



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## MÉDIA E ALTA ATMOSFERA (PQ038)



### SUA PROVA

- Além deste caderno contendo **5 (cinco)** questões discursivas **com as respectivas folhas de rascunho**, você receberá do fiscal de prova as folhas de textos definitivos;



### TEMPO

- Você dispõe de **4 (quatro) horas** para a realização da prova;
- **2 (duas) horas** após o início da prova, é possível retirar-se da sala, sem levar o caderno de questões;
- A partir dos **30 (trinta) minutos** anteriores ao término da prova é possível retirar-se da sala **levando o caderno de questões**.



### NÃO SERÁ PERMITIDO

- Qualquer tipo de comunicação entre os candidatos durante a aplicação da prova;
- Anotar informações relativas às respostas em qualquer outro meio que não seja no caderno de questões e nas folhas de textos definitivos;
- Levantar da cadeira sem autorização do fiscal de sala;
- Usar o sanitário ao término da prova, após deixar a sala.



### INFORMAÇÕES GERAIS

- Verifique se seu caderno de questões está completo, sem repetição de questões ou falhas. Caso contrário, **notifique imediatamente o fiscal da sala**, para que sejam tomadas as devidas providências;
- Confira seus dados pessoais, especialmente nome, número de inscrição e documento de identidade e leia atentamente as instruções para preencher as folhas de textos definitivos;
- Para o preenchimento das folhas de textos definitivos, use somente caneta esferográfica, fabricada em material transparente, com tinta preta ou azul;
- Assine seu nome apenas no(s) espaço(s) reservado(s) no cartão de respostas;
- Caso você tenha recebido caderno de cargo **diferente** do impresso em suas folhas de textos definitivos, o fiscal deve ser **obrigatoriamente** informado para o devido registro na ata da sala;
- O preenchimento das folhas de textos definitivos é de sua responsabilidade e **não será permitida a troca de folha de texto definitivo em caso de erro cometido pelo candidato**;
- Para fins de avaliação, serão levadas em consideração apenas os textos das folhas de textos definitivos;
- A FGV coletará as impressões digitais dos candidatos na lista de presença;
- Os candidatos serão submetidos ao sistema de detecção de metais quando do ingresso e da saída de sanitários durante a realização das provas.
- **Boa prova!**



**QUESTÃO 1**

Ondas de gravidade podem ser descritas por teorias que tratam de pequenas perturbações em referência a um estado básico. São manifestações ou modos normais da atmosfera, portanto estão contidos nas equações que regem o sistema. Entretanto, devido à complexidade do sistema de equações governantes, simplificações devem ser feitas para evidenciar suas características relevantes.

Assim, considere o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial w^*}{\partial t} = -\rho' g,$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = \rho_0 w' \frac{d \ln \theta_0}{dz},$$

que resulta de simplificações às equações que regem os movimentos na atmosfera. Onde  $\omega^* = \rho_0 w'$  representa o fluxo de massa da perturbação,  $\rho'$  representa a perturbação da pressão. Já o estado básico é representado por um estado horizontalmente homogêneo  $(\theta_0, p_0, \rho_0)$ , que apenas depende da altura.

Assim, utilizando o sistema descrito,

- A) Deduza uma equação para as oscilações verticais.
- B) Discuta o termo que corresponde à frequência destas oscilações. Quais são os termos que a compõem? Quais são as unidades e como é conhecida esta frequência?
- C) Descreva as consequências de diferentes regimes da estabilidade atmosférica na natureza do oscilador.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

**QUESTÃO 2**

Considere um feixe de elétrons se movendo em uma região com um plasma sob a influência de um campo elétrico  $\vec{E}$  e um campo magnético  $\vec{B}$  imerso em uma região que contém partículas neutras. Esse sistema físico pode ser tratado como acoplamento entre a ionosfera e termosfera terrestres. De acordo com a segunda lei de Newton, a força de Lorentz sobre o feixe de elétrons que se movem com velocidade  $\vec{v}_e$  é representada por:

$$-m_e v_e \vec{v}_e = e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) \tag{1}$$

