é uma camada da atmosfera terrestre situada entre aproximadamente 60 km e 1000 km de altitude, caracterizada pela presença de partículas ionizadas resultantes da interação entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos neutros (HARGREAVES, 1992). Essa região exerce um papel crucial nos processos eletrodinâmicos do sistema terrestre, influenciando fenômenos como a propagação de ondas de rádio, a condução de correntes elétricas em altas altitudes e a dinâmica das interações entre o vento solar e o campo magnético terrestre.

A condutividade elétrica da ionosfera é uma propriedade fundamental para a compreensão e modelagem desses fenômenos. Ela é normalmente decomposta em três componentes principais: longitudinal, de Hall e de Pedersen. Essas componentes são altamente sensíveis a variáveis como a composição química da atmosfera, a densidade de elétrons e íons, a intensidade da radiação solar, a atividade geomagnética e a frequência de colisões entre partículas carregadas e neutras. Entre os fatores de controle, destaca-se a intensidade e orientação do campo magnético terrestre (CMT), que regula o movimento das partículas carregadas e, consequentemente, afeta significativamente os perfis de condutividade.

Em particular, regiões de anomalia do CMT, como a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), localizada sobre o território brasileiro, apresentam uma redução significativa na intensidade do campo magnético, o que altera substancialmente os padrões de precipitação de partículas energéticas e modifica as propriedades eletrodinâmicas da ionosfera local. Compreender essas variações é essencial para melhorar a previsão de distúrbios espaciais que impactam a operação de satélites, sistemas de navegação, telecomunicações e redes elétricas.

Nesse contexto, a determinação precisa das condutividades de Hall e Pedersen em diferentes regiões e altitudes da ionosfera é de grande relevância para aplicações que vão desde a modelagem do clima espacial até o desenvolvimento de tecnologias de comunicação e monitoramento de tempestades geomagnéticas. Para isso, utilizam-se modelos empíricos amplamente validados, como o International Reference Ionosphere (IRI), que fornece parâmetros ionosféricos globais, o modelo atmosférico neutro NRLMSIS 2.0, e o modelo International Geomagnetic Reference Field (IGRF), que descreve a estrutura tridimensional do campo magnético terrestre.

Com base nesses modelos e na biblioteca CondIono (OLIVEIRA, 2021), desenvolvida em linguagem Python para o cálculo da condutividade ionosférica, foi possível estruturar um novo sistema computacional mais robusto e versátil. Neste trabalho, apresentamos o CondIono 2, uma versão aprimorada e expandida do código original. Essa nova implementação foi projetada para superar limitações do CondIono 1, como a restrição da faixa altitudinal e a simplificação dos modelos de colisão e condutividade utilizados.

O CondIono 2 integra de forma automatizada os modelos IRI, NRLMSIS 2.0 e IGRF, permitindo o cálculo de perfis realistas de condutividade elétrica em diferentes pontos geográficos e em uma faixa estendida de altitudes. Entre as melhorias implementadas estão o refinamento nos

parâmetros físico-químicos, a otimização da estrutura de código e o suporte a novos formatos de entrada e visualização de resultados.

Essa evolução representa um avanço significativo na modelagem da eletrodinâmica ionosférica, com potencial de aplicação em diversas áreas, como o estudo das interações entre a ionosfera e a magnetosfera, a análise de distúrbios ionosféricos em baixas latitudes e o apoio a sistemas tecnológicos sensíveis às variações do ambiente espacial.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica é uma propriedade do material. É o inverso da Resistência e indica o quão propenso um material é para conduzir eletricidade. Ela segue a lei de Ohm, em muitos casos, e expressa a relação entre a diferença de potencial e a corrente elétrica. Onde vale a lei de Ohm, a corrente elétrica é proporcional à quantidade de partículas carregadas. Isto ocorre porque, se a concentração de partículas carregadas é maior, existem mais partículas para transportar corrente e, por tanto, maior condutividade. Num gás, como é o caso da Ionosfera, a condutividade será influenciada também pelas: densidade do gás, temperatura e composição. A densidade afeta o número de colisões; a temperatura, a agitação das moléculas e a composição, o número de portadores de carga.

A região da ionosfera pode ser entendida como um plasma fracamente ionizado e fracamente magnetizado (isto é, a interação entre partículas carregadas e neutras domina e o movimento das partículas carregadas é regido pelo campo magnético). Dizemos que esse plasma é composto por três fluidos: partículas neutras, íons positivos e elétrons. A densidade de partículas neutras é muito maior que a de partículas carregadas daí porque a ionosfera é fracamente ionizada (NENOVSKI, 2014).

Conforme o plasma é magnetizado o movimento das partículas começa a ser influenciado pelo campo magnético e a condutividade passa a ser uma grandeza anisotrópica. Dividimos as componentes da condutividade em condutividade de Hall, Pedersen e alinhada ao campo ou longitudinal.

Uma das formas de estudar a condutividade elétrica de um gás é pela teoria cinética, que será detalhada no capítulo homônimo.

2.1.1 Componentes do tensor de Condutividade na Ionosfera

Na Ionosfera a diminuição da densidade do ar causa o aumento do tempo médio de colisão entre as partículas. O movimento das partículas carregadas passa a sofrer influência do Campo Magnético Terrestre, CMT, e a condutividade elétrica passa a ser uma grandeza tensorial. Da forma:

$$S = \begin{pmatrix} \sigma_P & -\sigma_H & 0 \\ \sigma_H & \sigma_P & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\parallel} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

As componentes são *Condutividade de Pedersen*, σ_P , *Condutividade de Hall*, σ_H e *Condutividade alinhada ao campo ou longitudinal*, $\sigma_{\parallel}$. As componentes são relativas a direção da linha

do campo magnético vide a figura 1.

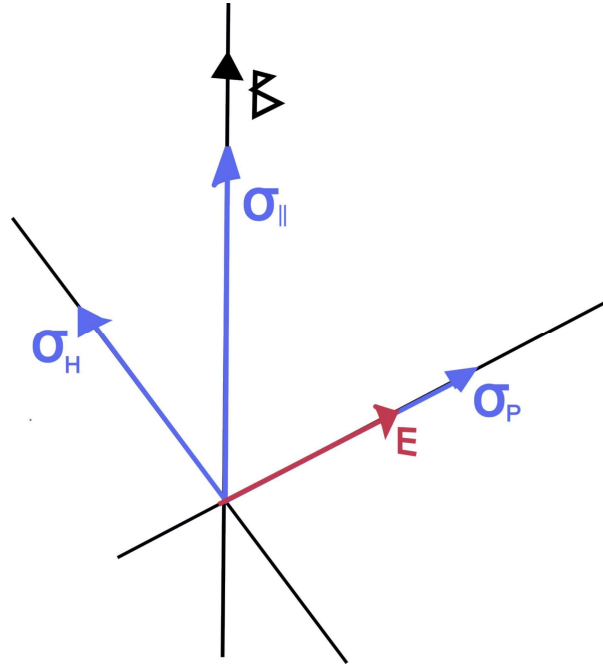


Figura 1 – Diagrama com as direções das condutividades *Condutividade de Pedersen*, σ_P , *Condutividade de Hall*, σ_H e *Condutividade alinhada ao campo ou longitudinal*, $\sigma_{||}$

Condutividade longitudinal

A condutividade longitudinal é a componente da condutividade na direção alinhada às linhas do campo magnético terrestre. É igual a condutividade do campo na região abaixo de 80 km.

Condutividade de Pedersen

A condutividade de Pedersen é aquela que é paralela ao campo elétrico, E , no Equador seus valores são máximos a 150 km de altitude. Se deve principalmente aos íons (VOLLAND, 1984).

Condutividade de Hall

A condutividade de Hall é aquela que é perpendicular ao campo elétrico e magnético. No Equador seus valores são máximos a 130 km de altitude. É causada principalmente pela deriva dos elétrons.

2.1.2 Equações para o Cálculo da Condutividade Elétrica

Nos cálculos usamos o conjunto de equações de Adachi et al. (2017). Eles valem para as componentes de Hall e Pedersen do tensor de condutividade.

Equação de Pedersen:

$$\sigma_{\perp} = \frac{N_e e}{B} \left[\frac{\omega_e \nu_{en}}{\omega_e^2 + \nu_{en}^2} + p_{i1} \frac{\omega_{i1} \nu_{i1n}}{\omega_{i1}^2 + \nu_{i1n}^2} + p_{i2} \frac{\omega_{i2} \nu_{i2n}}{\omega_{i2}^2 + \nu_{i2n}^2} \right] \quad (2.2)$$

Equação de Hall:

$$\sigma_H = \frac{N_e e}{B} \left[\frac{\omega_e^2}{\omega_e^2 + \nu_{en}^2} - p_{i1} \frac{\omega_{i1}^2}{\omega_{i1}^2 + \nu_{i1n}^2} - p_{i2} \frac{\omega_{i2}^2}{\omega_{i2}^2 + \nu_{i2n}^2} \right] \quad (2.3)$$

Sendo:

B é a intensidade do campo geomagnético;

N_e , a densidade de elétrons em m^{-3} ;

ω_i e ω_e , as giro-frequências angulares de íons e elétrons em Hz;

ν_{in} e ν_{en} , as frequências de colisão entre íons e partículas neutras e entre elétrons e partículas neutras, respectivamente, em Hz;

p_{i1} e p_{i2} , os parâmetros da contribuição relativa das espécies iônicas.

Calculamos também as condutividades integradas pela altura. O intervalo de integração é de 100 km até 400 km de altitude por limitações dos dados, a integração foi feita usando o método dos trapézios.

2.1.3 Termos da Equação

2.1.3.1 Giro-frequência Angular

Giro-frequência angular, ou frequência de ciclotron, é a frequência com que o átomo rotaciona ao redor da linha de campo e é dada pela equação:

$$\omega = \frac{|e|}{m_e} B_z \quad (2.4)$$

Na qual, e é a carga do elétron, m_e é a massa do elétron e B_z é a componente vertical do campo magnético.

2.1.3.2 Parâmetro de Contribuição Relativa das Espécies Iônicas

O parâmetro de contribuição relativa das espécies iônicas é calculado por meio da equação (BREKKE; MOEN, 1993):

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_e} \quad (2.5)$$

considerando que N_{ij} é a densidade numérica do íon j .

2.1.3.3 Frequências de Colisão

As frequências de colisão entre íons (no caso O^+ e íon fictício 1, que é uma mistura dos NO^+ , 75%, e O_2^+ , 25%) e partículas neutras e entre elétrons e partículas neutras foram retiradas de (ADACHI et al., 2017).

As frequências de colisão entre elétrons e partículas neutras são dadas por:

$$\nu_{en} = 2,33 \cdot 10^{-17} \times n(N_2) \times (1 - 1,21 \times 10^{-4} \times T_e) \times T_e + 1,82 \cdot 10^{-16} \times n(O_2) \times (1 + 3,6 \cdot 10^{-2} \sqrt{T_e}) \quad (2.6)$$

As equações para calcular a frequência de colisão entre íons e partículas neutras são dadas, para o íon fictício 1, por (ADACHI et al., 2017):

$$\nu_{i1n} = [4,29 \times n(N_2) + 4,23 \times n(O_2) + 2,41 \times n(O)] \cdot 10^{-16}, \quad (2.7)$$

e, para o O^+ (ADACHI et al., 2017):

$$\nu_{i2n} = 6,82 \cdot 10^{-16} \times n(N_2) + 6,66 \cdot 10^{-16} \times n(O_2) + 3,32 \cdot 10^{-17} \times n(O) \times \sqrt{T_r} \times (1,08 - 0,139 \times \log_{10} T_r + 4,51 \cdot 10^{-3} \times \log_{10}^2 T_r), \quad (2.8)$$

onde, $n(N_2)$, $n(O_2)$ e $n(O)$ são, respectivamente, as densidades de N_2 , O_2 e O em m^{-3} ; T_n , T_e e T_i são as respectivas temperaturas das partículas neutras, elétrons e íons em K; e $T_r = \frac{T_i + T_n}{2}$ em K.

