



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## PROCESSAMENTO DE ALTO DESEMPENHO (PQ05)



### 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!**



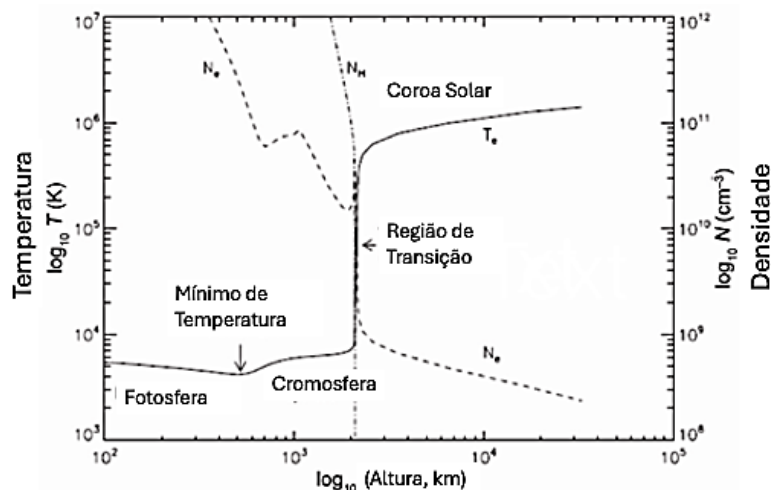
## QUESTÃO 1

Simular atmosferas estelares apresenta vários desafios devido às drásticas mudanças nas condições ambientais da zona de convecção até a coroa. Essas mudanças incluem diferenças enormes em temperatura, densidade e intensidades dos campos magnéticos, e esses fatores afetam significativamente as estratégias computacionais necessárias para uma modelagem precisa.

A seguir, estão alguns dos desafios específicos associados a essas mudanças:

1. Grandes Gradientes de Temperatura
  - 1.1 Impacto: *a temperatura em uma atmosfera estelar pode variar de alguns milhares de graus na zona de convecção para mais de um milhão de graus na coroa.*
  - 1.2 Desafio: *lidar com cálculos precisos de transferência radiativa através desses gradientes, já que as propriedades do plasma mudam drasticamente, afetando opacidade, emissividade e mecanismos de transferência de energia.*
2. Variações de Densidade
  - 2.1 Impacto: *a densidade pode diminuir várias ordens de magnitude, desde a densa zona de convecção até a extremamente tênue coroa.*
  - 2.2 Desafio: *gerenciar a estabilidade numérica das simulações em tais condições variadas, pois as baixas densidades na coroa levam a desafios na modelagem devido ao domínio dos processos magnéticos e radiativos sobre a dinâmica dos fluidos.*
3. Forças e Configurações do Campo Magnético
  - 3.1 Impacto: *os campos magnéticos podem variar significativamente em força e são mais complexos na coroa onde dominam a dinâmica e a estrutura do plasma.*
  - 3.2 Desafio: *simular o campo magnético com precisão, já que ele influencia a convecção e governa a estrutura da coroa e região de transição. A interação entre dinâmica dos fluidos e campos magnéticos (magnetohidrodinâmica) se torna computacionalmente intensiva e complexa.*
4. Alturas de Escala
  - 4.1 Impacto: *a altura de escala, ou a altura sobre a qual ocorrem mudanças significativas nas propriedades atmosféricas, varia drasticamente. Na zona de convecção, as alturas de escala são relativamente menores em comparação com a coroa.*
  - 4.2 Desafio: *adaptar as malhas numéricas para capturar efetivamente fenômenos em diferentes alturas de escala sem perder resolução ou eficiência computacional. Lidar com o equilíbrio hidrostático nas simulações pode ser desafiador, pois os efeitos gravitacionais variam.*
5. Dinâmicas da Região de Transição
  - 5.1 Impacto: *a região de transição entre a cromosfera e a coroa apresenta aumentos rápidos de temperatura em distâncias muito curtas.*
  - 5.2 Desafio: *modelar esta região com precisão é difícil devido aos gradientes acentuados e à necessidade de resolução espacial fina para capturar a dinâmica sem que a difusão numérica obscureça a física.*
6. Mudanças na Composição Química
  - 6.1 Impacto: *variações na composição química da zona de convecção até a coroa influenciam os processos de absorção e emissão de radiação.*
  - 6.2 Desafio: *modelar essas mudanças com precisão requer cálculos complexos de química e física de radiação, aumentando as demandas computacionais.*
7. Requisitos Computacionais
  - 7.1 Impacto: *a necessidade de simulações tridimensionais de alta resolução para capturar essas condições variadas coloca enormes demandas em recursos computacionais.*
  - 7.2 Desafio: *garantir que as simulações possam ser executadas de forma eficiente em plataformas de computação de alto desempenho, utilizando técnicas de processamento paralelo para lidar com as tarefas computacionais intensivas envolvidas em ambientes tão diversos e dinâmicos.*

