

INSTITUTO DE MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA - USP

High Performance Computing: Impact on Society (SC15 Keynote)



hpc matters.

Integrantes do Grupo:

Bruno Ferrero	N USP: 3690142
Marcelo Galdino	N USP: 10120500
Willy Reis	N USP: 7694112

Professor: Alfredo Goldman

Monitor: Pedro Briel

S Ã O P A U L O

1º semestre 2017 - MAC5742/0219

Sumário

1	Introdução	2
2	HPC	3
2.1	O que é HPC	3
2.2	História/Evolução de Supercomputadores	3
2.3	HPC no Brasil	5
2.4	Futuro	5
2.5	SC Conference	6
3	Aplicações/HPC Matters	8
3.1	Paypal	8
3.2	MH370	9
3.3	Bateria	9
3.4	Aerospace	9
3.5	Medicina	9
3.6	Previsão de tempestades	11
3.7	Entretenimento	11
3.8	Bens de Consumo	11
3.9	Astronomia	11
3.10	Machine Learning	12
4	HPC e o Aquecimento Global	12
4.1	O que é um modelo climático	13
4.2	O "tamanho" do problema	14
4.3	Um supercomputador para estudos climáticos	15
5	Conclusão	17
6	Referências	18

1. Introdução

A computação de alto desempenho, assim como a computação "normal" tem cada vez mais importância em nossas vidas. Ela desempenha papel importante na indústria, nas ciências e em órgãos governamentais, tanto que, além de influenciar tais temas, o seu uso é incentivado pelos benefícios propiciados.

Uma das iniciativas para compartilhar o conhecimento sobre supercomputadores, seus algoritmos e técnicas de computação de alto desempenho é a realização de conferências anuais sobre o tema, além da divulgação de uma lista de supercomputadores, para o incentivo de troca de experiências e análises de tendências.

Na seção 3 são apresentados diversos exemplos de aplicação prática pelo mundo e em diversas áreas. Na seção 4 é mostrado detalhadamente o processo de aplicação de computação de alto desempenho para problemas relacionados ao aquecimento global.

2. HPC

2.1. O que é HPC

A computação de alto desempenho (HPC – do inglês *High Performance Computing*) segundo [8] "geralmente se refere à prática de agregar poder computacional de uma maneira que oferece um desempenho muito superior ao que poderia ser obtido com um computador comum ou uma típica estação de trabalho para resolver grandes problemas em ciência, engenharia ou negócios". O termo HPC também pode ser designado a computador de alto desempenho (*High Performance Computer*).

HPC é um assunto emergente sobre a resolução de problemas matemáticos intensivos em computação em grande escala usando sistemas de computador de alto desempenho. Numerosas aplicações em vários campos dependem da computação de alto desempenho. Alguns exemplos da aplicação de HPC são simulação de processo químico, previsão numérica do tempo, análise de elementos finitos, dinâmica molecular, dinâmica cromática quântica, controle de poluição atmosférica e migração sísmica, que serão mostrados na seção 3.

A tecnologia de HPC foca no desenvolvimento de algoritmos e sistemas paralelos incorporando técnicas de administração de sistemas e computação paralela e reúne várias tecnologias como arquitetura de computadores, algoritmos, programas e eletrônicos e sistemas de softwares. As questões que mais afetam HPC [8] são paralelismo em nível de instrução, hierarquia de armazenamento, compiladores de alta performance, paralelismo de memória compartilhada, paralelismo distribuído, bibliotecas científicas, I/O e visualização.

O desempenho dos sistemas de HPC geralmente é medido em operações de ponto flutuante por segundo (FLOPS), sendo que hoje em dia, é comum se falar TFLOPS (10^{12} FLOPS) como medida padrão de performance.

2.2. História/Evolução de Supercomputadores

O termo computação de alto desempenho varia com o passar dos anos. Segundo a lei de Moore, o desempenho computacional médio dos computadores é dobrado a cada 18 meses. Devido ao aumento habitual do poder computacional dos novos dispositivos, os computadores atuais possuem mais poder computacional do que supercomputadores de outrora.

O supercomputador Atlas, instalado em 1962 na Universidade de Manchester [23], foi um dos primeiros da categoria, considerado o computador mais poderoso do mundo na época. Outro supercomputador notável foi o Cray-1 [24], um dos mais conhecidos e mais bem sucedidos, produzido pela *Cray Research* e instalado em 1976 no Laboratório Nacional de Los Alamos. O Cray-1 possui 160 MFLOPS (10^6 FLOPS) e foi superado apenas em 1982 pelos 800 MFLOPS do Cray-MX. Em 1985, o Cray-2 atingia no pico 1.9 GFLOPS (10^9 FLOPS).

A título de comparação, se levarmos em consideração o poder computacional de um celular recente, o iPhone 4, temos 1.6 GFLOPS versus os próximos 1.9 GFLOPS de um supercomputador de 1985 [6]. Este exemplo mostra como foi rápida a evolução dos computadores e a equivalência entre um supercomputador de uma época e um celular de bolso 25 anos depois.