2.2 Teoria Cinética

2.2.1 Princípios de Física Estatística

O campo da física estatística lida com sistemas que consistem de grandes números de partículas se deslocando de acordo com as leis da mecânica clássica ou quântica. Ele busca, a partir de uma função de distribuição das velocidades ¹ das partículas dada num momento específico, determinar como o conjunto de sistemas possíveis será distribuído entre as várias configurações e velocidades possíveis em um ponto específico no tempo (SADOVSKII, 2019).

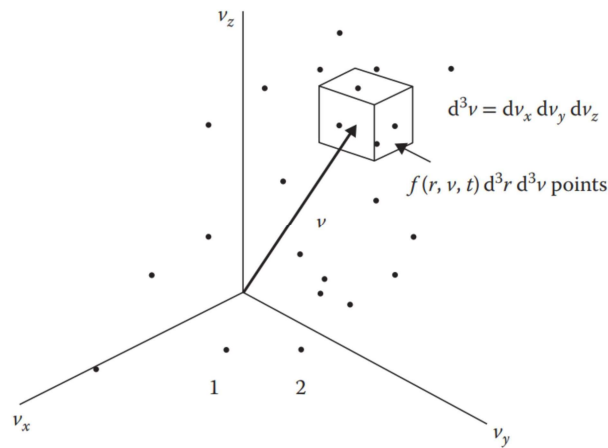


Figura 2 – Representação do espaço de Velocidade de um sistema com N partículas. dv é o elemento de volume no espaço de velocidades embutido em $f(\vec{r}, \vec{v}, t)d^3rd^3v$ e d^3r é um elemento de volume centrado em $\vec{r} = (x, y, z)$. Fonte: Robson, White e Hildebrandt (2017).

Consideremos um sistema de N partículas idênticas que interagem entre si, se movendo num volume V macroscopicamente grande (as distâncias entre as partículas são significativamente maiores que as dimensões das partículas). Assumindo que essas partículas não tem grau de liberdade interno e considerando que elas se comportam de acordo com a mecânica clássica. O estado do deslocamento da k -ésima partícula será descrito *completamente* pelos valores de suas coordenadas q_k e momento p_k e o estado do sistema será descrito pelos valores das coordenadas e momentos de todas as partículas. Não é razoável tentar resolver o sistema de equações daí resultante, pois as equações além de serem complicadas dependem das condições iniciais que não conhecemos. Por isso, como no caso da frequência de colisão, uma abordagem estatística é necessária. A abordagem estatística tenta determinar a probabilidade de realização

¹ Lembrando que a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória discreta X é definida como uma função de números reais f e domínio Ω , com um número finito de valores possíveis, que satisfaz (SNELL; GRINSTEAD, 2006):

- $f(\omega) \geq 0$, para todo $\omega \in \Omega$
-

$$\sum_{\omega \in \Omega} f(\omega) = 1 \quad (2.9)$$

de um conjunto de estados do sistema no nível microscópico que correspondam a um estado macroscópico específico. O estado do sistema é um *ponto de fase* no espaço de $6N$ dimensões chamado de *espaço de fase*: $(q_1, \dots, q_N, p_1, \dots, p_N)$ (SADOVSKII, 2019). Cada partícula terá uma curva no espaço de fase representando sua trajetória no espaço real conforme a figura 3.

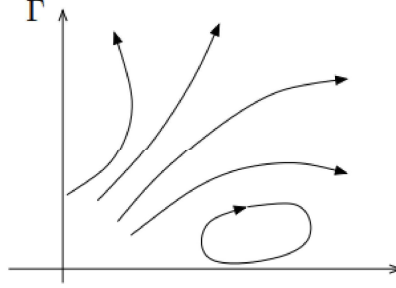


Figura 3 – Representação da trajetória do sistema no espaço de fase. O estado do sistema é dado por um ponto. Fonte: Soto (2016).

Saber a densidade de partículas num ponto no espaço de fase permite caracterizar a configuração instantânea de diversas partículas de uma só vez (BELLAN, 2006). Chamamos essa função de densidade de *função de distribuição*.

O estado do sistema e a evolução dinâmica do sistema são obtidas a partir da equação do movimento Hamiltoniana (SADOVSKII, 2019):

$$\frac{dq_k}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_k} \quad \frac{dp_k}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_k} \quad (2.10)$$

onde, $H = H(q, \dots, q_k, p, \dots, p_k) \equiv H(p, q)$ é o sistema hamiltoniano completo. Ela determina a trajetória de um ponto de fase no espaço de fase. Chamamos essa trajetória de *trajetória de fase*. Se o sistema for conservativo essas trajetórias estão restritas a superfícies de energia constante no espaço de fase.

2.2.1.1 Assembleia estatística

Uma assembleia de Gibbs é um conjunto que contém um grande número de estados microscópicos de um sistema, esses estados microscópicos tem uma mesma condição macroscópica. Uma assembleia estatística é caracterizada por uma função de distribuição $\rho(p, q, t)$. Esta é a densidade de probabilidade dos sistemas no espaço de fase, de forma que (SNELL; GRINSTEAD, 2006):

$$dw = \rho(p, q, t) dp dq \quad (2.11)$$

seja a probabilidade de um sistema da assembleia de Gibbs no elemento do espaço de fase $dp dq$ ao redor do ponto $(p, q) \equiv (q_1, \dots, q_N, p_1, \dots, p_N)$, no momento t se realizar. Essa função, por se tratar de uma probabilidade, deve satisfazer a condição de normalização:

$$\int dp dq \rho(p, q, t) = 1 \quad (2.12)$$

conhecendo essa função $\rho(p, q, t)$ podemos calcular ou a média de fase ou a média de tempo da função $f(p, q)$. A média de $f(p, q)$ descreve uma propriedade física macroscópica do sistema que dependa da posição e do momento das partículas que constituem o sistema (SNELL; GRINSTEAD, 2006). Essa média é chamada média de fase. Ambas as médias são equivalentes na prática.

Um sistema pode ser subdividido em um número de subsistemas que pouco interagem entre si e podem, para um intervalo de tempo significativo, serem considerados isolados. Eles são, nesse caso, estatisticamente independentes.

Um dos postulados fundamentais da mecânica estatística é que a distribuição de um subsistema não é afetada pelas condições iniciais dos outros subsistemas e nem pelas suas próprias condições iniciais.

2.2.2 Livre caminho médio

É a distância média entre as colisões de uma partícula. Livre caminho médio é a distância média que uma partícula percorre antes de colidir com outra partícula num gás. É dado por: (PILLACA, 2011):

$$\lambda = \frac{1}{\sigma(g)n} \quad (2.13)$$

onde, σ é a seção de choque, considerando as duas partículas colidindo como esferas maciças (a seção de choque é a área efetiva da colisão), g é a velocidade relativa entre as partículas colidindo e n é a densidade do gás.

2.2.3 Equação de Boltzmann

A equação de Boltzmann é a base para deduzir conjuntos de equações de transporte e da teoria cinética. Seu foco é a distribuição das partículas num gás. Algumas simplificações costumam ser feitas quando essa equação é aplicada, de acordo com a situação estudada. Ela descreve a evolução de f num regime no qual colisões importam (SCHUNK; NAGY, 2009) sujeito a uma força externa:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f + \vec{a} \cdot \nabla_v f = \frac{\delta f}{\delta t} \quad (2.14)$$

onde ∇_v é o operador gradiente no espaço de velocidade e $\frac{\delta f}{\delta t}$ representa o efeito das colisões e será dada pela integral de colisão de Boltzmann, $\vec{v}$ é o vetor velocidade descrito na figura 2 ao redor do qual estão os elementos de volume d^3v e $\vec{a}$ o vetor aceleração. O termo $\frac{\delta f}{\delta t}$ representa o efeito das colisões.

Como as principais forças agindo nas partículas na ionosfera são a gravitacional e a de Lorentz, o vetor aceleração fica:

$$\vec{a}_s = \vec{G} + \frac{e_s}{m_s}(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.15)$$

sendo G a aceleração da gravidade, B o campo magnético, E o campo elétrico, e_s a carga da espécie s e m_s a massa da espécie s .

Algumas propriedades físicas macroscópicas de uma espécie do gás podem ser obtidas tirando os momentos de velocidade da função f . Calcular os momentos de velocidade quer dizer multiplicar a f por uma potência ou produto da velocidade e integrar ao longo de todas as velocidades (SCHUNK; NAGY, 2009).

2.2.4 Distribuição de Maxwell-Boltzmann

Um sistema de partículas clássicas em equilíbrio térmico e sem a presença de campo externos, segundo a mecânica clássica, terá a velocidade das suas partículas descrita pela distribuição de Maxwell-Boltzmann, independentemente das interações entre partículas (SOTO, 2016). Ela é uma distribuição isotrópica e é definida de forma a fornecer o número de partículas que tem uma velocidade particular. É da forma (SOTO, 2016):

$$f(v) = n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} \quad (2.16)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura. A distribuição Maxwelliana porém é simples demais para caracterizar uma espécie do gás na ionosfera por não considerar os processos de tensão e de fluxo de calor. Esses efeitos são incluídos quando usamos o sistema de equações dos 13 momentos da distribuição. Esse sistema de equações porém escapa ao escopo desse trabalho.

2.2.5 Frequência de colisão

É a frequência com que uma partícula num gás colide com outras partículas num intervalo de tempo. Essa frequência de colisão é função das dimensões da partículas, da densidade de partículas do gás e da temperatura.

A frequência de colisão das partículas das espécies t e s no caso de colisões binárias e elásticas num gás pode ser dada pela integral de colisão de Boltzmann (SCHUNK; NAGY, 2009):

$$\frac{\delta f_s}{\delta t} = \int \int d^3 v_t d\Omega g_{st} \sigma_{st}(g_{st}, \theta) (f'_s f'_t - f_s f_t) \quad (2.17)$$

Onde,

$d^3 v_t$ é o elemento de volume no espaço de velocidade para a espécie alvo t ;

$g_{st} = |v_s - v_t|$ é a velocidade relativa das partículas colidindo s e t ;

$d\Omega$ é o elemento do ângulo sólido no sistema de referência dos centros de massa das partículas colidindo;

θ é o ângulo de espalhamento no referencial dos centros de massa;

$\sigma_{st}(g_{st}, \theta)$ é a seção plana do espalhamento diferencial, definida como o número de moléculas espalhadas pelo ângulo sólido $d\Omega$, por unidade de tempo, dividida pela intensidade incidente;

$f_s(\vec{r}, \vec{v}_s, t)$ é a função densidade de distribuição que descreve a velocidade de cada espécie diferente num gás misto. $\vec{r}, \vec{v}_s, t$ são variáveis independentes que representam respectivamente posição, velocidade e tempo.

Essa integral pode ser aplicada tanto para colisões de partículas da mesma espécie quanto de espécies diferentes. Ela se aplica às colisões de Coulomb, colisões elásticas entre íons e partículas neutras, colisões entre diferentes espécies de partículas neutras e a interações de troca de carga ressoantes entre íons e seus parentes neutros, além de poder ser usada para colisões ressoantes (SCHUNK; NAGY, 2009).

2.3 Plasma

Começamos pela definição de plasma. Segundo Chen (2015) e Meyer-Vernet (2007) plasma é um gás quasi-neutro composto de partículas neutras e de um número quase igual de íons e elétrons e com comportamento coletivo. No plasma, devido aos campos elétricos e magnéticos, elementos do sistema exercem força um sobre os outros mesmo a longas distâncias. Comportamento coletivo nesse contexto significa que o deslocamento das partículas depende não apenas das condições locais mas também da situação em regiões remotas do plasma. Diferente de um gás neutro as partículas não interagem somente durante as colisões. Essas propriedades decorrem do imenso número de partículas carregadas que compõe o plasma e que interagem através de campos elétricos (PIEL, 2017).

A Ionosfera é um plasma fracamente magnetizado. Num plasma a velocidade de deriva pode ser usada para definir a densidade de corrente. As forças que agem na ionosfera, tais quais as por trás da maré atmosférica, movimentam as partículas de forma a gerar campos elétricos que por sua vez alteram a dinâmica do plasma.