**Figura 1** – Perfil de temperatura e densidade de uma atmosfera solar estratificada unidimensional em função da altura.



(Referência: Adaptado de Aschwanden, M. J., *Physics of Solar Corona: An Introduction*, Praxis Publishing, Chichester, UK, 2004, ISBN:3-540-22321-5).

Assumindo que um grupo de trabalho foi estabelecido para desenvolver um novo modelo magnetohidrodinâmico (MHD) da atmosfera solar, com ênfase na região de transição entre cromosfera e coroa solar, discorra sobre os seguintes aspectos relativos ao desenvolvimento do sistema utilizando programação paralela.

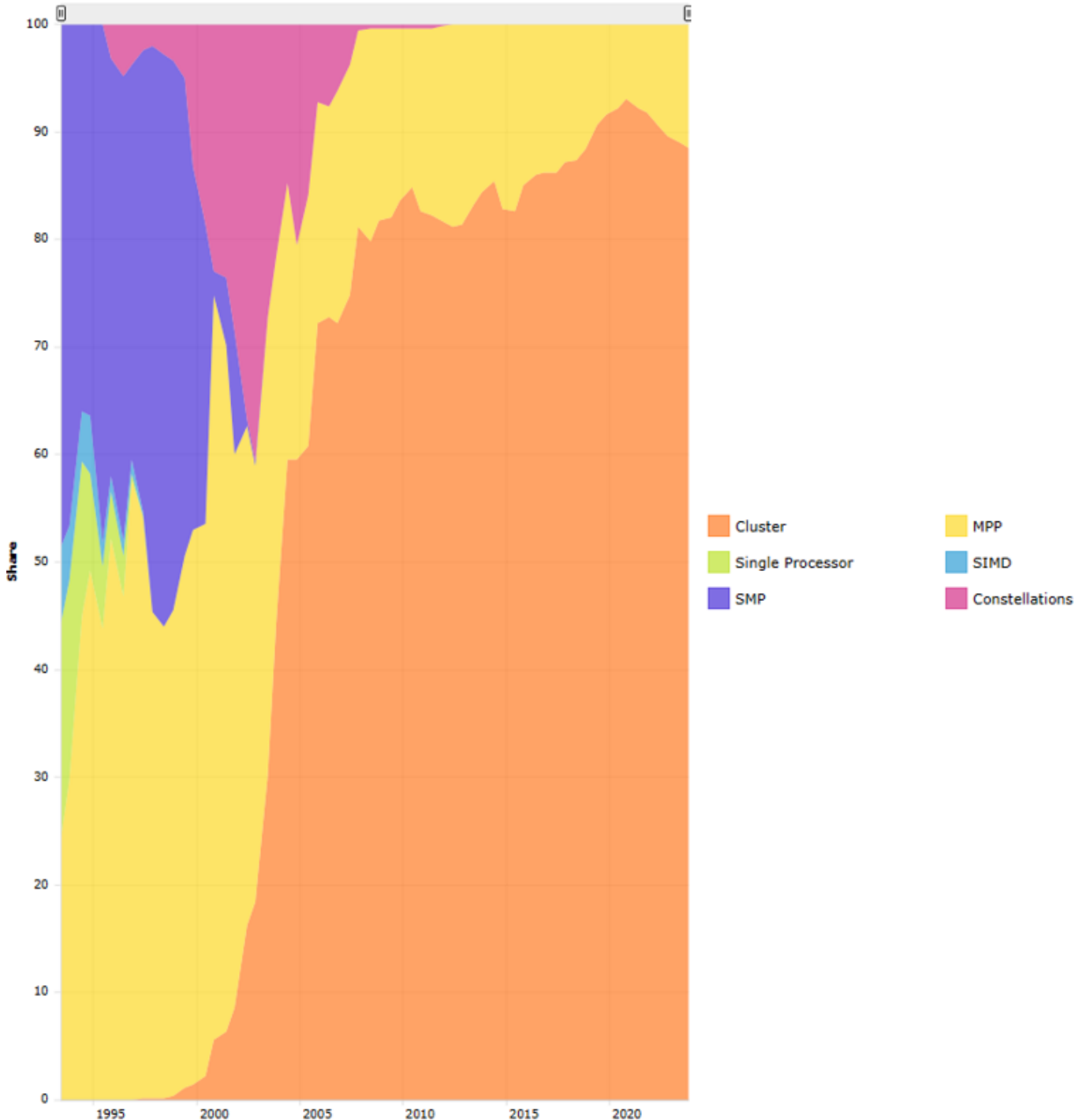
- A) Como se pode otimizar códigos de simulação de atmosferas estelares para plataformas heterogêneas que envolvem tanto CPUs quanto GPUs?
- B) Apresente os desafios e as soluções para garantir o uso eficiente da memória em sistemas multi-core e heterogêneos.
- C) Como se avalia e compara o desempenho de um modelo MHD para simulações numéricas em sistemas heterogêneos?