A partir de junho de 1993, os 500 supercomputadores mais poderosos (não distribuídos) passaram a ser mostrados na TOP500 [21], com o objetivo de identificar tendências em HPC [25]. O ranking a partir de então é atualizado a cada 6 meses, nas datas das *International Supercomputing Conference* e da *ACM/IEEE Supercomputing Conference* em junho e novembro, respectivamente. O desempenho dos computadores da lista é medido com o *benchmark* LINPACK [25].

A primeira lista contava (junho de 1993) com o estadunidense CM-5/1024 na primeira colocação com o desempenho máximo alcançado no LINPACK (Rmax) de 59.7 GFLOPS. A segunda lista, de novembro de 1993 colocava o japonês Numerical Wind Tunnel na primeira colocação com o desempenho Rmax de 124 GFLOPS. A partir de então é possível notar a cada atualização da lista a rápida melhoria do desempenho dos supercomputadores.

Um marco importante para a supercomputação foi o do primeiro supercomputador a alcançar desempenho superior a 1 TFLOPS de desempenho. O computador em questão era o ASCI Red, que apareceu em primeiro na lista de junho de 1997. Em junho de 2008, 11 anos depois, o IBM Roadrunner apareceu na primeira colocação da TOP500 e foi o protagonista de um novo marco, o primeiro computador a atingir o desempenho superior a 1 PETAFLOPS no LINPACK. O desafio da vez é produzir supercomputadores que operem em *exascale*, ou seja, acima dos 10^{18} FLOPS.

Apesar de HPC estar ligado a supercomputadores, é comum a confusão entre os ter-

mos. Além dos supercomputadores, um sistema de HPC pode ser composto por sistemas distribuídos, como *clusters*. Um exemplo clássico de um sistema de HPC distribuído, é a rede de bitcoins, que em dezembro de 2015 era dita ser 11000 vezes mais rápida que os top500 de novembro de 2015 [13].

2.3. HPC no Brasil

Segundo [18], em novembro de 2015, com seis computadores o Brasil era o 10^o colocado entre os países com o maior número de computadores de alto desempenho no Top 500. Entre as pesquisas desenvolvidas com estes computadores estavam o tratamento contra o Mal de Alzheimer, o mapeamento genético do vírus Zika e o desenvolvimento da indústria de óleo e gás.

Na lista atual dos Top 500, apenas 2 computadores brasileiros estão presentes, o Santos Dumont na posição 471 e o Cloud Provider na posição 480.

Segundo o site do Santos Dumont [12], o principal supercomputador brasileiro, o supercomputador realiza principalmente tarefas de cunho científico, nas seguintes porcentagens 1:

Área do conhecimento

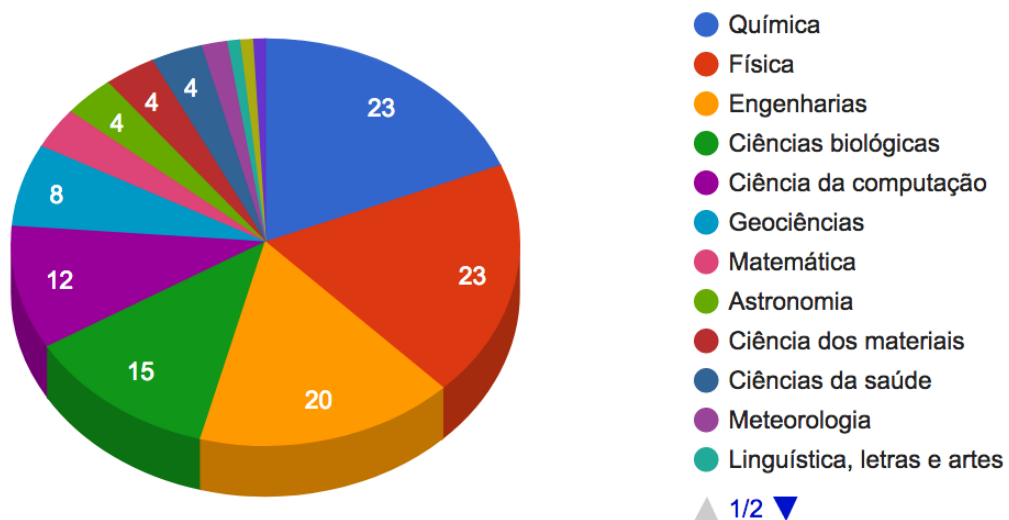


Figura 1: Número de projetos por área do conhecimentos que usam o supercomputador SDumont do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) [12].

2.4. Futuro

Além da meta de alcançar um poder computacional em *exascale*, um dos problemas mais importantes para o futuro é a questão energética [26].

A partir de 2007, a Top 500 lançou uma segunda lista chamada Green500 [20], que reúne os 500 supercomputadores com maior desempenho por watt.

Segundo Gordon Moore [26], vários são os motivos para continuar as pesquisas em HPC e desenvolvimento de melhores supercomputadores. Primeiro porque "há coisas que não se pode fazer sem a capacidade fornecida pela computação de alto desempenho", segundo porque "quanto mais se aumenta a performance, maior é a gama de problemas que podem ser abordados" e "muito mais problemas complexos podem ser abordados de uma maneira útil".