O comportamento do plasma vai depender dos tipos de interações que ocorrem nele, um exemplo disso são as interações entre partículas carregadas que seguem as leis de Coulomb.

2.3.1 Parâmetros do Plasma

Um gás é caracterizado pela equação dos gases, isto é, pelas componentes de densidade, temperatura e pressão, da mesma forma, um Plasma é caracterizado pelos parâmetros tratados a seguir.

2.3.1.1 Distância de Debye

Distância máxima que o campo elétrico de uma partícula consegue afetar a outra. Para distâncias maiores, o comportamento e efeitos coletivos dominam (KAMIDE; CHIAN, 2007; PILLACA, 2011). Ela é dada por:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{n_e e^2}} \quad (2.18)$$

Onde,

e é a carga do elétron;

ϵ_0 é a permissividade do vácuo;

k_B é a constante de Boltzmann;

T é a temperatura do elétron.

Para um gás ser considerado plasma a dimensão do meio deve ser muito maior que a distância de Debye (PILLACA, 2011; CHEN, 2015). Temos como requerimento pro gás ser plasma que $\lambda_D \ll L$, Onde L é o tamanho do sistema, e $N_D \gg 1$, onde N_D é o número de partículas na esfera de Debye, sendo que neste caso o efeito coletivo das partículas domina.

2.3.1.2 Frequência de Oscilação

Um plasma será considerado neutro quando sua frequência de oscilação, ou a frequência do plasma, for significativamente maior que as frequências de colisão. Uma perturbação instantânea num plasma causa uma oscilação que resulta do movimento das partículas carregadas no sentido de restaurar a neutralidade. Essa oscilação tem uma frequência que é chamada de *frequência do plasma* e depende das espécies que compõem o plasma. temos que como parte da definição de plasma que $\omega\tau > 1$ sendo ω a frequência típica de oscilação do plasma e τ o tempo médio entre as colisões.

2.3.1.3 Quasi-neutralidade

Para distâncias maiores que a de Debye o plasma é quasi-neutro, isto é:

$$n_e \approx n_i \approx n \quad (2.19)$$

Os plasmas podem ser de dois tipos: ionizado e parcialmente ionizado. Ele é parcialmente ionizado ou fracamente ionizado quando há um grande número de partículas neutras. Caso no qual interações entre partículas carregadas e neutras se sobrepõem às interações Coulomb (BITTENCOURT, 2004; ROBSON; WHITE; HILDEBRANDT, 2017). Quando as colisões Coulomb se tornam dominantes o plasma é dito fortemente ionizado e quando todas as partículas estão sujeitas a múltiplas colisões Coulomb, ele é dito Completamente ionizado (BITTENCOURT, 2004).

2.3.2 Magnetização

Um plasma é dito magnetizado quando um campo magnético do ambiente pode alterar a rota das suas partículas, na ionosfera isso ocorre quando a frequência de colisão é baixa o bastante para permitir um campo magnético influenciar a rota dos íons e elétrons que o constituem.

2.3.3 Temperaturas do Plasma

O plasma pode ter mais de uma temperatura a depender de suas frequências de colisão, por exemplo se as frequências de colisão dos íons entre si e dos elétrons entre si for maior que a frequência de colisão entre íons e elétrons ou como é no caso da Ionosfera (CHEN, 2015), os elétrons perderem energia através de colisões de Coulomb com os íons aquecendo a parcela do gás de íons (BILITZA et al., 2022) e da presença de um campo magnético, que pode restringir a movimentação das partículas carregadas. Como a massa dos elétrons é significativamente menor que a dos íons, variações na energia térmica afetam mais a temperatura dos elétrons.

Nesse trabalho é considerado que a temperatura é constante num ponto, não estamos trabalhando com equações do calor.

2.3.4 Colisões

As colisões são muito importantes para entender o comportamento dos plasmas. Elas são responsáveis por processos de ionização e afetam a difusão do gás, por exemplo. A natureza do processo de colisão depende dos tipos de partícula colidindo e da energia cinética relativa entre as partículas. Num plasma, é importante lembrar que existem forças externas à colisão agindo sobre as partículas carregadas como por exemplo a força de Coulomb.

Neste trabalho lidaremos somente com colisões binárias. As colisões binárias são colisões entre duas partículas e podem ser de dois tipos: Elásticas e Inelásticas. Nas colisões *elásticas* há conservação de massa, momento e energia. Nessas colisões não há alteração no estado interno das partículas (PILLACA, 2011). Isto é, não há alteração na velocidade, momento ou massa das partículas colidindo. A colisão Coulomb é um tipo de colisão elástica. Nas colisões *inelásticas* essa conservação não ocorre e podem ocorrer alterações no estado interno das partículas e até a criação de novas partículas. Esse tipo de colisão é importante principalmente em gases completamente ionizados (PILLACA, 2011). Ocorrem quando uma ou ambas as partículas tem estrutura interna, esta possibilita mudanças nos níveis energéticos durante a colisão (ROBSON; WHITE; HILDEBRANDT, 2017).

As colisões podem ser também ressoantes e não-ressoantes. As colisões ressoantes são entre um íon e seu parente neutro e são consideradas pseudo-elásticas. As colisões ressoantes predominam em temperaturas mais altas, maiores que 600 K (IEDA, 2020).

As partículas num gás não realizam uma única colisão, mas sim uma série de colisões. A quantidade de colisões por unidade de tempo é chamada de frequência de colisão e, a grosso

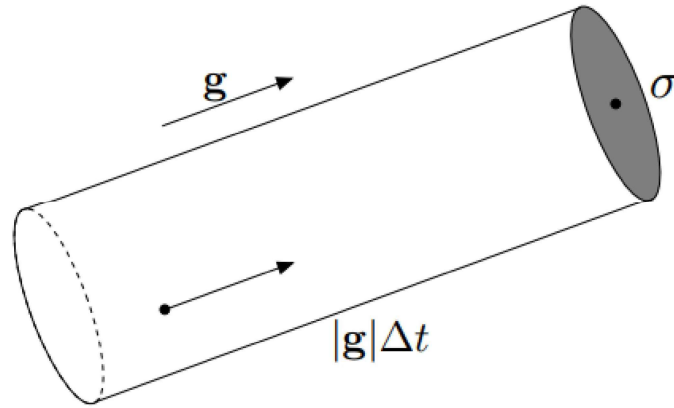


Figura 4 – Cilindro de colisão dentro do qual as moléculas tem que estar para sofrer uma colisão.
Fonte: Soto (2016)

modo, considerando a colisão entre duas partículas esféricas, é dada pela seguinte expressão (SCHUNK; NAGY, 2009):

$$v = n\sigma(g)g \quad (2.20)$$

Sendo, v a frequência de colisão, $\sigma(g)$ é a seção de choque (i.e. *cross section*), g é a velocidade relativa entre as partículas neutras e os elétrons (a velocidade será diferente para elétrons diferentes) e n é a densidade do gás. Isso implica que partículas diferentes tem frequências de colisão diferentes. Uma abordagem estatística se faz necessária para obter o valor médio da frequência de colisão de cada espécie no gás.

As colisões de elétrons e partículas neutras e de íons com partículas neutras são de especial interesse em alturas mais baixas, onde a densidade do ar é maior.

2.4 Ionosfera

Nossa área de estudo é a Ionosfera, portanto é importante entender pelo menos algumas de suas características. Principalmente as características elétricas. Primeiramente, a Ionosfera é a parcela da atmosfera que vai de 60 km até 1000 km de altura (HARGREAVES, 1992). Ela se comporta como um plasma magnetizado e fracamente ionizado. Isso decorre também do fato que acima de 80 km as taxas de recombinação não são suficientes para eliminar os íons (HARRISON, 2004; KELLEY; HEELIS, 1989). Ela apresenta uma estratificação horizontal devido a gravidade e à forma que a radiação ultravioleta extrema é absorvida pela atmosfera. Enquanto plasma pode ser entendida como uma mistura de três gases, um de partículas neutras, um de íons positivos e outro de elétrons. Dizer que a ionosfera é um plasma é também assumir a quasi-neutralidade: a densidade numérica de íons, n_i , é quase igual a de elétrons, n_e , isto é $n_i \cong n_e$. O principal processo de gerar partículas carregadas é a fotoionização por radiação solar Ultra Violeta (KELLEY, 2015; SCHUNK; NAGY, 2009).

2.4.1 Estrutura da ionosfera

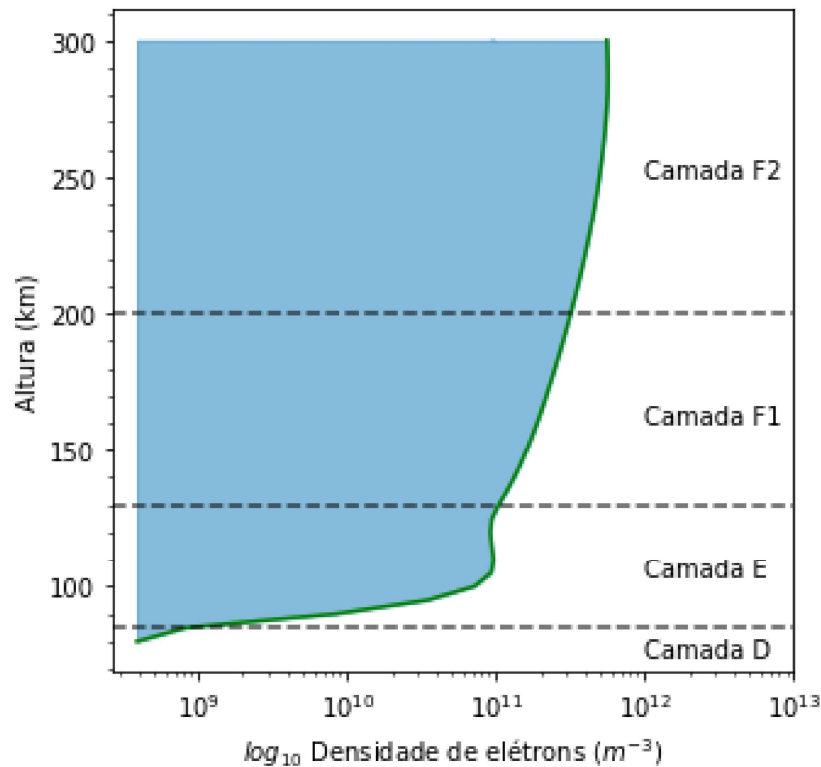


Figura 5 – Perfil da densidade de elétrons na Ionosfera.

A ionosfera apresenta uma estratificação horizontal, separada em camadas de acordo com a densidade de elétrons. São três camadas D, E e F que é subdividida em F_1 e F_2 conforma a figura 5.

2.4.1.1 Camadas

A camada D está na base, ela vai de 60 km até 85 km de altitude. Nela a maior parte da ionização ocorre por meio da radiação solar. Dessa forma é a mais sensível à atividade solar. Essa camada à noite desaparece. A primeira parte da camada D sofre principalmente ionização por raios cósmicos. A ionização nessa região sofre influência, em todas as latitudes, da precipitação de elétrons vindos dos cinturões de radiação de Van Allen (influência da magnetosfera) (SCHUNK; NAGY, 2009).