- 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

Ao se acompanhar a evolução tecnológica aplicada aos supercomputadores presentes na bem conhecida lista **Top 500** (<https://www.top500.org/>), percebe-se algumas tendências, tal como representado na figura a seguir:

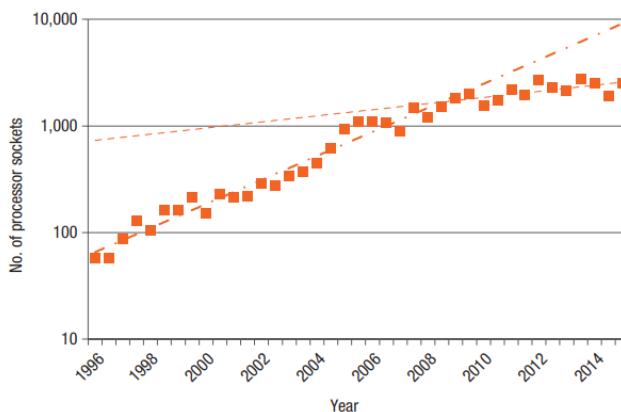


Para cada categoria presente na figura tem-se os seguintes significados:

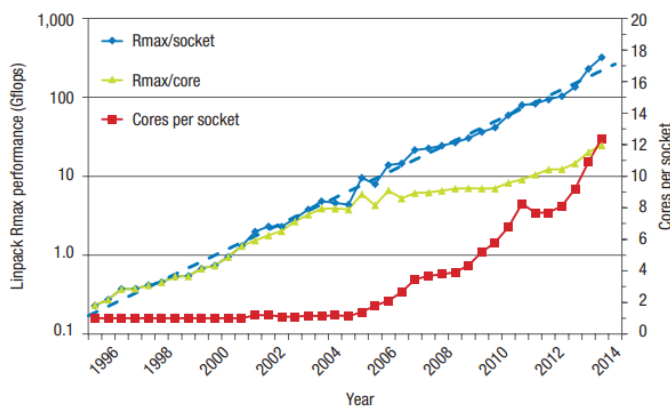
- I. *Cluster* - Conglomerados/arranjos de servidores/nós computacionais independentes interconectados por rede de dados
- II. *SMP* - *Symmetric Multiprocessor* (Multi Processadores Simétricos, microprocessadores comuns (*commodity processors*) conectados por memória central compartilhada via um *bus* de dados de alta velocidade de transmissão).
- III. *MPP* - *Massively Parallel Processing* (Processadores Massivamente Paralelos).
- IV. *Constellations* - Constelações, *clusters* que usam processadores SMP em larga escala como nós de processamento.
- V. *Single Processor* - Processador único.
- VI. *SIMD* - *Single Instruction, Multiple Data* (Único fluxo de instruções com Múltiplos Fluxos de Dados – Taxonomia de Flynn).

- A) Comente a evolução apresentada na figura, buscando justificar a razão pela qual se tem diferentes predominâncias de classes de equipamentos ao longo da linha do tempo apresentada. Justifique, especialmente, a presença dos equipamentos classificados como *clusters* nas listas mais recentes. Como exemplo, para a última lista apresentada em novembro/2023, os equipamentos classificados como *clusters* representam 88,5% dos 500 equipamentos listados.
- B) A partir das figuras 1 e 2 apresentadas a seguir, explique como o surgimento dos processadores conhecidos por *multicores* impactou na arquitetura dos supercomputadores. Cite também na resposta as causas do surgimento dos processadores de múltiplos núcleos encapsulados (*multicores*).