Além desses desafios, tanto a ACM como a Intel, possuem programas de incentivo à utilização de HPC através do oferecimento de bolsas de estudos para interessados representantes de minorias pelo programa SIGHPC Fellowship [15]. O SIGHPC é um grupo que une pessoas com interesse em HPC para troca de experiências.

2.5. SC Conference

Fundada em 1988, a conferência anual do SC continua a crescer de forma constante em tamanho e impacto a cada ano. Aproximadamente 5.000 pessoas participam do programa técnico, com cerca de 11.000 pessoas em geral. A SC construiu uma comunidade diversificada de participantes, incluindo pesquisadores, cientistas, desenvolvedores de aplicativos, equipe e gerenciamento de computadores, pessoal da indústria informática, gerentes de programas de agências, jornalistas e funcionários do Congresso. Essa diversidade é um dos principais pontos fortes da conferência, tornando-se um fórum anual "deve comparecer" para as partes interessadas em toda a comunidade informática técnica.

O programa técnico é o coração do SC. Ele abordou praticamente todas as áreas de pesquisa científica e de engenharia, bem como desenvolvimento tecnológico, inovação e educação. Suas apresentações, tutoriais, painéis e fóruns de discussão incluíram avanços em muitas áreas e inspiraram áreas inovadoras e inovadoras de computação.

A partir de 2013, os organizadores da conferência SC lançaram o "*HPC Matters*" para encorajar os membros da comunidade de ciências computacionais a compartilhar suas ideias, visões e experiências a respeito da forma como os computadores de alto desempenho são usados para melhorar a vida das pessoas em todo o mundo. Em 2015 a palestra de abertura foi realizada por Diane Bryant, na época vice presidente sênior e gerente geral do Intel's Data Center Group, hoje presidente do grupo.

A próxima conferência (SC Conference 2017) que será em Novembro em Bangalore na Índia, tem como objetivos gerais:

- Para discutir os desafios na criação de infraestrutura de energia inteligente para cidades inteligentes.
- Para chegar a técnicas e soluções para fornecimento de energia estável e evitar grandes apagões no sistema através de micro grid, geração e armazenamento distribuídos.
- Para discutir as soluções técnicas que podem ser implantadas rapidamente e tecnicamente comercialmente viáveis, permitindo que as redes existentes aceitem injeções de energia de todos os recursos energéticos, como o vento, o solar, as gerações distribuídas, etc.
- Para analisar as necessidades de infra-estrutura em cidades inteligentes com foco em veículos elétricos.
- Para permitir novos produtos e serviços, tais como aplicações de medidores inteligentes para monitoramento de uso de energia, sistemas de automação residencial, gerenciamento de demanda lateral para melhorar as capacidades da rede existente ao acomodar recursos energéticos distribuídos, que são de natureza intermitente e se tornarão mais abrangentes no futuro.

3. Aplicações/HPC Matters

A partir da popularização dos computadores pessoais na década de 1980 e 1990 e depois com a difusão dos *smartphones* em meados da primeira década do século XXI, é mais que sabido que a computação está difundida em nossas vidas. No entanto, diferentemente da computação "normal", a computação de alto desempenho está ligada a nossas vidas, mas não diretamente pelo usuário final. A computação de alto desempenho geralmente influencia nossas vidas através da academia, indústria, institutos de pesquisa e uso governamental.

Na indústria, muitos das aplicações são de empresas de computação, sejam servidores ou alguns serviços especializados. As grandes empresas da tecnologia (Google e Facebook, por exemplo) utilizam supercomputadores para processar grandes volumes de dados e para treinar suas inteligências artificiais, que serão destinados ao usuário final através de anúncios especializados. Outras empresas de outros ramos utilizam HPC para desenvolvimento de novos produtos, que também tem o intuito de chegar ao mercado e ao usuário final.

Na academia, os supercomputadores são usados para geração de modelos de estudos em diversas áreas e podem ser utilizados para testar se esses modelos condizem com a realidade. Em biologia, por exemplo, é possível testar hipóteses com relação ao comportamento de determinados genes em conjunto.

Nas pesquisas, tem-se principalmente os estudos climáticos para previsão de temperatura e de condições específicas. Neste caso em específico, não só serve para conhecimento, serve para salvar vidas. Um exemplo muito comum é de previsão de ciclones analisando dados de tempestades tropicais, em que quanto mais rapidamente a computação é realizada, maior é o tempo que as pessoas afetadas tem para se preparar para a situação.

No SC15 é comemorado o uso de HPC e sua influência na transformação de indústrias, processos, conhecimento e a vida das pessoas. As próximas subseções mostram exemplos de computação de alto desempenho apresentados na SC15, através do HPC Matters, programa para divulgação da importância de HPC no mundo [14].

3.1. Paypal

Segurança para combater a ameaça, o PayPal implantou um cluster HPC para ajudar a detectar cobranças fraudulentas. O processamento de Megabytes ou Gigabytes de dados

em menos de um segundo, 13 milhões de transações financeiras a cada dia. Alavancando tecnologias, a detecção que anteriormente demorava duas semanas, agora acontece em tempo real, enquanto a análise de fraude preditiva oferece visibilidade e mapeamento de ameaças emergentes.

