

Desenvolvimento de Solver Paralelo em Arquiteturas Híbridas para Simulação de Reservatórios e de Problemas de Geomecânica

José Roberto P. Rodrigues
Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES)

Escola de Verão – LNCC – Janeiro 2021

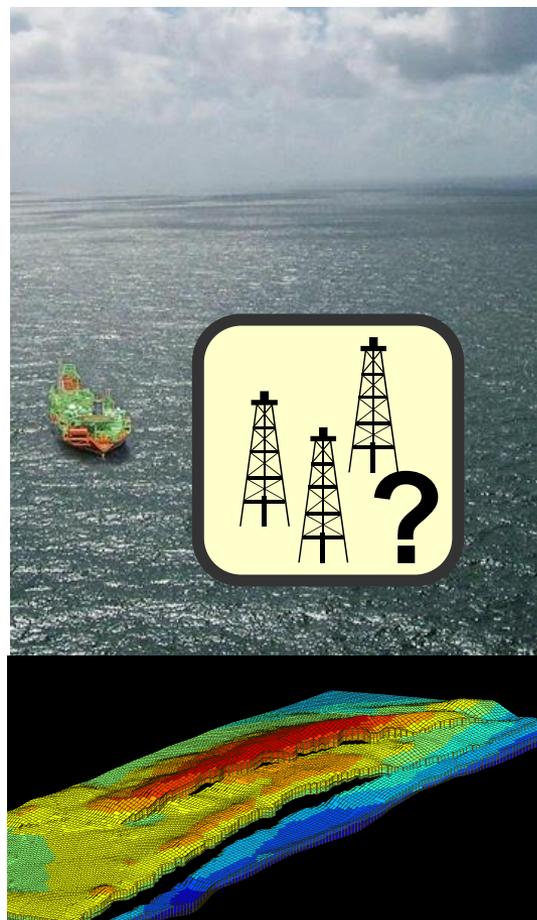
- Trabalho conjunto envolvendo profissionais da Petrobras e de diversas instituições acadêmicas brasileiras
 - D. Augusto, L.M. Carvalho, C. Conopoima, Mateus O. Figueiredo, L. Gasparini, P. Goldfeld, Victor M. Leite, J. Panetta, João P. Ramirez, M. Souza



Tópicos

- Simulação de Reservatórios (Escoamento e Geomecânica)
 - Motivação
 - Características dos Simuladores
 - Descrição do SolverBR
 - Acoplamento com os Simuladores
 - Resultados
 - Próximos passos
-

Simulação de Reservatórios



Quantos poços?

Onde colocar os poços?

Que tipo de poço?

(Vertical, Horizontal, Multilateral) ?

Injeção de água? CO₂? etc.