**Figura 1** – Average number of processor sockets for new supercomputers in the TOP500, excluding systems with SIMD processors, vector processors or accelerators. The exponential increase in the number of sockets up to 2008 accounts for the higher-than-expected growth rate in supercomputing performance during the same time period.



**Figura 2** – Maximal achieved performance (Rmax) of TOP500 systems on the Linpack benchmark. The increasing number of cores per socket has compensated for stagnant core performance in the latter half of the past decade.



(Fonte: Strohmaier, E., Meuer, H. W., Dongarra, J., & Simon, H. D. (2015). *The TOP500 List and Progress in High-Performance Computing*. Computer, 48(11), 42-49. <https://doi.org/10.1109/MC.2015.338>)



- 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

---

Em novembro de 2023, o Top500 (<https://www.top500.org/>), em sua 62ª edição, publicou a lista dos 500 maiores sistemas de supercomputação do planeta.

Em primeiro lugar na lista aparece a máquina massivamente paralela Frontier (HPE Cray EX235, com performance (Rmax) de 1,194.00 PFlop/s) com Slingshot-11 (Gigabit Ethernet) e a topologia de interconexão dragonfly.

Em sétimo lugar aparece o *cluster* de processamento de alto desempenho Summit (IBM Power System AC922, com performance (Rmax) de 148.60 PFlop/s) com Mellanox EDR 100G InfiniBand e topologia de interconexão *fat-tree*.

Em oitavo lugar aparece o *cluster* de processamento de alto desempenho MareNostrum 5 ACC (BullSequana XH3000, com performance (Rmax) de 138.20 PFlop/s) com Mellanox NDR200 InfiniBand e a topologia de interconexão *fat-tree*.

Em décimo nono lugar aparece o *cluster* de processamento de alto desempenho MareNostrum 5 GPP (Lenovo ThinkSystem SD650 v3, com performance (Rmax) de 40.102 PFlop/s) com Mellanox NDR200 InfiniBand e topologia de interconexão *fat-tree*.

Com base nas topologias de interconexão mostradas acima, responda aos itens a seguir.

- A) O que é e como é composta a topologia de interconexão *fat-tree*? Apresente vantagens da sua aplicação.**
- B) O que é e como é composta a topologia de interconexão *dragonfly*? Apresente vantagens da sua aplicação.**

- 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

Um Instituto de Pesquisa Nacional está planejando adquirir um novo sistema de Computação de Alto Desempenho (CAD) para suas aplicações de modelagem numérica e para simulações científicas complexas. O Instituto possui um sistema antigo que não está mais atendendo às demandas crescentes das simulações devido às limitações de desempenho e decidiu atualizar o seu sistema de CAD. É esperado que o novo sistema melhore significativamente as capacidades de pesquisa em comparação com a configuração atual de CAD.

Sua equipe é responsável por conduzir as avaliações de desempenho do sistema atual e fornecer recomendações técnicas sobre a especificação e seleção de um novo sistema de CAD. Espera-se que sua equipe realize uma avaliação sistemática do sistema CAD atual, identificando limitadores de desempenho (*bottlenecks* ou "gargalos") das atuais aplicações no atual sistema. Com base nessa análise, você deve especificar os requisitos para um novo sistema que ofereça melhorias tanto em termos de requisitos de desempenho computacional quanto na eficiência energética de seus sistemas de CAD. As simulações atuais estão sendo implementadas para executar em um ambiente de computação de alto desempenho baseado em CPU e utilizando a arquitetura de memória distribuída. O sistema atual é conhecido por ter gargalos na largura de banda da memória e na eficiência do processamento paralelo, que têm sido os principais fatores limitantes na realização de simulações maiores e mais complexas.