3.2. MH370

Simulação de cinco cenários da colisão da nave MH370 com a água do mar, fim de entender como aconteceu a colisão da aeronave, uma vez que não foram encontrados detritos. Foram testados vários ângulos de impacto e isso só se tornou viável graças ao uso de HPC. Segundo os experimentos, explicação mais plausível é a entrada de água verticalmente, pois diminui a chance de quebra da aeronave.

3.3. Bateria

Esse exemplo se trata da utilização de HPC para testar combinações de elementos através do Electrolyte Genome project. Eles conseguem identificar compostos com potencial de uso e que são sintetizados em laboratório para validação. Um exemplo interessante é de uma pesquisadora que quando estudante precisou de um ano para produzir um composto, enquanto que com HPC consegue-se produzir milhares de compostos por semana.

3.4. Aerospace

Com computadores mais potentes é possível simular mais características físicas do avião e dos ambientes a fim de tentar descobrir como o avião interage com o ambiente ao voar e como é possível economizar energia e diminuir custos.

3.5. Medicina

Ao invés de ter um modelo genérico de tratamento, é possível criar tratamentos personalizados.

Mal de Parkinson - utilizando high performance visualization, é possível definir que área aplicar uma corrente elétrica e em qual voltagem, para que haja melhores resultados em um tratamento.

Tratamento de epilepsia - para 15% das crianças com epilepsia não basta o uso de remédio, é necessário procedimento cirúrgico. Então utilizando HPC o cérebro dessas crianças é modelado com detalhe e é possível saber onde agir.

Configuração experimental e taxas de digitação durante sessões de perguntas e respostas de ritmo livre, um exemplo disso é o tratamento de pessoas sem movimento (sem movimento de membros).

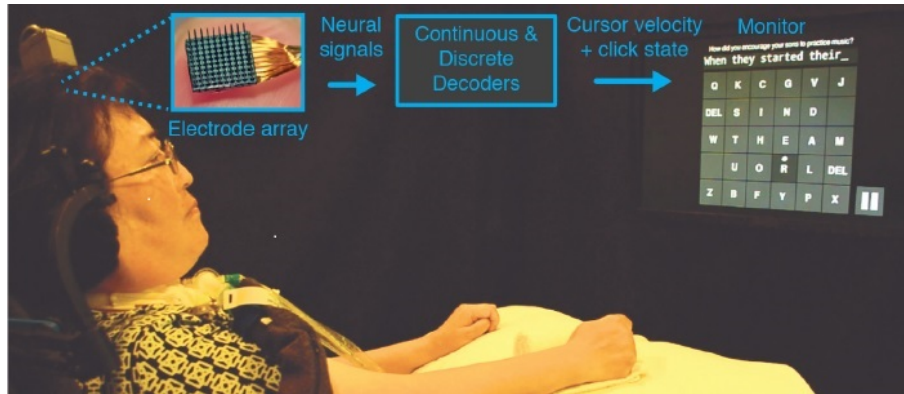


Figura 2: Interface Gráfica para interagir com o Paciente com total deficiência motora

A comunicação é um aspecto importante da vida cotidiana, alcançada através de diversos métodos, tais como Conversando, escrevendo e usando interfaces de computador que cada vez mais fornecem um meio importante para Interagir com outras pessoas através de canais como e-mail e mensagens de texto.

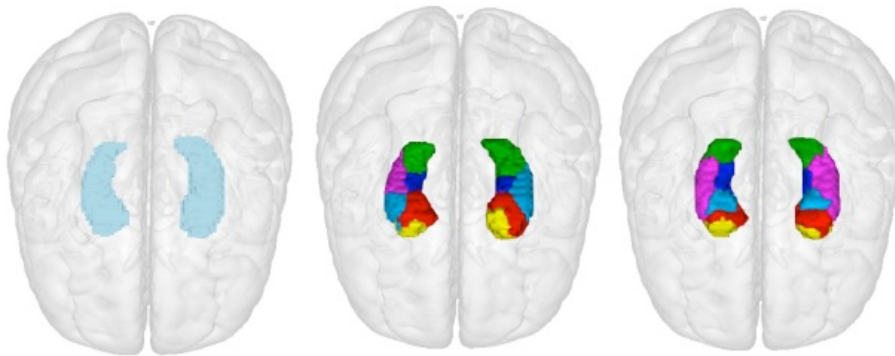


Figura 3: Definição de Cores para Identificar Cérebros de Criança / Adulto / Idoso (na ordem)

Ao combinar dados sobre conectividade cerebral e comportamento humano, os pesquisadores descobriram que a região é um mosaico de elementos distintos, com cada um executando um trabalho diferente.

Para o tratamento de Epilepsia, o processo de cirúrgico foi reduzido e quando inecessário a invasão, o processo ficou mais preciso.