Na equação (1),  $\vec{v}_e$  é a velocidade dos elétrons (massa  $m_e$ ) em relação aos neutros, indicando que o sistema referencial é tratado com os neutros em repouso em relação aos elétrons. Nessa equação,  $v_e$  representa a frequência de colisões entre os elétrons e os neutros. A frequência de colisão  $v_e$  controla a perda de momento dos elétrons resultando de suas colisões com os nêutrons.

A) Se a lei de Ohm generalizada é dada por  $\vec{J} = \sigma_0(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B})$ , onde  $\sigma_0$  é a condutividade do plasma e  $\vec{J} = -en_e \vec{v}_e$  é a densidade de corrente elétrica com densidade de elétrons  $n_e$ , mostre que a condutividade de um plasma não magnetizado é dada por

$$\sigma_0 = \frac{n_e e^2}{m_e v_e} \tag{2}$$

B) Agora, considere um plasma **magnetizado** por um campo magnético dirigido verticalmente na direção  $z(\vec{B} = B\hat{z})$ . Nessa nova situação, use a lei de Ohm generalizada e mostre que a densidade de corrente do plasma é da por

$$\vec{J} = \sigma_{\parallel} \vec{E} + \sigma_P \vec{E}_{\perp} - \sigma_H \frac{\vec{E}_{\perp} \times \vec{B}}{B}, \tag{3}$$

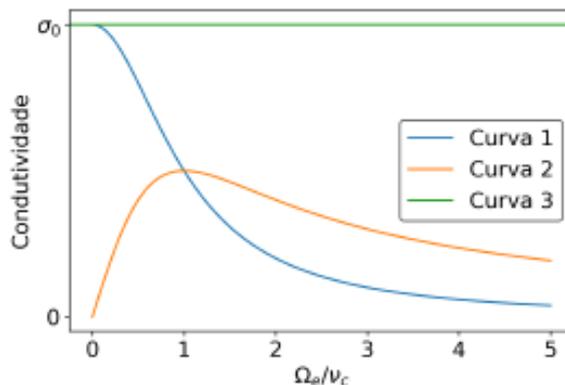
em que  $\vec{E}_{\parallel}$  e  $\vec{E}_{\perp}$  são os vetores campo elétrico **paralelo** e **perpendicular** ao campo magnético,  $\Omega_e = eB/m_e$  é a girofrequência do elétron em torno do campo magnético  $\vec{B}$ , e

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_0, \quad \sigma_P = \frac{1}{1 + \Omega_e^2/v_e^2} \sigma_0, \quad \sigma_H = \frac{\Omega_e/v_e}{1 + \Omega_e^2/v_e^2} \sigma_0 \tag{4}$$

C) Explique o significado físico dos parâmetros  $\sigma_{\parallel}$  (condutividade paralela),  $\sigma_P$  (condutividade de Pedersen), e  $\sigma_H$  (condutividade de Hall), em relação ao campo elétrico e ao campo magnético.

D) Considerando a ionosfera da Terra, em altitudes  $\sim 125\text{km}$  acima do nível do mar,  $\Omega_e/v_e \rightarrow 1$ , compare as condutividades de Pedersen e Hall na ionosfera nessa altitude. Qual dessas condutividades é dominante em altitudes bem acima de 125km onde colisões entre elétrons e neutros acontecem raramente?

E) Considere o gráfico abaixo. Quais curvas representam as condutividades obtidas na parte (b)? Justifique sua resposta.



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

### QUESTÃO 3

---

As emissões de *airglow* da molécula de Hidroxila na mesosfera superior, conhecidas como bandas vibracionais de Meinel, são particularmente caracterizadas por uma ampla faixa de comprimentos de onda entre os espectros do Visível e do Infravermelho. Quando as observações das bandas de Meinel têm resolução espectral adequada, elas revelam informações significativas a respeito da fotoquímica e da dinâmica da alta atmosfera.

