



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

PROVA DISCURSIVA

TG37

PROCESSAMENTO DE ALTO DESEMPENHO – PAD (HPC)



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

Considere que você está trabalhando em um projeto de pesquisa e desenvolvimento na área de Processamento de Alto Desempenho (HPC) que envolve a simulação de fenômenos meteorológicos. Para este projeto, a eficiência no desenvolvimento e a performance do software são críticas. Você é responsável por configurar o ambiente de desenvolvimento para a equipe. Neste contexto, há vantagens no uso de IDEs modernos (como *Visual Studio Code*, *Sublime Text* e *Atom*) para o desenvolvimento de software em um ambiente HPC. Além disso, o sistema operacional (Linux ou Unix) e o uso de *shells* (*bash*, *csh*, *ksh*) podem influenciar a produtividade e eficiência do desenvolvimento.

- A) Descreva as características principais de IDEs modernos que facilitam o desenvolvimento de software em HPC.**
- B) Explique as vantagens de usar esses IDEs em comparação com ambientes de desenvolvimento mais tradicionais.**
- C) Analise como a escolha do sistema operacional e o domínio de diferentes *shells* podem afetar a produtividade e a performance no desenvolvimento de software em HPC.**

- 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

Dotted lines for writing answers.

Questão 2

Métodos numéricos são usados na resolução de sistemas de equações lineares da forma $Ax = b$, em que A é uma matriz dada, não singular, de dimensão $n \times n$ e b é um vetor dado de dimensão n . Nesta questão considera-se $A \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $x, b \in \mathcal{R}^n$. Tais métodos numéricos podem ser classificados em dois tipos: métodos diretos e métodos iterativos. Um método direto obtém a solução exata x^* (a menos de erros de aritmética de ponto flutuante) de $Ax = b$ depois de um conjunto finito de operações. Um método iterativo produz valores $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots$ a partir de um valor inicial $x^{(0)}$ usando A e b como parâmetros, de tal modo que, se o método é consistente, $x^* = \lim_{m \rightarrow \infty} x^{(m)}$.

Na prática, utiliza-se um número finito m de iterações tal que o erro $\|x^{(m)} - x^*\|$ seja suficientemente pequeno. Métodos iterativos podem envolver iterações lineares ou não-lineares. Exemplos de iterações lineares incluem Richardson, Jacobi e Gauss-Seidel; uma iteração linear Φ pode ser representada na forma $x^{(m+1)} := \Phi(x^{(m)}, b, A)$, o que significa dizer que somente o valor de x calculado na iteração anterior é usado na iteração corrente. Iterações não lineares, por sua vez, aplicam iterações lineares, mas considerando uma sequência de valores $x^{(m)}, x^{(m-1)}, \dots$ anteriores de x , com o objetivo de acelerar a convergência de resolução (a quantidade de valores anteriores considerados depende do método específico).

O método de Gradiente Conjugado (*Conjugate Gradient* – CG) é possivelmente o mais popular dos métodos que empregam iterações não lineares, devido ao seu desempenho computacional. O princípio do método CG é que, a cada iteração m , a técnica do gradiente descendente é aplicada em uma direção de busca $p^{(m)} \in \mathcal{R}^n$ para computar $x^{(m+1)}$ a partir de $x^{(m)}$. A direção de busca $p^{(m)}$, por sua vez, é calculada a partir do resíduo $r^{(m)} := b - Ax^{(m)}$ e das direções de busca anteriores $p^{(l)}$ com $0 \leq l \leq m - 1$, tal que $p^{(m)}$ seja conjugado a todos os demais $p^{(l)}$ com relação a A . (Especificamente para $m = 0$, $p^{(0)} := r^{(0)}$.)

Em relação ao tema, responda ao que se pede a seguir.

- A) Enumere as duas características necessárias à matriz A para que o método CG (utilizando a iteração linear de Richardson como base) possa ser empregado na resolução de $Ax = b$.
- B) O método CG pode ser interpretado como um método direto porque, do ponto de vista teórico, é capaz de produzir a solução exata x^* de $Ax = b$ depois de um número de iterações finito e no máximo igual a n . Contudo, do ponto de vista de acurácia computacional, indica-se o uso do método CG como um método iterativo. Explique o problema, relacionado à determinação das direções de busca $p^{(m)}$, que leva à indicação de uso do método CG como um método iterativo e não como um método direto.
- C) O problema a ser explicado no item (B) pode ocorrer também quando o método CG é usado como um método iterativo, mas n é muito grande. Descreva a estratégia computacional empregada para lidar com esse problema quando o método CG é usado como um método iterativo.
- D) Indique a principal medida da matriz A utilizada para estimar a taxa de convergência do método CG, e mostre como essa medida pode ser calculada numericamente. Explique como a taxa de convergência do método CG pode ser melhorada considerando a estimativa dada por essa medida da matriz A .

Questão 3

A questão trata de conceitos de dependências de dados.

Os processadores dos computadores analisam a dependência de dados visando a conseguir mais instruções independentes para que possam ser executadas em paralelo numa arquitetura superescalar.