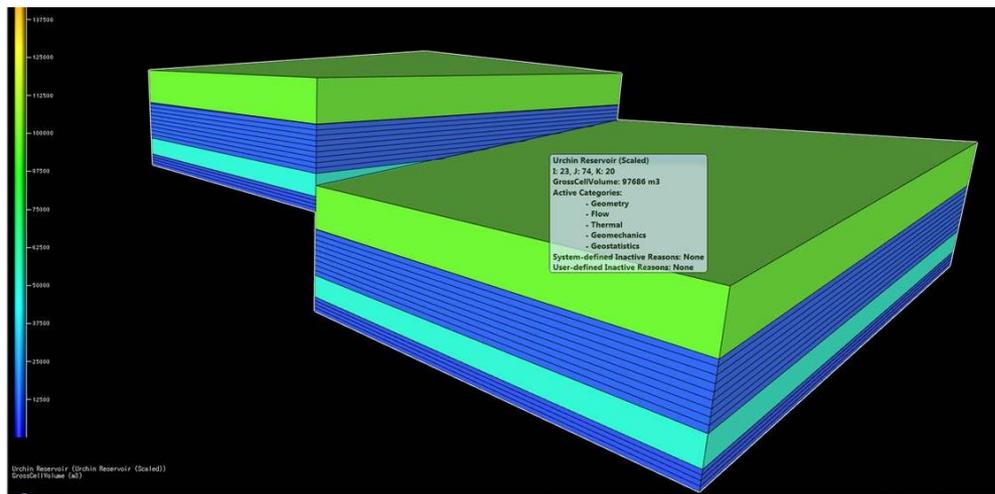
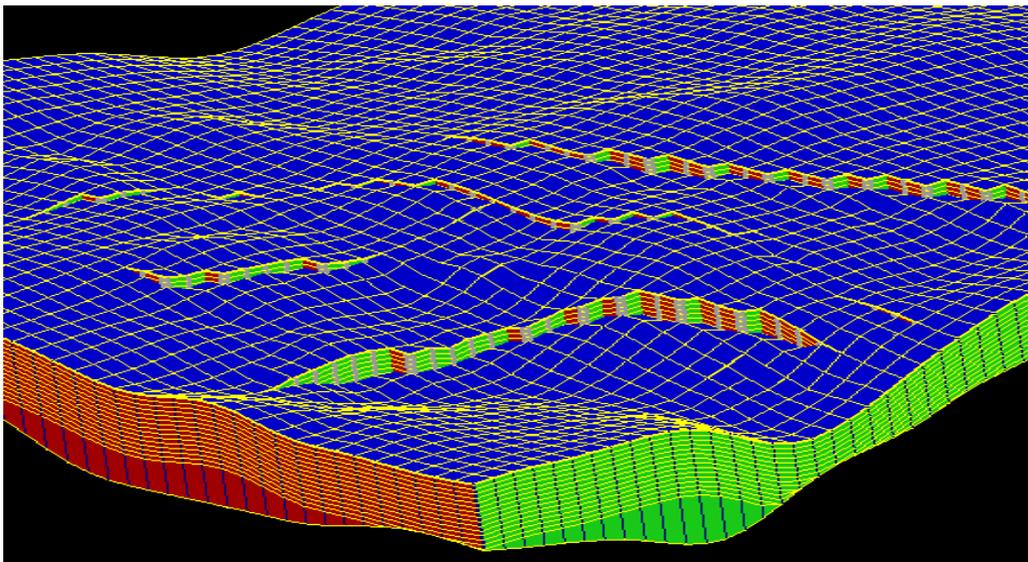
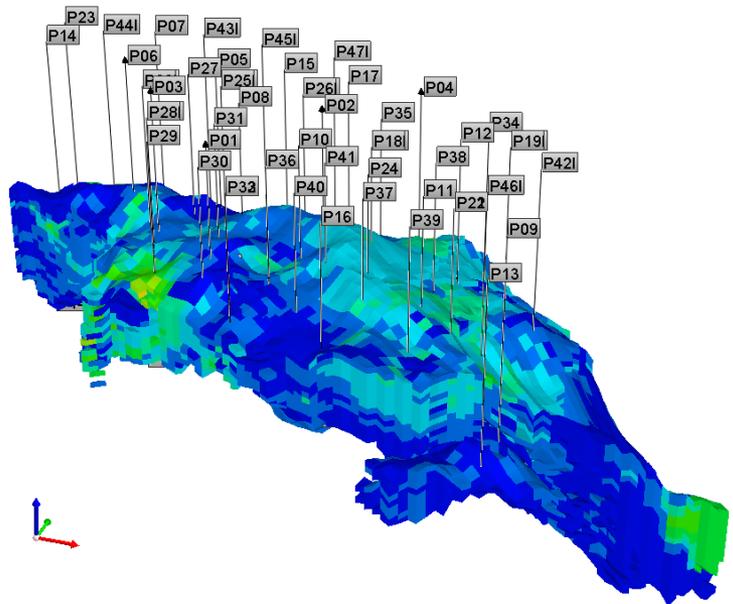
Como operar os poços?

...

Recuperação de óleo?

VPL (\$)?