**As seguintes questões abrangem alguns aspectos teóricos e observacionais relativos às bandas de Meinel.**

- A)** A principal reação química responsável pela produção da molécula de Hidroxila vibracionalmente excitada,  $OH(v' \leq 9)$ , em seu estado eletrônico fundamental, é a recombinação entre o Ozônio e o Hidrogênio. Uma segunda reação adicional é representada pela reação química envolvendo o radical Hidroperoxila e o Oxigênio atômico, produzindo  $OH(v' \leq 6)$ .
- A<sub>1</sub>** Considerando a teoria básica da cinética química das reações, determine a expressão do termo de produção fotoquímica  $p(v')$  para  $OH(v')$  em função da densidade numérica das espécies químicas mencionadas e dos coeficientes cinéticos convenientemente definidos.
- A<sub>2</sub>** Fazendo uso de argumentos da energia térmica associada às reações químicas, entre as duas reações citadas que produzem  $OH(v')$ , qual delas apresenta maior nível de exotermicidade?
- B)** A variável taxa volumétrica de emissão  $\varepsilon_{v'-v''} = \varepsilon_{v'-v''}(Z)$ , pode ser empregada para inferir a distribuição vertical da banda de Meinel  $OH(v' - v'')$ . Assim, faz-se necessário estabelecer o conjunto das reações químicas que participam da distribuição de  $OH(v')$  na atmosfera. Considerando, nesse conjunto, os processos colisionais que removem a energia vibracional de  $OH(v')$ , bem como a reação que representa o processo de emissão radiativa de  $OH(v')$ , sob condições de estado estacionário, **determine uma expressão para  $\varepsilon_{v'-v''}$  em função do termo de produção  $p(v')$ , das densidades numéricas das espécies químicas envolvidas na desativação energética de  $OH(v')$  e de coeficientes cinéticos convenientemente definidos.**
- C)** A temperatura associada à distribuição de Boltzmann dos níveis rotacionais de  $OH(v')$ , denominada doravante de temperatura de *airglow*, representa a temperatura cinética atmosférica na região da emissão de *airglow*, desde que certas condições sejam adequadamente tratadas.
- C<sub>1</sub>** Descreva essas condições em termos da resolução e da janela espectral a serem definidas e dos aspectos teóricos da distribuição de Boltzmann.
- C<sub>2</sub>** De maneira geral, explique como os valores da temperatura de *airglow* registrados devem ser comparados aos valores da temperatura mensurados por métodos experimentais que possuem resolução em altitude.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

## QUESTÃO 4

Na teoria linear não dissipativa de ondas de gravidade se assume um estado básico estacionário, pequenas perturbações e frequências de onda muito maiores do que a frequência inercial local, num sistema de coordenadas cartesianas. Nesse regime pode-se demonstrar que as equações perturbadas para ondas de gravidade são dadas por:

$$u'_t + \Phi'_x = 0, \quad v'_t + \Phi'_y = 0, \quad (1a, 1b)$$

$$u'_x + v'_y + \rho_0^{-1}(\rho_0 w')_z = 0, \quad \Phi'_{zt} + N^2 w' = 0, \quad (1c, 1d)$$

onde  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  são as perturbações da onda nas direções zonal, meridional, e vertical,  $\Phi'$  a perturbação da onda na temperatura geopotencial,  $N$  a frequência de Brunt-Vaisala, e os subscritos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , e  $t$  representam as derivadas nas respectivas direções zonal, meridional, vertical e temporal. Assumindo  $N$  constante e perturbações sinusoidais do tipo

$$(u', v', w', \Phi') = e^{z/2H} \operatorname{Re}[(\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}, \hat{\Phi}) \exp i(kx + ly + mz - \omega t)] \quad (2)$$