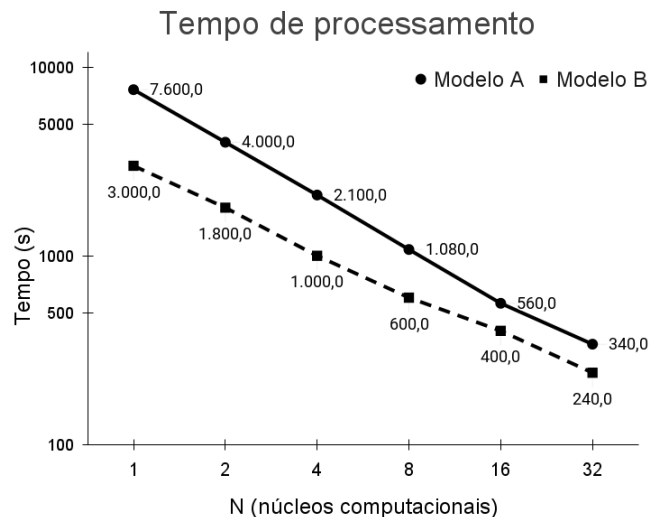
Em relação ao tema, responda ao que se pede a seguir.

- A) Quais são as dependências de dados existentes entre instruções?
- B) Qual ou quais destas dependências de dados são consideradas falsas e que podem ser alteradas para tornar as instruções independentes?
- C) Qual a técnica empregada para eliminar as dependências falsas e tornar estas instruções independentes, podendo ser executadas?

Questão 4

A **Figura 1** a seguir mostra o tempo de processamento (em escala logarítmica) de dois modelos globais de previsão numérica do tempo (Modelo A e Modelo B), variando-se desde o tempo sequencial com um núcleo computacional, até o tempo paralelo com 32 núcleos computacionais, para uma previsão de 24 horas de integração com resolução espacial de 120km. Considera-se que a execução paralela é realizada por meio da biblioteca MPI.

Figura 1 - Tempo em segundos do processamento sequencial ($N = 1$) e paralelo ($N \geq 2$) dos modelos de previsão numérica do tempo A e B, para uma previsão de 24h com resolução espacial de 64km. Os eixos do gráfico estão em escala logarítmica.



Baseando-se nas informações presentes na Figura 1, responda ao que se pede a seguir.

- Quais dos dois modelos possui a **maior escalabilidade**? Justifique e explique em detalhes sua resposta.
- Cite três fatores que podem limitar a escalabilidade de um programa paralelo, entre os quais ao menos um deve estar relacionado à arquitetura de hardware, e ao menos um deve estar relacionado ao próprio programa paralelo. Justifique sua resposta.
- Sabendo-se que, em geral, nos modelos de previsão numérica do tempo a carga de trabalho aumenta em **ordem cúbica** com o aumento de resolução espacial, qual análise de desempenho seria recomendável a fim de verificar a escalabilidade dos dois modelos com resoluções espaciais de 64km, 32km, 16km e 8km?

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

Questão 5

Considere os seguintes variáveis de entrada:

- Temperatura: Matriz tridimensional T de dimensão (1:M,1:N,1:L)
- Altura: Matriz tridimensional H de dimensões (1:M,1:N,1:L)
- Pressão: Vetor unidimensional P de dimensão (1:L)
- onde:
- M é o número de pontos horizontais na direção X.
- N é o número de pontos horizontais na direção Y.
- L é o número de níveis verticais.

Essas informações são dados públicos disponíveis em um módulo fortran “module mread” que além de disponibilizar T,H,P,M,N,L, disponibiliza também a subrotina de nome read_all() que carrega automaticamente todas as informações acima.

Considere também uma função FCAPE: Função real que calcula o índice CAPE (*Convective Available Pontential Energy*). Ela é chamada com a assinatura FCAPE (T(1:L), H(1:L), P(1:L) e retorna um único valor real.

Com base nestas considerações pede-se:

A) Escreva um código, preferencialmente em fortran moderno, que

- Utilize read_all() do modulo mread para carregar as informações.
- Aloque dinamicamente espaço para matriz CAPE(1:M,1:N)
- Utilize a função FCAPE para calcular o índice CAPE e guardar os resultados para cada ponto horizontal (1:M, 1:N) na matriz CAPE

B) Paralelize com OpenMP.

Incluir, no código pedido no item anterior, comandos OpenMP necessários para paralelização do mesmo, distribuindo o cálculo entre os processadores.

C) Escreva o código da função FCAPE que deve calcular a integral dada pela expressão.

$$FCAPE = \int_{k=nl}^{k=ne} \left(\frac{TP(k) - T(k)}{T(k)} \right) dH$$

em que a temperatura da parcela TP(k) é calculada por outra função real FPAS fornecida externamente.

- A assinatura de FPAS deve ser FPAS(P(K-1),TP(K-1),P(K)) para calcular TP (K) a partir do nível de pressão anterior.
- Por simplicidade, considere: nl=1, ne=L na integral acima.
- Considere também TP(nl)=T(nl) no primeiro nível
- Somente valores positivos são integrados, isto é TP(K)>=T(K)
- dH = H(K+1) – H(K) é a variação da altura entre dois níveis consecutivos.

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

Realização