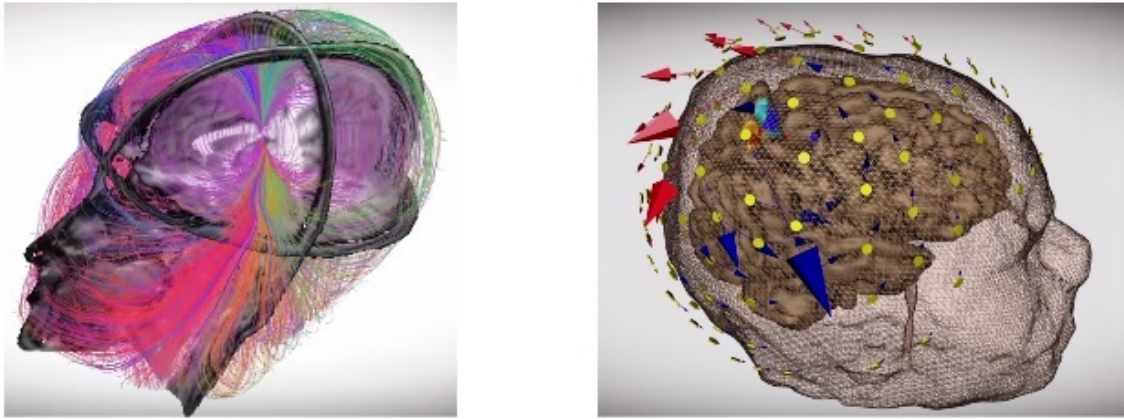


Figura 4: Mapeamento com Exatidão para intervenção Cirurgica

3.6. *Previsão de tempestades*

Tendo muitos dados, quanto mais potente o computador, mais coisas é possível calcular e portanto são realizadas melhores previsões.

Quanto mais rápido o computador, mais rápido é para assimilar e dissipar informação. Exemplo: o quanto antes for possível dar informação de uma catástrofe, melhor pode ser a tomada de ação das pessoas envolvidas.

3.7. *Entretenimento*

Quanto maior o poder computacional envolvido, maior é o nível de detalhamento possível em produções artísticas, principalmente relacionadas a cinema e jogo.

Tanto a renderização de coisas como cabelo, neve, água, luz, roupas podem ser feitos mais rapidamente, como com mais qualidade, aumentando o nível de compatibilidade com a realidade.

3.8. *Bens de Consumo*

Um exemplo prático é o uso de modelagem e simulação para saber como é o comportamento de fluídos e como eles se comportam em embalagens. Dessa forma é possível propor embalagens que beneficiem o usuário no sentido de usabilidade.

3.9. *Astronomia*

É possível utilizar HPC para estudar o comportamento de galáxias desde a sua formação. Há modelos para estudos de alguns corpos celestes específicos e seu relacionamento com os demais. É possível estudar também o comportamento de matéria e energia escura e fazer testes de hipóteses a de entender melhor o universo.

3.10. Machine Learning

Machine Learning é uma tendência atual e é muito influenciada pelo HPC. Atualmente, principalmente com a utilização de Deep Learning, a viabilidade do uso de sistemas de HPC tem propiciado uma gama de aplicações muito grande.

Um exemplo bastante falado é o do AlphaGo, em que a inteligência artificial derrotou o então campeão mundial, após muito treinamento possível graças a HPC.

No caso de Machine Learning especificamente, são produzidos hardware específico para utilização de computação de alto desempenho [22].

Neste trabalho não foi abordado mais coisas de Machine Learning e IA, devido a abordagem deste tema por outros grupos.

4. HPC e o Aquecimento Global

Dentre as diversas aplicações de computação de alto desempenho a simulação do clima terrestre está entre as que mais demandam poder computacional. Nestas simulações, o clima é descrito por modelos matemáticos que utilizam técnicas de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para descrever a física e a interação das diversas componentes do clima, entre elas a atmosfera e o oceano. Tanto a atmosfera e o oceano são fluidos e por sua vez regidos pelo sistema de equações de *Navier-Stokes*. Tal sistema, ainda não possui uma solução analítica completa e é considerado pelo *Clay Mathematics Institute* um dos sete problemas matemáticos do milênio¹. Contudo, soluções numéricas considerando aproximações adequadas ao fluido de estudo são amplamente utilizadas para resolver tal problema. No caso dos modelos climáticos, a necessidade do grande poder computacional deve-se fundamentalmente à necessidade de utilizar um sistema de grade que englobe todo o espaço a ser modelado. Quanto maior o número de pontos desta grade maior será a demanda computacional para resolver o problema.

A figura 5 mostra uma série temporal da projeção anomalia de temperatura média do planeta calculada por diversos modelos climáticos. Apesar de ser uma previsão, tais resultados são bastante robustos, pois tais modelos são representações baseadas em conceitos da física clássica bastante consolidados. Além disso, não é uma única simulação. Pelo contrário, a análise de tais resultados é feita por *ensembles*, que são coleções de

¹<http://www.claymath.org/millennium-problems> [Acessado em Junho/2017]

simulação feitas por um único modelo numérico com pequenas perturbações nas condições iniciais (*initial conditials*). Diversas institutos de grandes centros tecnológicos possuem seu próprio modelo climático, entre eles o MIT-GCM [7], o Max-Planck Institute [10], o *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* [5], o NCAR [11], entre vários outros. Cada um desses modelos possui características próprias, como esquemas numéricos, uso de parametrizações, etc. Ainda assim, os resultados gerados por diferentes modelos são bastante consistentes e reproduzem a mesma tendência de longo período, corroborando ainda mais para a robustez dos resultados de suas simulações.