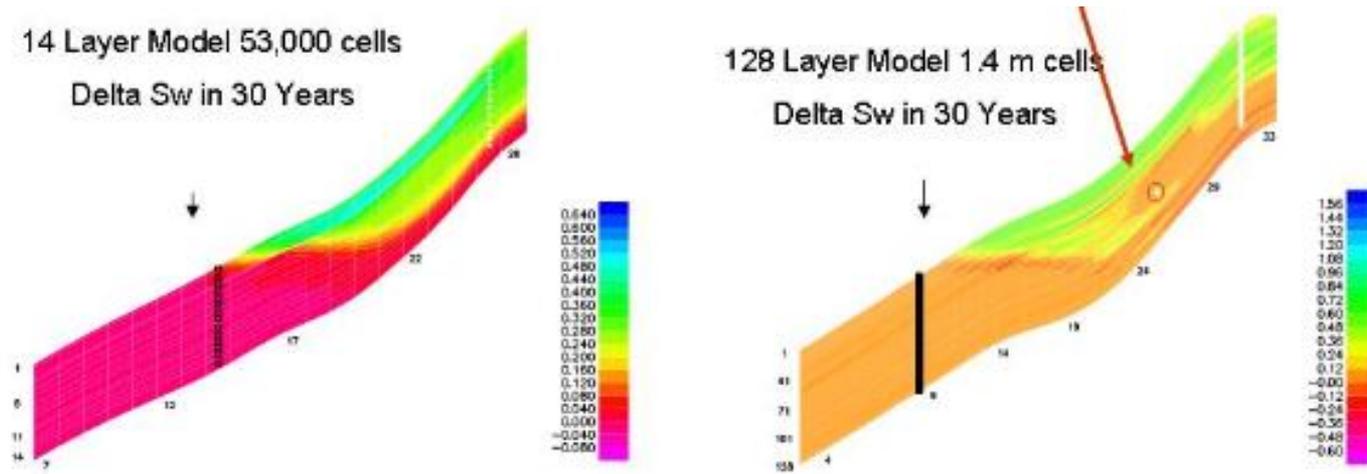
P&D de Exploração e Produção Engenharia de Reservatórios



Simulação de Reservatórios

- As incógnitas são as pressões e saturações em cada célula e as pressões de fundo de poço
 - Pressão é sempre tratada implicitamente, enquanto saturações são tratadas explicitamente (IMPES) ou implicitamente (FIM)
 - AIM faz a seleção IMPES/FIM dinamicamente no tempo e no espaço
 - A cada passo de tempo o método de Newton é utilizado para resolver o sistema de equações algébricas não-lineares
 - Um sistema linear de grande porte tem que ser resolvido a cada iteração do método de Newton
-

A necessidade de representar heterogeneidades geológicas e processos físicos complexos faz com que o número de incógnitas seja muito grande