A camada E é parte de 85 km até 150 km, nessa região os íons O_2^+ e NO^+ dominam (KAMIDE; CHIAN, 2007) conforme a figura 6. Se nós combinarmos NO^+ e O_2^+ num íon molecular M^+ podemos dizer $n_M = n_e$ (KAMIDE; CHIAN, 2007) como esperado para um plasma. A maior parte da ionização que acontece aqui se deve aos raios X e aos comprimentos de onda longos da radiação UV (BANKS; KOCKARTS, 1973; KAMIDE; CHIAN, 2007; SCHUNK; NAGY, 2009). A concentração de plasma é máxima ao meio dia e mínima à noite. As colisões entre partículas carregadas também não são relevantes (SCHUNK; NAGY, 2009). A camada F

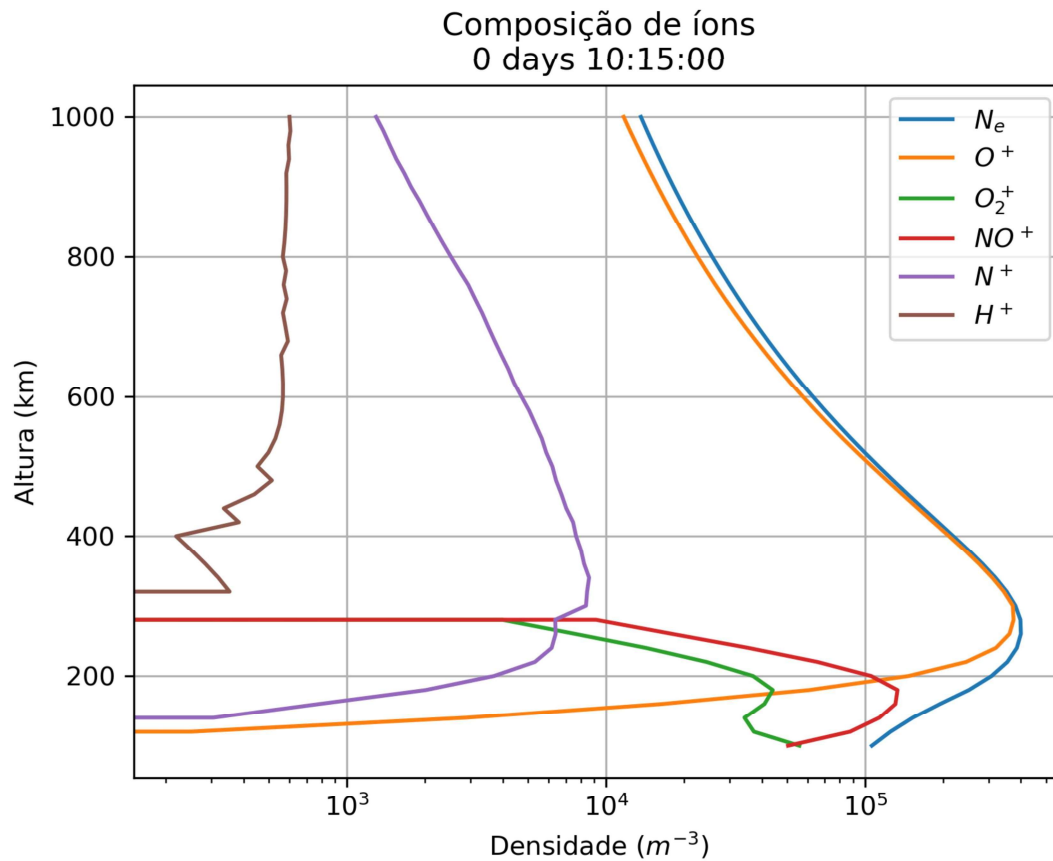


Figura 6 – Composição dos íons da atmosfera retirada do IRI usando o programa CondIono2.

está entre 150 km e 1000 km e pode ser subdividida em F1, que está entre 150 km e 400 km, e F2 que fica acima de 400 km. A primeira região tem um comportamento similar ao da camada E porém o plasma é *parcialmente ionizado*. Isso que as colisões de partículas carregadas com as neutras passa a ser relevante (BANKS; KOCKARTS, 1973). Na segunda região, F2, o íon O^+ se torna dominante (KAMIDE; CHIAN, 2007). O topo da camada F é a região onde a densidade do íon O^+ é menor que a do íon H^+ , isto é, a base da protonosfera (STUBBE; HAGFORS, 1997).

2.5 Campo Magnético Terrestre

O Campo Magnético Terrestre, CMT, tem origem no núcleo da Terra e nos protege do clima espacial, dos efeitos do vento solar e dos raios cósmicos galácticos por exemplo. Ele impede a entrada de partículas do Vento Solar e Raios Cósmicos que são fatais para a vida. Ele pode ser aproximado por um dipolo levemente inclinado a até alguns raios terrestres de distância. Uma descrição mais precisa do campo como a do IGRF passa por uma aproximação usando harmônicos esféricos. A partir de alguns raios o campo é deformado por consequência da interação do CMT com o campo magnético interplanetário, CMI, e o Vento Solar.

O Vento Solar é um fluxo de plasma aquecido que emana constantemente do Sol. Ele regula a entrada de raios cósmicos galácticos e transmite os efeitos da atividade solar à Terra (KAMIDE;

CHIAN, 2007). Em condições específicas ocorre o fenômeno da reconexão magnética e partículas do Vento Solar conseguem entrar dentro do CMT pelos polos, onde as linhas de campo são abertas, alterando a condutividade elétrica na região. Nas regiões onde o campo difere de um dipolo fluem correntes elétricas. Mesmo onde o CMT pode ser considerado dipolar existem regiões nas quais o campo diverge do esperado. Chamamos essas regiões de anomalias. A região onde o CMT atinge seus menores valores chama-se Anomalia Magnética do Atlântico Sul ou SAMA. Nela as linhas de campo atingem alturas menores de sorte que as partículas são erodidas e se precipitam na atmosfera.

O CMT funciona como uma barreira, nos protegendo do clima espacial, do campo magnético interplanetário e do Vento Solar. O CMT age defletindo as partículas carregadas do Vento Solar que o atingem mandando os íons na direção do pôr do Sol e os elétrons na direção do nascer do Sol (KELLEY; HEELIS, 1989).

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais

A área de estudo deste trabalho é a ionosfera terrestre. Entende-se por Ionosfera a região da atmosfera entre 80 km e 1.000 km de altura. Os cálculos, a princípio, serão feitos com dados de períodos de dia calmo, nos quais a atividade geomagnética é baixa. Um dos objetivos

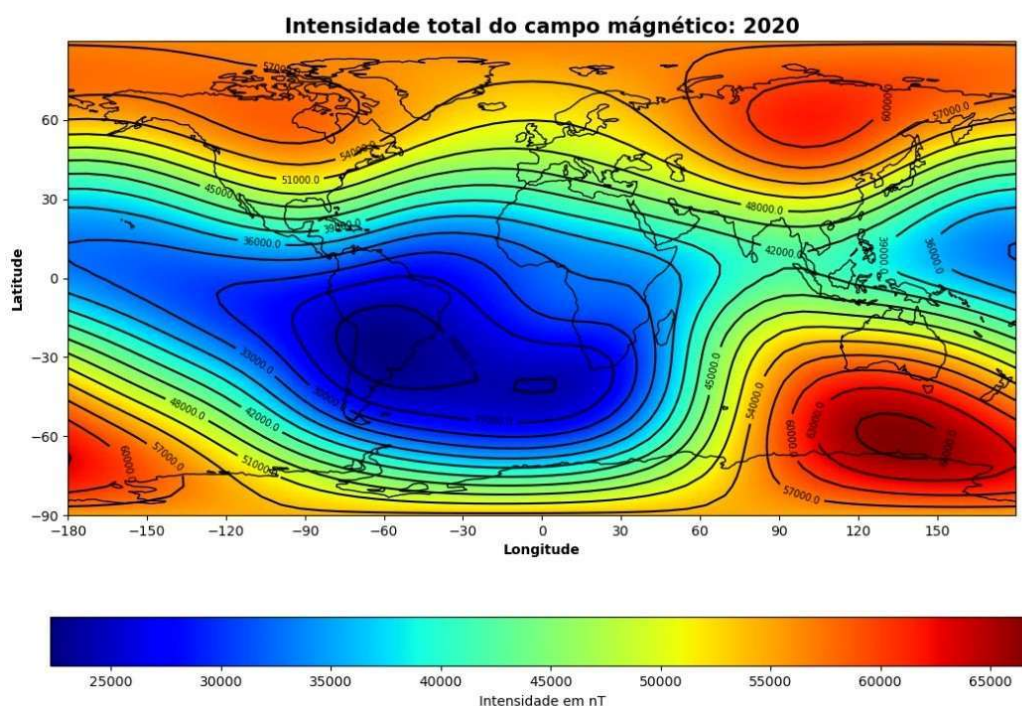


Figura 7 – Imagem com as intensidades do campo geomagnético no ano de 2020 com dados do modelo IGRF 13. É possível notar os baixos valores do campo magnético na região por sobre o Brasil. Dados retirados do site do NOAA (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfgrid> ; Acesso: 10 de jul. de 2025) .

desse trabalho é desenvolver um código para calcular as condutividades de Hall e Pedersen na Ionosfera.

Usamos como base para desenvolver esse software, o programa CondIono (OLIVEIRA, 2021). As condutividades serão calculadas usando dados retirados dos modelos: *International Reference Ionosphere*, IRI 2016, *NRLMSIS 2.0 atmosphere model* e o *International Geomagnetic Reference Field*, IGRF 13.

3.1.1 Programa CondIono

O programa CondIono foi desenvolvido em python, uma descrição das formulações dele pode ser encontrada em Oliveira (2021). Ele usa os modelos citados no parágrafo anterior para realizar seus cálculos. O programa apresenta algumas limitações, a principal sendo: ele só consegue calcular valores de condutividade de Hall e Pedersen confiáveis a até aproximadamente 130 km de altura. Ele também só calcula valores num ponto. O que é insuficiente para representar a Ionosfera com um todo. Daí segue que ele precisará ser alterado para que possa calcular mapas e para que possa calcular condutividade ao longo de toda atmosfera.

3.1.2 Modelos

Não será feita coleta de dados. Os dados a serem usados nos cálculos virão dos modelos: *International Reference Ionosphere*, IRI, *NRLMSIS 2.0 atmosphere model* e do *International Geomagnetic Reference Field*, IGRF 13. Eles são modelos empíricos, sendo o IRI, um modelo da ionosfera, o NRLMSIS 2.0, um modelo da atmosfera neutra, e o IGRF, um modelo do campo geomagnético principal. Modelos empíricos descrevem o comportamento espaço-temporal médio das observações de variáveis da atmosfera (EMMERT et al., 2021) e tem a vantagem de não dependerem do nosso conhecimento quanto a processos ionosféricos (BILITZA et al., 2022), servindo para testar novas técnicas.

3.1.2.1 IRI

O IRI, *International Reference Ionosphere*, é uma síntese de quase todos os dados disponíveis referentes a ionosfera. Ele tem uma alta densidade de dados nas médias latitudes do hemisfério norte, porém em altas e baixas latitudes sua performance não é tão boa (BILITZA, 2018; BILITZA et al., 2022). Os dados de entrada do modelo são: índices de atividade solar (F10.7 diário, 81-dias e média dos últimos 12 meses; e a média dos últimos 12 meses do número de manchas solares), índices ionosféricos (a média de 12 meses do índice IG de ionossonda) e índices magnéticos (ap 3-h, ap diário). Esses índices, bem como outros parâmetros adicionais, são achados pelo próprio IRI para uma hora e data especificados pelo usuário. Os valores de saída são: densidade de elétron, temperaturas dos elétrons, íons e partículas neutras e composição iônica (O^+ , H^+ , He^+ , N^+ , NO^+ , O_2^+ e cluster de íons) para alturas entre 50 km e 2.000 km em todo o globo (BILITZA, 2018). A temperatura das partículas neutras do IRI vem do modelo NRLMSISE-00 (BILITZA, 2018). O modelo está disponível no site: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php (acesso: 10 de jul. 2025).

Do IRI, usaremos os dados referentes à densidade dos íons O^+ , O_2^+ e NO^+ , à densidade numérica de elétrons e à temperatura dos elétrons, íons e partículas neutras.

3.1.2.2 NRLMSIS 2.0

O NRLMSIS 2.0 é um modelo empírico da atmosfera que vai desde o solo até a exobase escrito em FORTRAN 90. O modelo recebe como parâmetros de entrada: data, hora do dia, coordenadas (podendo estas serem geográficas ou geomagnéticas), altitude, atividade solar e atividade geomagnética (EMMERT et al., 2021) e tem como saída perfis das: temperatura exosférica, temperatura das partículas neutras $T(z)$, densidade numérica das espécies em equilíbrio na temperatura $T(z)$: He , O , N_2 , O_2 , Ar , H e N , densidade da massa total e a densidade numérica do oxigênio anômalo. Esses perfis podem ser de altitude ou ao longo do tempo. O modelo NRLMSIS 2.0 pode ser acessado no site: <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/nrlmsis/> (acesso: 10 jul. 2025).