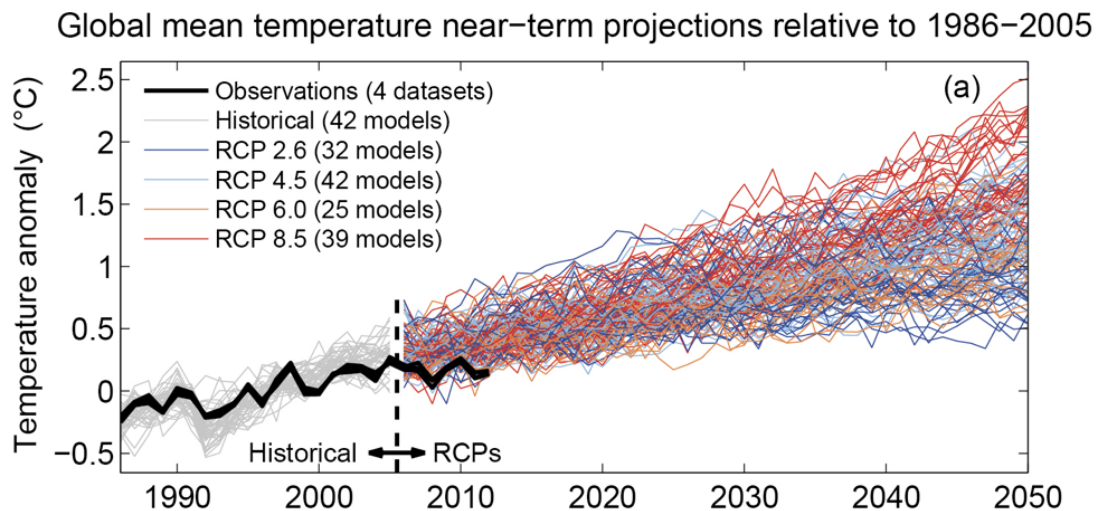


Figura 5: Exemplos de resultados gerados por modelos climáticos retirado de [17]. Séries temporais da projeção do aumento de temperatura simuladas por um conjunto de modelos climáticos. A linha preta refere-se à dados observados. As demais linhas são resultados de simulações.

4.1. O que é um modelo climático

Como mencionado anteriormente, a atmosfera e o oceano são duas das principais componentes do clima. Um modelo climático é um conjunto de dois ou mais modelos que estão acoplados (trocando energia) e cada um destes modelos é responsável por simular cada uma das componentes do clima. Ou seja, é uma representação matemática dessas componentes e de suas interações. Os modelos climáticos mais simples contam somente com uma componente atmosférica, uma componente oceânica e um acoplador entre esses dois módulos. Já os modelos mais sofisticados contam com diversas componentes, entre elas, criosfera, biosfera, litosfera, modelos biogeoquímicos, entre outros.

4.2. O "tamanho" do problema

O modelo matemático que descreve a dinâmica do clima considera o espaço e o tempo contínuo. Para traduzir isso para o computador é necessário discretizar o espaço e o tempo. Quanto maior o refinamento dessa discretização maior será a demanda computacional envolvida. A escolha do quão bom será esse refinamento será sempre um *trade-off* entre o poder computacional disponível e a escolha do problema a ser resolvido.

Um exemplo de grade usado em um domínio global é apresentado na figura 6. Nesta figura observa-se também a evolução do refinamento das grades dos modelos climáticos utilizados para a confecção do 5 Relatório de Avaliação do clima do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)² em 2007, com uma resolução espacial de cerca de 87,5 km e atual geração de modelos climáticos, com uma resolução espacial de aproximadamente 30 km. Um dos principais fatores responsável por tal ganho de resolução é a disponibilidade (tecnológica e preço) de maior poder computacional.

Para se ter uma ideia mais prática do tamanho do problema a ser resolvido vamos considerar o seguinte exemplo:

1. Assumir uma grade com resolução horizontal de 55 km;
 - pontos em longitude x latitude: **720° x 180°** (considerando que 1° 110 km);
2. Resolução vertical de 300 m;
 - considerando somente o tamanho da primeira porção da atmosfera (troposfera) com tamanho aproximado de 15 km: **50** camadas;
3. Resolução temporal: 30 min;
 - o passo de tempo (*time-step*) do modelo apropriado para uma simulação climática é de 30 min;
4. Número de anos a ser simulado: 100;
 - geralmente em um experimento climático simulam-se 100 anos. Logo, dividindo-se 100 anos em intervalos de 30 minutos: **1753152**

Considerando os números acima, o total de vezes que teremos que resolver uma determinada equação do problema será:

²Organização científico-política responsável por centralizar o conhecimento acerca das mudanças climáticas