Assim:

- A) Derive as equações para as amplitudes  $(\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}, \hat{\Phi})$  da onda.**
- B) Derive a equação de dispersão para ondas de gravidade neste regime.**
- C) Sabendo-se que o fluxo de momento é dado, em geral, por  $\rho_0 \overline{u'w'}$ , derive o fluxo de momento para ondas nas condições descritas acima.**
- D) Descreva como a onda se comporta à medida que se propaga verticalmente baseando-se na relação do fluxo de momento encontrada no item anterior.**
- D<sub>1</sub> Como o comprimento de onda vertical da perturbação afeta sua propagação?**
- D<sub>2</sub> Em quais condições as equações 1a, 1b, 1c e 1d deixam de ser válidas no contexto da conservação de momento da onda?**
- E) Discuta o conceito de ondas de gravidade saturadas e não saturadas na mesosfera e as consequências desses fenômenos na mesosfera.**

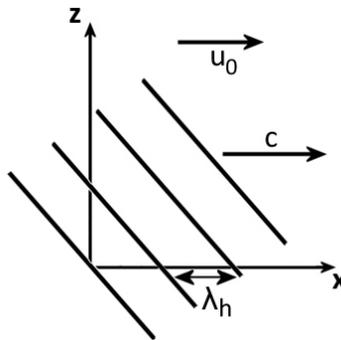
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

## QUESTÃO 5

A) A figura 1, a seguir, representa uma onda de gravidade propagando-se pela atmosfera terrestre.

Figura 1



Usando os parâmetros definidos nessa figura ( $c$ : velocidade da fase horizontal observada,  $u_0$ : velocidade horizontal do vento, e  $\lambda_h$ : comprimento de onda horizontal), **apresente as equações para a velocidade intrínseca da fase horizontal,  $c_i$ , os períodos observado e intrínseco,  $T$  e  $T_i$ , a frequência horizontal  $f$ , a frequência angular horizontal  $\omega_i$ , e o número de onda horizontal  $k$ .**

Aplicação numérica:  $\lambda_h = 30$  km,  $c = 50$  m/s,  $u_0 = -20$  m/s.

B) Assumindo uma densidade atmosférica decrescente exponencialmente e uma propagação linear das ondas de gravidade, a equação da onda (equação de Taylor-Goldstein) pode ser escrita assim:

$$\frac{d^2 \hat{w}}{dz^2} + \left[ \frac{N^2}{c_i^2} + \frac{u_0''}{c_i} - \frac{1}{H_s} \frac{u_0'}{c_i} - \frac{1}{4H_s^2} - k^2 \right] \hat{w} = 0$$

Com  $w$  a perturbação vertical,  $N$  a frequência de Brunt-Vaisälä,  $H_s$  a altura da escala atmosférica,  $k$  o número de onda horizontal da onda,  $c$  a velocidade de fase observada da onda, e  $u_0'$ , e  $u_0''$ , a velocidade horizontal do vento na direção da onda, com sua primeira e segunda derivadas, respectivamente.

B<sub>1</sub> Qual é a relação de dispersão que dá o número de onda vertical  $m$  em função dos outros parâmetros?

B<sub>2</sub> Reformule e simplifique no caso de vento constante.

B<sub>3</sub> Descreva as condições de propagação associadas às três situações a seguir:  $m^2 > 0$ ;  $m^2 = 0$ ; e  $m^2 < 0$ .

B<sub>4</sub> Aplicação numérica: calcule o comprimento de onda vertical  $\lambda_z$  para a onda da figura 1, com  $N = 0,02$  m/s, e  $H_s = 6$  km.

C) Determine o erro  $\Delta \lambda_z$  associado ao cálculo do comprimento de onda vertical no caso de vento constante em função das incertezas de medição  $\Delta c_i = 5$  m/s, e  $\Delta \lambda_h = 5$  km.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---





Realização