A princípio, usaremos do modelo NRLMSIS 2.0 as densidades numéricas das espécies N_2 , O_2 e O .

3.1.2.3 IGRF

O modelo IGRF 13, representado na figura 7, descreve, empiricamente, o campo magnético terrestre principal e sua variação secular no período entre 1990 e 2020 (ERWAN et al., 2015; ALKEN et al., 2020) e faz uma previsão da sua variação secular até o ano 2025. Esse modelo é atualizado a cada 5 anos por conta das variações do campo magnético terrestre. O modelo pode ser acessado no site: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/igrf_vitmo.php (acesso: 10 jul. 2025).

Os dados do IGRF que vamos usar são os de intensidade do campo magnético.

É o modelo do campo geomagnético terrestre. Ele é válido até 5 raios terrestres de distância, a partir dessa distância a influência do vento solar não pode ser desprezada (SONI; KAKAD; KAKAD, 2022).

3.1.2.4 Condlono 1

O código do Condlono 1 foi usado como base para o Condlono 2. Ele foi desenvolvido para calcular a condutividade da ionosfera. Ele faz perfis para um ponto na Terra de cada vez. Recebe dados dos modelos IGRF, IRI e NRLMSISE. Ele só lê dados no formato de texto formatado. Tem uma estrutura simples porém pouco modular, de modo que é difícil expandir o código e implementar novas funções. O código é extensamente comentado para facilitar a leitura de outros usuários e programadores. O programa apresenta uma limitação quanto a altura que consegue calcular as condutividades corretamente que é cerca de 150 km. Considerando essas limitações, só receber dados no formato de texto, calcular valores só em pontos individuais, estrutura pouco modular e limite de altura para os cálculos conclui-se que o programa pode melhorar.

3.2 Métodos

Nesse trabalho calcularemos os perfis das condutividades de Pedersen e Hall na região da AMAS e em outros pontos de latitudes semelhantes para posteriormente analisá-los. Isso será feito usando um software a ser desenvolvido durante o trabalho. Esse software será programado em Python usando as formulações encontradas em Adachi et al. (2017) para o cálculo das condutividades 3.1 e 3.2:

$$\sigma_P = \frac{N_e e}{B} \left[\frac{\omega_e \nu_{en}}{\omega_e^2 + \nu_{en}^2} + p_{i1} \frac{\omega_{i1} \nu_{i1n}}{\omega_{i1}^2 + \nu_{i1n}^2} + p_{i2} \frac{\omega_{i2} \nu_{i2n}}{\omega_{i2}^2 + \nu_{i2n}^2} \right] \quad (3.1)$$

$$\sigma_H = \frac{N_e e}{B} \left[\frac{\omega_e^2}{\omega_e^2 + \nu_{en}^2} - p_{i1} \frac{\omega_{i1}^2}{\omega_{i1}^2 + \nu_{i1n}^2} - p_{i2} \frac{\omega_{i2}^2}{\omega_{i2}^2 + \nu_{i2n}^2} \right] \quad (3.2)$$

Nas quais,

N_e é a densidade de elétrons em m^{-3} ;

ω_i e ω_e são as giro-frequências angulares de íons e elétrons em Hz;

ν_{in} e ν_{en} são as frequências de colisão entre íons e partículas neutras e entre elétrons e partículas neutras, respectivamente, em Hz;

p_{i1} e p_{i2} são parâmetros da contribuição relativa das espécies iônicas;

σ_P e σ_H são as condutividade de Pedersen e as condutividade de Hall respectivamente, em S/m.

Segue-se à escrita do programa sua validação, isso será feito comparando os resultados obtidos ao de outros programas conforme Denardini (2007) e com o esperado de acordo com a literatura (SCHUNK; NAGY, 2009; KELLEY, 2009).

Após validar o programa, uma análise dos resultados será feita comparando os perfis de condutividade elétrica obtidos no interior da anomalia, nas suas bordas e fora da anomalia em latitudes semelhantes.

Não consideramos equações do calor independentes, isso quer dizer que tratamos os perfis de temperaturas como quantidades dadas.

Essas equações derivam das equações de continuidade de Liouville.

3.3 Programa

O programa desenvolvido CondIono 2 foi escrito em Python3 e é separado em quatro partes: uma que lê os dados do IRI, NRLMSISE em .txt, uma que lê no formato NetCDF, uma que contém os módulos para cálculo do IGRF e uma para o cálculo da Condutividade. A estrutura do programa foi escolhida para ser o mais modular possível para facilitar o uso e a expansão do código. No formato atual, dados de texto e NetCDF são aceitos, contanto que devidamente formatados.

3.4 Programação

O programa CondIono 2 é uma biblioteca, escrita em Python3, para cálculo das condutividades de Hall e Pedersen na ionosfera, e também é capaz de calcular valores do IGRF. Ele lê dados em dois formatos: Network Common Data Form, NetCDF, data e txt. A ideia é ser uma coleção de classes que pode ser usada da forma mais livre possível. Seus cálculos se baseiam nas formulações de Adachi et al. (2017) que derivam das equações de transporte e de Maxwell e Boltzmann. Para realizar a leitura e processamento de dados utilizamos a biblioteca *xarray* e os multiindex da biblioteca *pandas*. Falar-se-à um pouco sobre estes por serem pouco usuais. O mesmo será feito com o NetCDF.

A função do programa que calcula a condutividade precisa como entrada das seguintes variáveis: temperaturas das partículas carregadas, elétrons e das partículas neutras em Kelvin, densidade numérica de elétrons, as densidades de N_2 , O_2 , O , NO^+ , O^+ e O_2^+ em m^{-3} , intensidade do campo magnético em Teslas. Esses valores são obtidos dos modelos NRLMSISE, IRI e IGRF.

3.4.1 O formato NetCDF

A Network Common Data Form, NetCDF, é uma coleção de bibliotecas de software e formatos de dados [*machine independent*] usados para criação, compartilhamento e acesso a dados orientados a *arrays*. Funciona também como um padrão da comunidade para o compartilhamento de dados científicos. Seus dados são caracterizados por serem (NETWORK. . . ,) :

1. Autodescritivo
2. Portável
3. Escalável
4. Arquivável
5. Compartilhável
6. Anexável

Para lê-los foi necessária uma biblioteca específica chamada *Xarray*. É uma biblioteca para trabalhar com dados n-dimensionais etiquetados (*labeled*). Ela foi usada para ler os dados NetCDF e convertê-los para a estrutura *DataFrame* do *pandas*. A biblioteca *pandas* é um biblioteca para análise e manipulação de dados. Para manejar os dados usamos o *Multindex* do *panda*. O *MultiIndex* é um objeto da biblioteca *pandas*, ele permite a utilização de índices hierarquizados em uma *Series* ou *DataFrame*. Ele foi usado nas tabelas para facilitar o acesso e o processamento dos dados considerando que eram dados multidimensionais e que o *DataFrame* é uma estrutura de dados bidimensional.

3.4.2 Jupyter notebook

Os notebooks são aplicações web de código aberto usados para criar e compartilhar documentos que contêm código, texto, imagens e equações, conforme a figura 8.

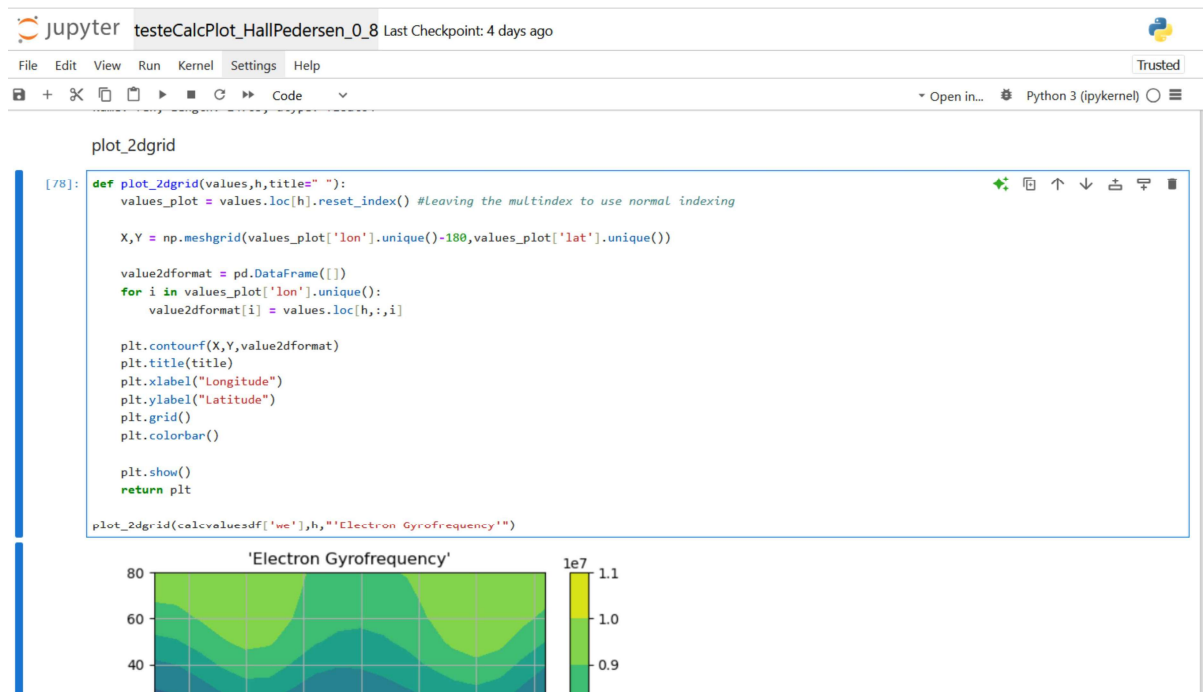


Figura 8 – Imagem de um dos jupyter notebooks incluídos no código.

4 Resultados

O primeiro resultado é o código em si disponível no GitHub (CONDIONO2-5, 2025) que envolve sete módulos mais os três do *pyigrf* e os *jupyter notebooks* com exemplos de como usar o código. O código de CondIono 2 é um desenvolvimento do software CondIono que será descrito inicialmente.

4.1 Estrutura do código

O primeiro código desenvolvido, denominado CondIono 1, possui sua arquitetura representada no organograma da figura 9. Nessa figura, cada retângulo identifica um módulo do programa, contendo o nome, a função principal e as classes implementadas. As linhas entre os módulos indicam as dependências e os pontos de interação entre eles. O programa é estruturado em três

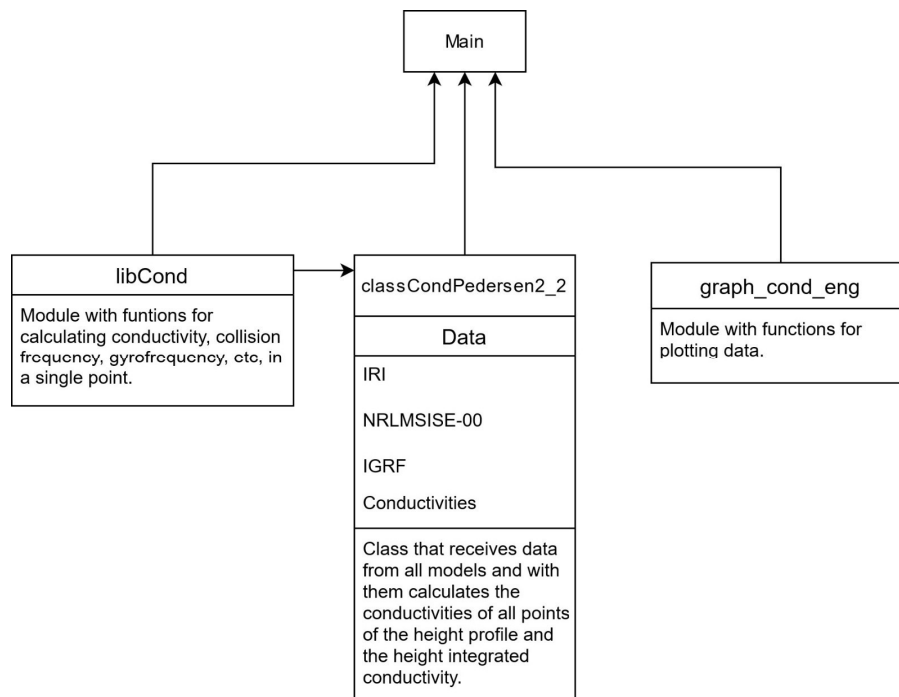


Figura 9 – Fluxograma da primeira versão do CondIono.

módulos principais: um responsável pela leitura dos dados de entrada, outro pelos cálculos das condutividades, e um terceiro voltado à visualização e plotagem dos resultados. O CondIono 1 é capaz de calcular os valores de condutividade ionosférica para um ponto específico no espaço geográfico.