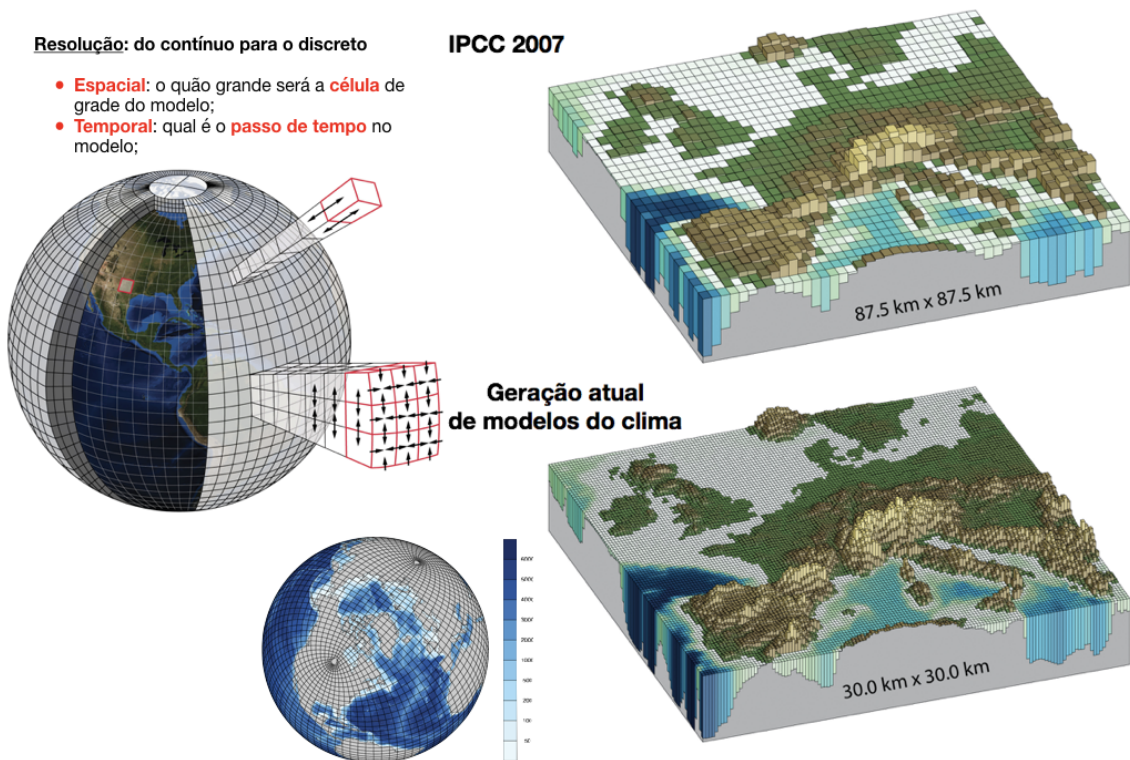


Figura 6: Exemplos de resoluções de grade para um domínio global/climático adaptado de [17]. A atual geração de modelos climáticos em conjunto aos recursos computacionais atuais já é capaz de gerar simulações globais em escala de clima com resolução horizontal em torno de 30 km.

$$720 \times 360 \times 50 \times 1753152 = 22.720.849.920.000$$

Essa é uma aproximação bastante grosseira e além de tudo subestima bastante o número de operações realizadas. Contudo, com números em torno de 22 trilhões já é possível notar que o problema da simulação do clima é de fato um problema que demanda uma alta capacidade de processamento. Com relação à demanda de armazenamento, armazenar e analisar os resultados de tais simulações também têm sido um grande desafio principalmente com relação à técnicas estatísticas de análise de grande volumes de dados e de visualização de dados.

4.3. Um supercomputador para estudos climáticos

No começo de 2017 o *National Center for Atmospheric Research* lançou o seu mais novo e potente supercomputador dedicado ao uso das ciências climáticas e áreas afins. O

supercomputador foi batizado de Cheyenne [2] e nos testes iniciais atingiu uma performance de pico de 5.34 *petaflops*. Atualmente ele ocupa a posição 22 [19] entre os **500**. Essa é uma máquina SGI baseada no processador Intel Xeon E5-2697v4.

Uma característica em comum entre a grande maioria dos modelos climáticos é o uso do Fortran (F90) como linguagem dominante nesse tipo de aplicação. Apesar do Fortran ser uma linguagem de programação bastante antiga e considerada "morta" por boa parte da comunidade da ciência da computação ela ainda é a que atinge uma das melhores performances nesse tipo de aplicação em conjunto com as bibliotecas matemáticas otimizadas da Intel (Intel Parallel Studio XE) [9].

5. Conclusão

À medida que o crescimento exponencial de dados remodela a indústria, a engenharia e a descoberta científica, o sucesso passou a depender da capacidade de analisar e extrair informações de conjuntos de dados incrivelmente grandes.

Tanto HPC transforma as aplicações, como as aplicações transformam o HPC, e atualmente, vemos uma tendência da valorização do HPC devido a grandes vantagens oferecidas.

Os desafios para o futuro incluem o melhor aproveitamento energético e quebra da barreira dos EFLOPS.