**A) Descreva a metodologia que sua equipe utilizará para a avaliação e análise de desempenho do sistema atual, considerando todos os passos tidos como essenciais. Determine as métricas de desempenho que você utilizará em cada passo.**

*Obs.: a avaliação deve confirmar os limites de desempenho identificados para as aplicações e a possível identificação de outros limitadores de desempenho. Indique a necessidade do uso de ferramentas e benchmarks.*

**B) Considere que é possível avaliar o desempenho de um sistema de CAD candidato com as melhorias propostas por sua equipe, mas não há possibilidade de executar as reais simulações do instituto. Para estimar o desempenho que as simulações terão neste novo sistema, a abordagem proposta é a execução de *benchmarks*.**

Descreva o(s) benchmarks que você recomendaria para a avaliação de desempenho e apresente todos os fatores que guiaram a sua escolha.

**C) Comparando e analisando o sistema atual (A) e o novo sistema selecionado (B):**

- Sistema A:
  - performance: 80 TFLOPS
  - memória operação triad: 80 GB/s
  - memória operação copy: 70 GB/s
  - consumo de energia: 20 kW
- Sistema B:
  - performance: 150 TFLOPS
  - memória operação triad: 160 GB/s
  - memória operação copy: 150 GB/s
  - consumo de energia: 40 kW

**C<sub>1</sub> Calcule a eficiência energética (performance/watts) para cada sistema e, com base nos cálculos, determine o sistema que oferece maior eficiência energética.**

**C<sub>2</sub> Para avaliar a atualização na largura de banda da memória do atual sistema para o novo sistema HPC candidato, foi calculada a taxa de melhoria para as operações *Triad* e *Copy* medidas por meio da execução do benchmark STREAM. Os índices de melhoria calculados indicam que o novo sistema HPC oferece uma melhoria de 2.0 e 2.14 vezes em relação ao sistema antigo para as operações de memória (*Triad* e *Copy*), respectivamente.**

Interprete o resultado e explique o que essas proporções dizem sobre a eficácia do novo sistema em resolver o gargalo da largura de banda da memória.

- 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 GPU (Unidade de Processamento Gráfico) é a arquitetura massivamente paralela no modelo “SIMD” mais utilizada nos sistemas heterogêneos de alto desempenho. A programação de alto desempenho para GPUs envolve o conhecimento da sua arquitetura. A seguir apresentamos três pontos que abordam a relação da arquitetura e o desempenho da GPU.

- A) Como uma arquitetura massivamente paralela SIMD, a GPU possui características distintas da CPU. **Apresente as principais diferenças entre o modelo de programação com múltiplas *Threads* em GPU e o modelo com múltiplas *Threads* em CPU (processador).**
- B) Suponha a linguagem C ou C++. Um trecho de código C, com algumas restrições, pode ser executado na GPU ou na CPU. Porém o desempenho do código poderá ser bem distinto. O programador deve explorar os bons padrões de código para cada plataforma. Considere a execução de comandos condicionais em GPU que apresenta características distintas da execução em CPU. **Indique as desvantagens da presença de desvios condicionais em um código para GPU, explicando como o desempenho poderá ser afetado.**
- C) A evolução da latência e da vazão da memória não acompanhou a evolução da latência/vazão das unidades de execução ou ALUs dos elementos de processamento. A intensidade aritmética é uma métrica importante nos dias atuais, uma vez que as unidades de execução são bem mais rápidas que as memórias. A intensidade mede o número de operações de cálculo executadas dividido pelo número de operações de memória. Por exemplo, se executamos 4 operações de cálculo a cada duas leituras de memória, teremos uma intensidade igual a 2. Portanto, mesmo que o processador tenha uma vazão 2 vezes mais rápida que a memória, o desempenho não será prejudicado pela vazão da memória. As GPUs possuem vários tipos de memória desde registradores à memória global. Enquanto os registradores tem o desempenho das ALUs, a memória global tem a vazão bem inferior a vazão dos registradores.

Suponha a avaliação da expressão  $s = 5 * A[i] * A[i] + B[i] * A[i] - 9 * B[i]$ ; em que os vetores A e B são do tipo *float* de 4 bytes, os vetores tem o tamanho de 1 milhão de elementos e estão armazenados na memória global. "s" é uma variável local. Lembre-se que o compilador sempre otimiza o código usando registradores.

**Calcule qual é a intensidade aritmética da equação e qual será o desempenho máximo (ou de pico) em Gops/s sabendo que a GPU em questão tem uma vazão de 240GB/s para a memória global, possui 1000 cores com *clock* 1 GHz, executando uma operação por *clock*. Foram disparados 1 milhão de *threads*, cada *thread* calcula um ponto distinto dos vetores.**

- 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