Os dados utilizados são provenientes dos modelos empíricos IRI (International Reference Ionosphere) e NRLMSIS 2.0, obtidos em formato texto por meio de ferramentas online de extração de perfis atmosféricos. O modelo IGRF (International Geomagnetic Reference Field) também é utilizado para a determinação do campo magnético local.

O cálculo das condutividades de Hall, Pedersen e ao longo do campo magnético é realizado por meio das equações 3.1 e 3.2, além de uma terceira equação dedicada à condutividade longitudinal. As frequências de colisão necessárias são determinadas a partir das expressões 2.6, 2.7 e 2.8, que representam, respectivamente, as interações entre elétrons e neutrais, íons principais e neutrais, e íons pesados e neutrais.

Além dos cálculos numéricos, o CondIono 1 também oferece a funcionalidade de visualização gráfica dos perfis de condutividade ao longo da altitude, permitindo ao usuário avaliar diretamente a variação dos parâmetros físicos em diferentes camadas da ionosfera

O código de CondIono 2 segue a estrutura descrita na figura 10, com exceção dos módulos do grupo *pyIGRF* e das bibliotecas para ler os arquivos no formato *NetCDF* que dependem do *read_netcdf*, os módulos podem ser usados de forma independente. Isso foi feito para aumentar a modularidade da biblioteca. Foi criada uma estrutura para guardar os dados lidos pelas bibliotecas *irinetcdf* e *msisenetcdf*. Com exceção dos módulos *condutividade*, *freqcol* e *pyigrf* os módulos descritos na imagem servem para a leitura dos dados nos NRLMSISE e IRI. O módulo *condutividade* contém funções de plotagem e de cálculo das condutividades; o módulo *freqcol* contém as funções para cálculo das frequências de colisão e o *pyigrf* funções que servem para calcular o modelo IGRF.

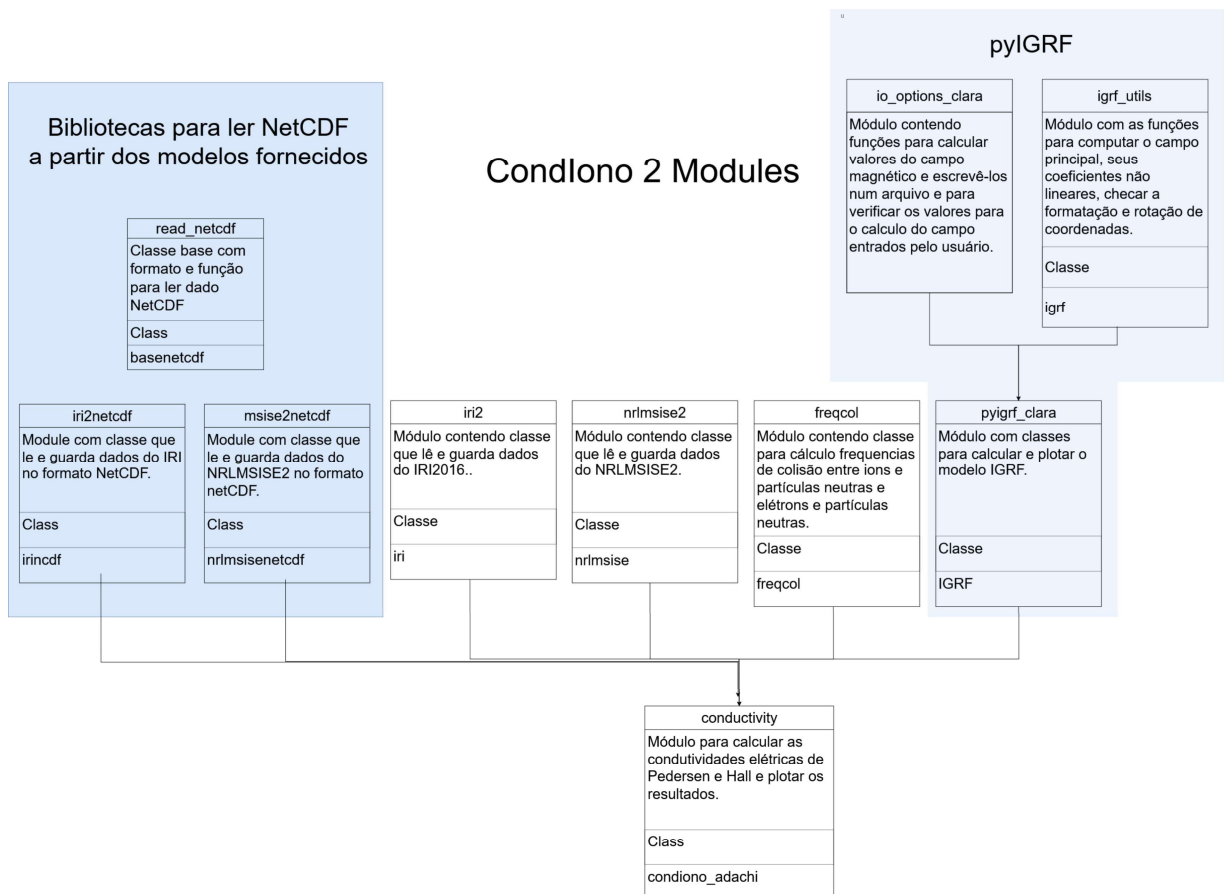


Figura 10 – Fluxograma da versão atual do CondIono 2.

O programa em sua segunda versão CondIono 2 (figura 10) consegue calcular os valores das

condutividades de Hall e Pedersen ao longo de todo o planeta como mostra a figura 11.

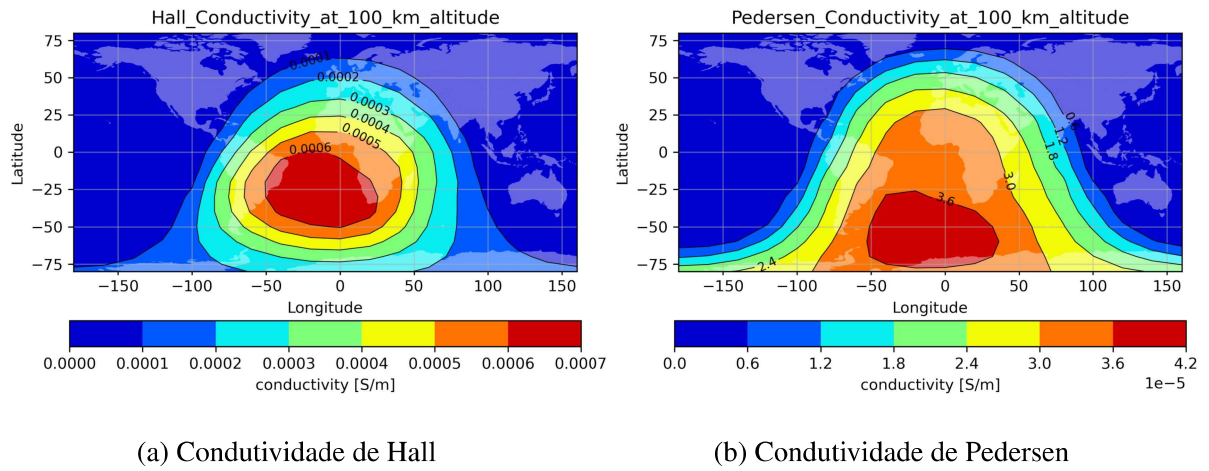


Figura 11 – Condutividades de Hall e Pedersen à 100 km de altitude às 00 UT no dia 01 de janeiro de 2008.

Além disso, o código permite que se trabalhe com diversos períodos de tempo, bem como permite a integração das condutividade pela altura, vide a figura 12.

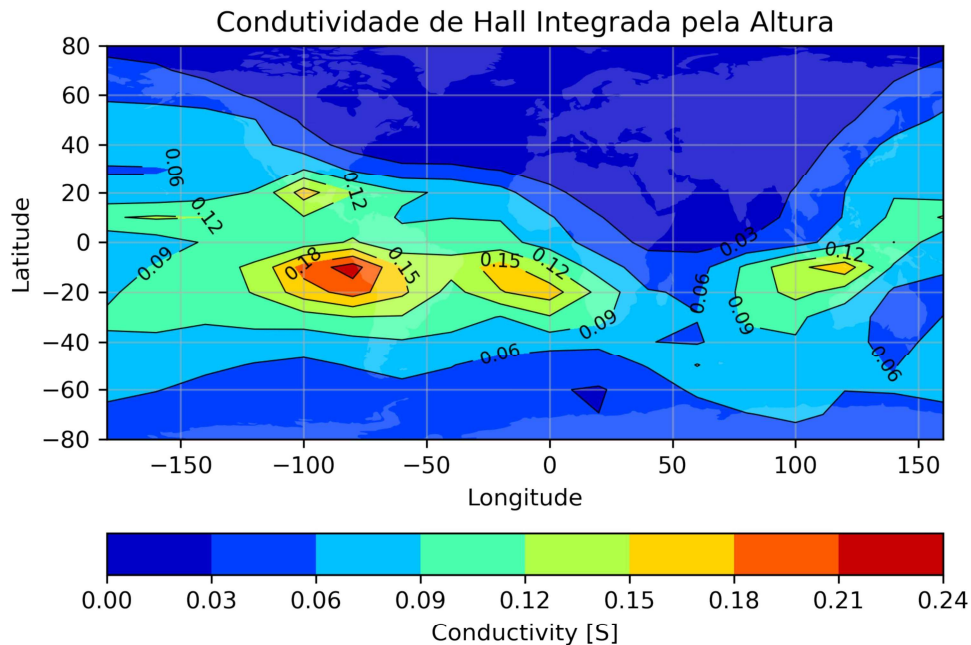


Figura 12 – Condutividade de Hall Integrada pela Altura à 100 km de altitude às 00 UT no dia 01 de janeiro de 2008.

Uma inovação deste novo código é a representação gráfica das girofrequências de colisão, que pode ser observada na figura 13.