6. Referências

- [1] CIA, 2017. The world factbook.
URL <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2184rank.html>
- [2] CISL, 2017. Cheyenne.
URL <https://www2.cisl.ucar.edu/resources/computational-systems/cheyenne>
- [3] Cister, 2017. About us.
URL <http://cister.isep.ipp.pt/info>
- [4] Cister, 2017. Research topics.
URL <http://cister.isep.ipp.pt/research/>
- [5] Delworth, T. L., Broccoli, A. J., Rosati, A., Stouffer, R. J., Balaji, V., Beesley, J. A., Cooke, W. F., Dixon, K. W., Dunne, J., Dunne, K. A., Durachta, J. W., Findell, K. L., Ginoux, P., Gnanadesikan, A., Gordon, C. T., Griffies, S. M., Gudgel, R., Harrison, M. J., Held, I. M., Hemler, R. S., Horowitz, L. W., Klein, S. A., Knutson, T. R., Kushner, P. J., Langenhorst, A. R., Lee, H.-C., Lin, S.-J., Lu, J., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Ramaswamy, V., Russell, J., Schwarzkopf, M. D., Shevliakova, E., Sirutis, J. J., Spelman, M. J., Stern, W. F., Winton, M., Wittenberg, A. T., Wyman, B., Zeng, F., Zhang, R., 2006. Gfdl's cm2 global coupled climate models. part i: Formulation and simulation characteristics. *Journal of Climate* 19 (5), 643–674.
URL <https://doi.org/10.1175/JCLI3629.1>
- [6] Exchange, E., ??? Processing power compared.
URL <http://pages.experts-exchange.com/processing-power-compared/>
- [7] Forget, G., Campin, J.-M., Heimbach, P., Hill, C. N., Ponte, R. M., Wunsch, C., 2015. Ecco version 4: an integrated framework for non-linear inverse modeling and global ocean state estimation. *Geoscientific Model Development* 8 (10), 3071–3104.
URL <http://www.geosci-model-dev.net/8/3071/2015/>
- [8] G., S., Grace, B., kamakshamma, V., 2014. A review of high performance computing. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)* 16, 36–43.

- [9] Intel, 2017. Intel® parallel studio xe 2017.
URL <https://software.intel.com/en-us/intel-parallel-studio-xe>
- [10] Jungclaus, J. H., Fischer, N., Haak, H., Lohmann, K., Marotzke, J., Matei, D., Mikolajewicz, U., Notz, D., von Storch, J. S., 2013. Characteristics of the ocean simulations in the max planck institute ocean model (mpiom) the ocean component of the mpi-earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5 (2), 422–446.
URL <http://dx.doi.org/10.1002/jame.20023>
- [11] Kay, J. E., Deser, C., Phillips, A., Mai, A., Hannay, C., Strand, G., Arblaster, J. M., Bates, S. C., Danabasoglu, G., Edwards, J., Holland, M., Kushner, P., Lamarque, J.-F., Lawrence, D., Lindsay, K., Middleton, A., Munoz, E., Neale, R., Oleson, K., Polvani, L., Vertenstein, M., 2015. The community earth system model (cesm) large ensemble project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96 (8), 1333–1349.
URL <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00255.1>
- [12] LNCC, 2017. Lncc - sdumont.
URL http://sdumont.lncc.br/projects_statistics.php
- [13] Rowley, J. D., 2015. The bitcoin network is 11000x faster than the top 500 supercomputers combined.
URL <http://jasondrowley.com/2015/12/04/the-bitcoin-network-is-11000x-faster-than-the-top-500-supercomp>
- [14] SC15, 2015. Sc15 videos.
URL <http://sc15.supercomputing.org/media/video-gallery.html>
- [15] SIGHPC, A., 2017. Acm sighpc.
URL <http://www.sighpc.org/>
- [16] Spectrum, 2017. The human brain project reboots: A search engine for the brain is in sight.
URL <http://spectrum.ieee.org/computing/hardware/the-human-brain-project-reboots-a-search-engine-for-th>

- [17] Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, B., Midgley, B., 2013. Ipcc, 2013: climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change .
- [18] TechTudo, 2016. Brasil abriga seis supercomputadores, quatro deles no top 500 do mundo.
URL <http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2016/07/brasil-tem-seis-supercomputadores-no-top-500-mundial-conheca-maquinas.html>
- [19] Top500, 2017. Cheyenne - sgi ice xa.
URL <https://www.top500.org/system/178965>
- [20] Top500, 2017. Green500 lists.
URL <https://www.top500.org/green500/lists/>
- [21] TOP500, 2017. Top500 lists.
URL <https://www.top500.org/lists/>
- [22] Wikipedia, 2017. Ai accelerator.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/AI_accelerator
- [23] Wikipedia, 2017. Atlas (computer).
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Atlas_\(computer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Atlas_(computer))
- [24] Wikipedia, 2017. Cray-1.
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Cray-1>
- [25] Wikipedia, 2017. Top500.
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/TOP500>
- [26] Youtube, 2015. Sc15 hpc matters plenary with intel's diane bryant.
URL <https://www.youtube.com/watch?v=kuh5qzZI2HM>