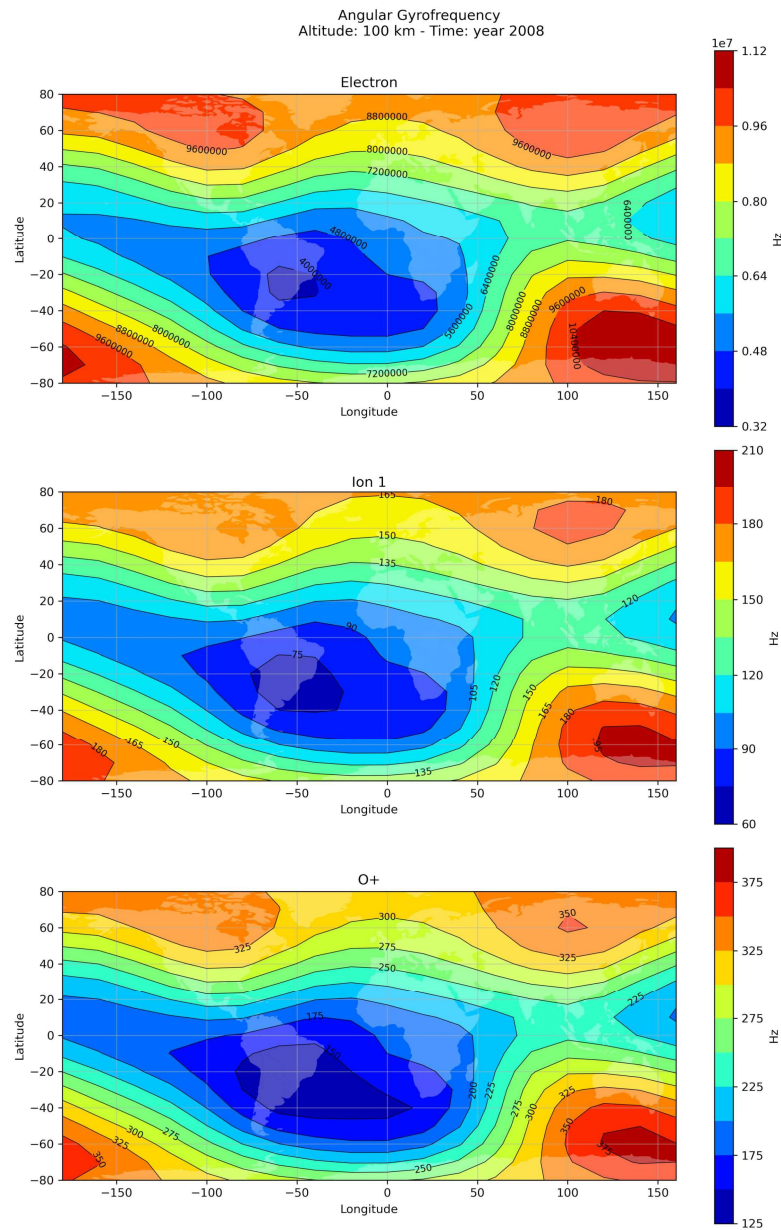


Figura 13 – Girofrequências calculadas usando CondIono2 para o ano de 2008.

O pacote desenvolvido é acompanhado por uma série de Jupyter Notebooks com exemplos práticos que auxiliam o usuário na utilização e personalização do código. Esses notebooks demonstram diferentes formas de executar os cálculos e interpretar os resultados, além de fornecerem rotinas para visualização gráfica dos parâmetros físicos. Um dos exemplos disponíveis ilustra como plotar os perfis de frequência de colisão entre partículas na ionosfera, conforme representado na Figura 14. Esses recursos tornam o pacote acessível mesmo para usuários com menor familiaridade com programação científica.

Durante o desenvolvimento do CondIono 2, identificamos limitações associadas à biblioteca pyIGRF, utilizada para calcular o campo magnético com base no modelo International Geomagnetic Reference Field (IGRF). Essa biblioteca apresenta efeitos de borda nos limites

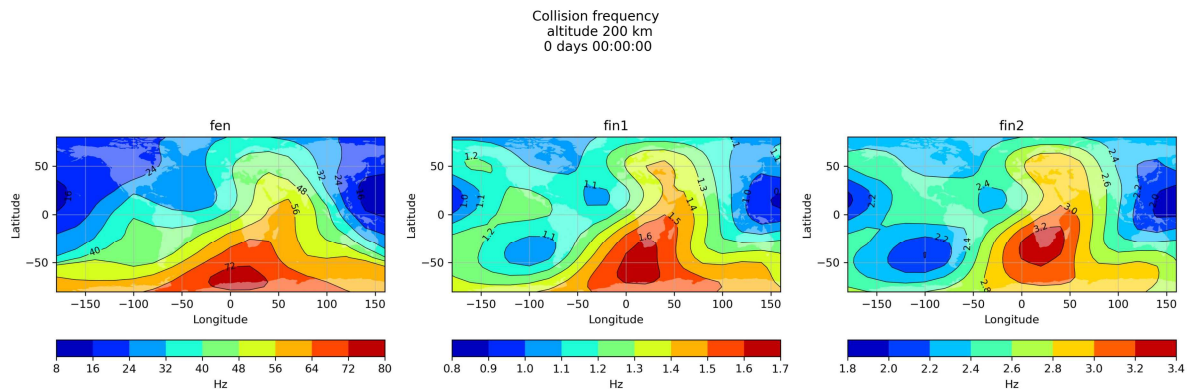


Figura 14 – Frequências de Colisão Calculadas para 100 km de altura no dia 01 de janeiro de 2008 às 00 UT.

do domínio espacial, o que inviabiliza o cálculo do campo magnético para pontos localizados exatamente na longitude de 90° e na latitude de 180° . Essa limitação decorre da forma como as derivadas espaciais são tratadas no algoritmo do pyIGRF, o que afeta o cálculo em regiões próximas às bordas da malha. Apesar disso, os demais pontos são processados pontualmente com boa confiabilidade, permitindo uma ampla cobertura espacial.

Em relação à modelagem da condutividade ionosférica, os cálculos realizados pelo CondIono 1 mostraram boa concordância com valores esperados até aproximadamente 150 km de altitude. Essa limitação altitudinal está diretamente relacionada às equações utilizadas para estimar as frequências de colisão entre íons, elétrons e partículas neutras, conforme descrito por Oliveira et al. (OLIVEIRA, 2021). Além disso, a formulação adotada nesse primeiro modelo mostrou-se mais representativa para regiões de médias latitudes, onde as aproximações empíricas das equações de condutividade são mais adequadas.

Embora o CondIono 2 represente um avanço significativo em termos de organização do código, modularização e integração com modelos atmosféricos e geomagnéticos atualizados, ele ainda herda algumas dessas limitações do modelo original. Em trabalhos futuros, pretende-se incorporar melhorias nas parametrizações de colisões e condutividades, com o objetivo de ampliar a faixa altitudinal de validade e aprimorar a aplicação do modelo em diferentes regiões geográficas, incluindo altas latitudes e a região equatorial.

5 Discussão e Conclusão

5.1 Comparação com o Modelo da Universidade de Kyoto

A Figura 15 apresenta os perfis de condutividade de Hall e Pedersen obtidos pelo CondIono 2 e pelo modelo da Universidade de Kyoto, até 300 km de altitude. Os dados utilizados referem-se ao dia 1º de janeiro de 2008, durante o mínimo solar, para o ponto geográfico de latitude 60° S e longitude 60° W, às 00:00 UTC. Observa-se que ambos os modelos apresentam máximos de condutividade de Pedersen em torno de 120 km, comportamento compatível com o perfil esperado da ionosfera inferior em latitudes médias sob condições de baixa atividade solar.

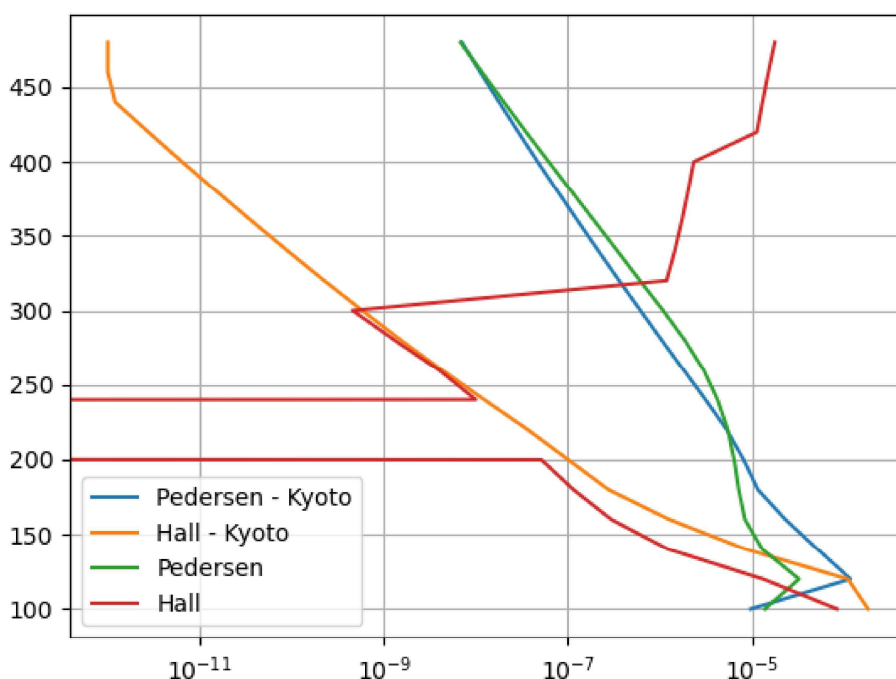


Figura 15 – Condutividade de Hall e Pedersen no dia 01 de Janeiro de 2008 às 00:00:00 UT. Localização latitude -60° e longitude -60°.

Embora haja concordância geral nos perfis até cerca de 150 km de altitude, os resultados obtidos com o CondIono 2 apresentam descontinuidades marcantes entre 200 km e 250 km, além de um segundo salto nos arredores de 300 km. Essas irregularidades não se manifestam no modelo de Kyoto e tampouco são previstas pela teoria física que rege o comportamento da condutividade na ionosfera, o que indica a presença de possíveis inconsistências associadas à implementação computacional do código, especialmente na manipulação dos dados de entrada ou no cálculo das frequências de colisão.

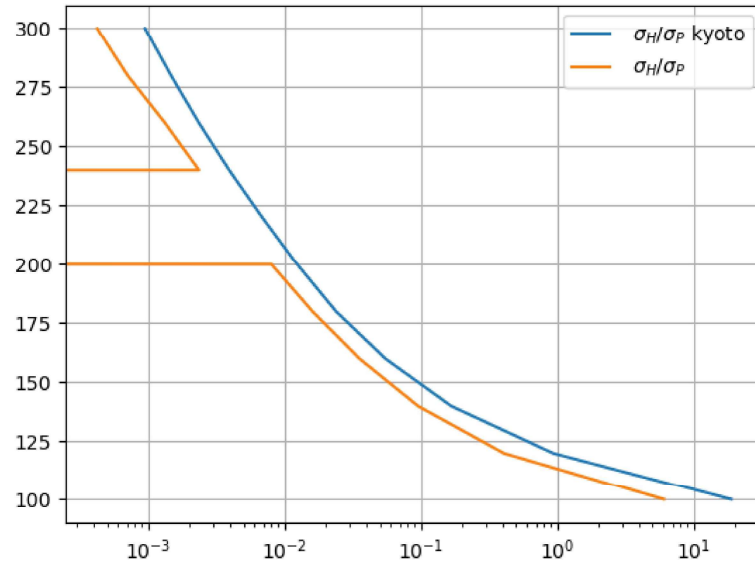


Figura 16 – Razão entre as condutividades de Hall e Pedersen.

A razão entre as condutividades de Hall e Pedersen, apresentada na Figura 16, não exibe descontinuidades evidentes nas mesmas altitudes. Esse resultado sugere que os desvios detectados afetam os valores absolutos das condutividades de forma aproximadamente proporcional, preservando a razão entre elas. Esse padrão é indicativo de que o problema pode estar relacionado a perturbações comuns aos dois componentes, como falhas na interpolação de densidade ou temperatura, e não a um erro específico nas equações físicas empregadas.

É importante destacar que os modelos utilizados como base para os cálculos são diferentes em cada implementação. O modelo de Kyoto emprega o IRI-2016 e o NRLMSISE-00, enquanto o CondIono 2 utiliza o IRI-2020 e o NRLMSIS 2.0, ambos em versões mais recentes. Embora essas atualizações tragam maior cobertura e refinamento nas estimativas atmosféricas, elas podem também introduzir variações nos perfis de densidade de partículas e temperatura, afetando os resultados, sobretudo em altitudes elevadas, onde os gradientes verticais são mais pronunciados e os dados são menos densamente amostrados.

A Figura 17 mostra a diferença entre os valores de condutividade de Pedersen obtidos pelo modelo de Kyoto e aqueles calculados pelo CondIono 2. Observa-se uma tendência de superestimação por parte do CondIono 2, especialmente acima de 150 km. Tais discrepâncias podem resultar de uma combinação entre diferenças nos modelos empíricos adotados e efeitos numéricos relacionados à interpolação de parâmetros físicos ou à ausência de mecanismos internos de suavização nos dados calculados.

Com base nesses resultados, infere-se que as equações utilizadas para o cálculo das condutividades de Hall e Pedersen (equações 3.1 e 3.2) não são a principal fonte das inconsistências observadas, uma vez que foram herdadas do CondIono 1, o qual apresentou bom desempenho em estudos anteriores (OLIVEIRA, 2021; ADACHI et al., 2017). Isso reforça a hipótese de que

as causas estejam relacionadas à forma como os dados de entrada — oriundos dos modelos IRI e NRLMSIS — são processados, interpolados e utilizados nas rotinas de cálculo das frequências de colisão.

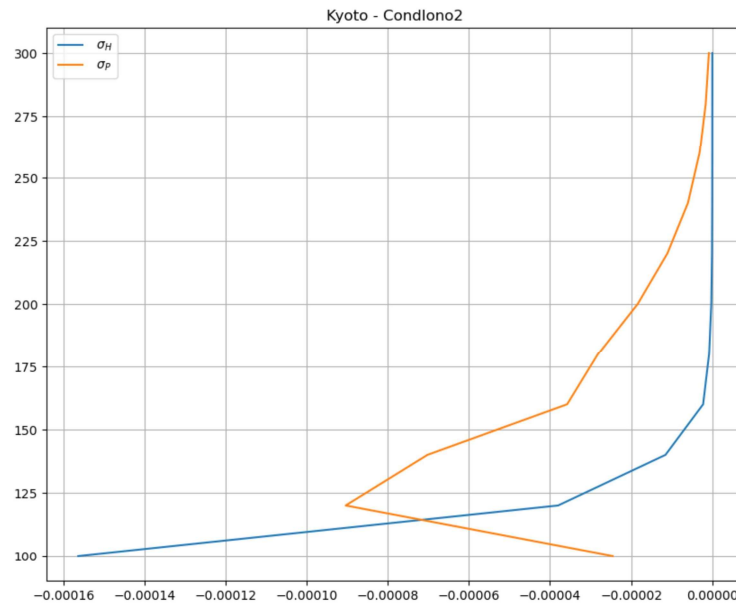


Figura 17 – Valores de condutividade do modelo de Kyoto subtraídos dos valores do CondIono 2.

Diante desse cenário, é recomendável reavaliar a estrutura de tratamento dos dados no CondIono 2, considerando a adoção de ferramentas mais apropriadas para manipulação de dados multidimensionais, como a biblioteca xarray. Essa abordagem pode facilitar o rastreamento de inconsistências e oferecer maior controle sobre a interpolação e o gerenciamento dos perfis verticais. Além disso, a implementação de rotinas de verificação automática de continuidade, bem como a realização de análises de sensibilidade sob diferentes condições espaciais e temporais, podem contribuir para aprimorar a estabilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos com o modelo.

6 Considerações Finais

Este trabalho teve como ponto de partida a necessidade de ferramentas computacionais que permitam calcular, de forma precisa e automatizada, os perfis de condutividade elétrica da ionosfera — em especial as componentes de Hall e de Pedersen — a partir de modelos empíricos amplamente aceitos na comunidade científica. Nesse contexto, foi desenvolvido o CondIono 2, uma biblioteca em Python que representa um avanço em relação ao seu antecessor, o CondIono 1, ao incorporar melhorias na estrutura modular do código, ampliar a faixa de altitudes analisadas e possibilitar a integração direta com os modelos IRI-2020, NRLMSIS 2.0 e IGRF-13.

A implementação do CondIono 2 permitiu a geração de perfis de condutividade mais completos e com maior cobertura altitudinal, superando a limitação anterior de 150 km imposta pelo CondIono 1. Além disso, a estrutura mais flexível e modular do código viabiliza a adaptação da biblioteca a diferentes contextos de pesquisa, como a análise de distúrbios eletrodinâmicos em regiões específicas da ionosfera ou a geração de mapas em diferentes horários e coordenadas geográficas.

A comparação com o modelo da Universidade de Kyoto evidenciou coerência nos resultados até aproximadamente 150 km de altitude, mas também revelou descontinuidades e divergências acima de 200 km, sobretudo na componente de condutividade de Pedersen. Essas anomalias, que não se manifestam no modelo de referência, apontam para limitações na etapa de interpolação ou no tratamento dos dados de entrada, e não nas equações físicas empregadas, que já foram validadas em versões anteriores do código.

Dentre as contribuições deste trabalho, destacam-se: (i) a implementação de um código em Python estruturado em módulos independentes, facilitando sua manutenção e expansão; (ii) o suporte a leitura de dados em múltiplos formatos, incluindo NetCDF; (iii) a automatização do cálculo das condutividades com base em parâmetros derivados diretamente dos modelos empíricos; e (iv) a disponibilização de Jupyter Notebooks que auxiliam no uso da ferramenta, tornando o pacote acessível a usuários com diferentes níveis de familiaridade com programação.

Como perspectivas de continuidade, propõe-se a adoção da biblioteca xarray para o tratamento dos dados multidimensionais, a fim de minimizar erros associados à interpolação e à estruturação das variáveis. Recomenda-se também a implementação de rotinas de verificação automática de continuidade nos perfis calculados e a realização de testes de sensibilidade frente a diferentes configurações de entrada. Tais aprimoramentos são fundamentais para ampliar a confiabilidade e a aplicabilidade do modelo, especialmente em estudos sobre o acoplamento entre a ionosfera e a magnetosfera, modelagem de clima espacial e investigações em regiões de anomalia geomagnética

Referências

- ADACHI, K. et al. Evaluation of a method to derive ionospheric conductivities using two auroral emissions (428 and 630 nm) measured with a photometer at Tromsø (69.6°N). **Earth, Planets and Space**, v. 69, dez. 2017. 12, 14, 29, 30, 38
- ALKEN, P. et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation. **Earth, Planets and Space**, v. 73, 07 2020. 28
- BANKS, P.; KOCKARTS, G. **Aeronomy: Part A**. [S.l.]: Academic Press, 1973. (Aeronomy, pt. 1). 23, 24
- BELLAN, P. M. **Fundamentals of Plasma Physics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006. 16
- BILITZA, D. IRI the International Standard for the Ionosphere. **Advances in Radio Science**, v. 16, p. 1–11, 2018. Disponível em: <<https://ars.copernicus.org/articles/16/1/2018/>>. 27
- BILITZA, D. et al. The international reference ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark. **Reviews of Geophysics**, v. 60, n. 4, p. e2022RG000792, 2022. E2022RG000792 2022RG000792. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022RG000792>>. 21, 27
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics**. 3. ed. [S.l.]: Springer-Verlag New York, 2004. ISBN 978-0-387-20975-3. 20
- BREKKE, A.; MOEN, J. Observations of high latitude ionospheric conductances. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 55, n. 11, p. 1493–1512, 1993. ISSN 0021-9169. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002191699390126J>>. 13
- CHEN, F. F. **Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion**. 3. ed. [S.l.]: Springer Cham, 2015. ISBN 978-3-319-22309-4. 19, 20, 21
- CONDIONO2-5. GitHub, 2025. Disponível em: <<https://github.com/cacaudomal/Condiono2-5>>. 32
- DENARDINI, C. M. A conductivity model for the Brazilian equatorial e-region: initial results. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 87 – 94, 2007. ISSN 0102-261X. Publisher: scielo. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2007000600011&nrm=iso>. 29
- EMMERT, J. T. et al. NRLMSIS 2.0: A Whole-Atmosphere Empirical Model of Temperature and Neutral Species Densities. **Earth and Space Science**, v. 8, n. 3, p. e2020EA001321, 2021. _eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020EA001321>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020EA001321>>. 27, 28
- ERWAN, T. et al. International geomagnetic reference field: the 12th generation. **Earth, Planets and Space**, v. 67, p. 79, 05 2015. 28
- HARGREAVES, J. K. **The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). 9, 22

HARRISON, R. G. The global atmospheric electrical circuit and climate. **Surveys in Geophysics**, Springer Science and Business Media LLC, n. 5-6, p. 441–484, Nov 2004. ISSN 1573-0956. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10712-004-5439-8>>. 22

IEDA, A. Ion-Neutral Collision Frequencies for Calculating Ionospheric Conductivity. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 125, n. 2, p. e2019JA027128, 2020. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JA027128>>. 21

KAMIDE, Y.; CHIAN, A. (Ed.). **Handbook of the Solar-Terrestrial Environment**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-46314-6. 20, 23, 24, 25

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 2009. ISBN 978-0-12-088425-4. 29

KELLEY, M. C. MESOSPHERE I Ionosphere. In: NORTH, G. R.; PYLE, J.; ZHANG, F. (Ed.). **Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)**. Second edition. Oxford: Academic Press, 2015. v. 3, p. 422–429. ISBN 978-0-12-382225-3. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123822253001845>>. 22

KELLEY, M. C.; HEELIS, R. A. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics / Michael C. Kelley, with contributions from Rodney A. Heelis**. San Diego, California: Academic Press, 1989. xii, 487 p. : p. ISBN 0124040136 0124040128. 22, 25

MEYER-VERNET, N. **BASICS OF THE SOLAR WIND**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2007. (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). ISBN 978-0-521-81420-1. 19

NENOVSKI, P. Electric conductivities in the ionosphere-thermosphere beyond transients. **Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences**, v. 67, p. 87, 01 2014. 11

NETWORK Common Data Form (NetCDF). Disponível em: <<https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>>. 30

OLIVEIRA, C. C. **Cálculo da Condutividade para a Modelagem Física do Circuito Elétrico Global**. Tese (TCC (Graduação) - Curso de Geofísica) — Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2021. 9, 26, 27, 36, 38

PIEL, A. **Plasma Physics: An Introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas**. 2. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. (Graduate Texts in Physics). ISBN 978-3-319-63427-2. 19

PILLACA, E. J. d. D. M. **Estudo do processo de implantação iônica por imersão em plasma com campo magnético externo usando técnicas numéricas e experimentais**. Tese (Tese (doutorado)) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/102487>>. 17, 20, 21

ROBSON, R.; WHITE, R.; HILDEBRANDT, M. **Fundamentals of Charged Particle Transport in Gases and Condensed Matter**. [S.l.]: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. (Monograph Series in Physical Sciences). ISBN 1-4987-3636-X. 6, 15, 20, 21

SADOVSKII, M. V. **Statistical Physics**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 978-3-11-064510-1. 15, 16

SCHUNK, R.; NAGY, A. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry**. 2. ed. United States of America, New York: Cambridge University Press, 2009. (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). ISBN 978-0-521-63237-9. 17, 18, 19, 22, 23, 29

SNELL, J. L.; GRINSTEAD, C. M. **Introduction to Probability**. 2. ed. [s.n.], 2006. Disponível em: <<https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/21>>. 15, 16, 17

SONI, P. K.; KAKAD, B.; KAKAD, A. Deepening of radiation belt particles in South Atlantic Anomaly Region: A scenario over past 120 years. **Advances in Space Research**, v. 69, n. 5, p. 2090–2101, 2022. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117721008905>>. 28

SOTO, R. **Kinetic Theory and Transport Phenomena**. [S.l.]: Oxford University Press, 2016. (Oxford master series in condensed matter physics, 25). ISBN 978-0-19-871605-1. 6, 16, 22

STUBBE, P.; HAGFORS, T. THE EARTH'S IONOSPHERE: A WALL-LESS PLASMA LABORATORY. **Surveys in Geophysics**, v. 18, n. 1, p. 57–127, jan. 1997. ISSN 1573-0956. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1006583101811>>. 24

VOLLAND, H. **Atmospheric Electrodynamics**. Germany: Springer-Verlag Berlin New York Tokyo, 1984. ISBN 3-540-13510-3. 12