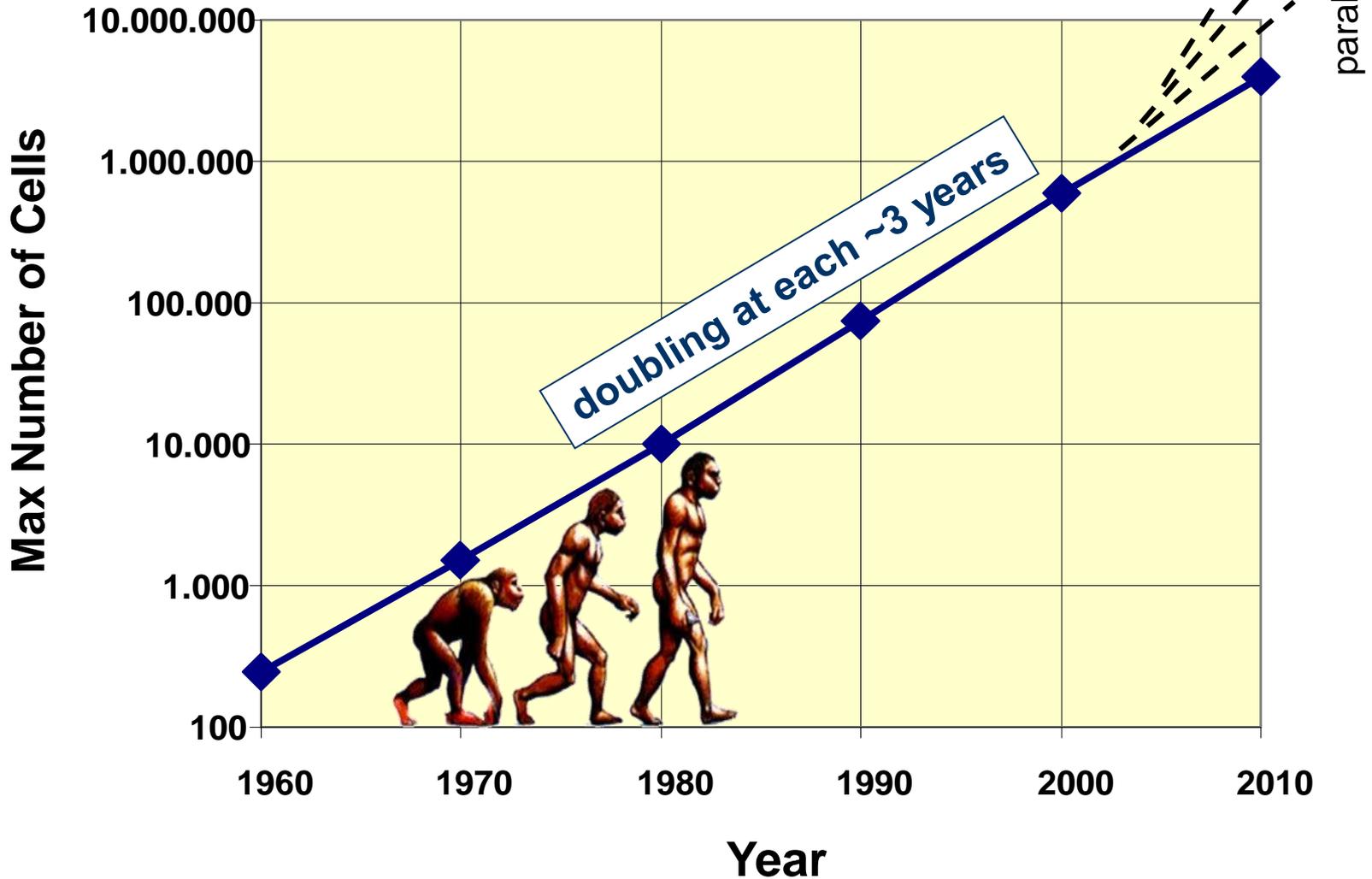


Comparação entre malhas grossa e fina para um modelo de injeção de água

Fonte: Dogru et al., From Mega-Cell to Giga-Cell Reservoir Simulation, paper SPE 116675, 2008

Evolution of Max Number of Active Cells

(Blue Points Data from the World Litterature:
Cosentino, 2001)



Sistemas Lineares

- O simulador gasta a maior parte do tempo no solver linear
 - É também a parte mais difícil de paralelizar

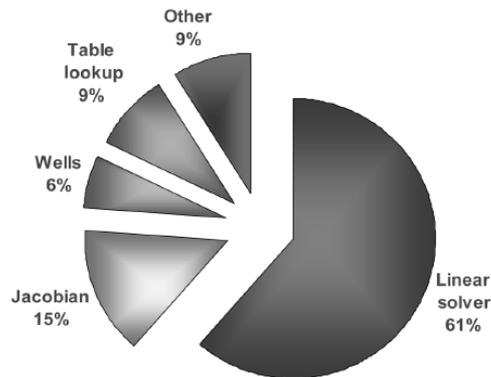


Fig. 3—Pie chart for computer time; 1.2 million-cell real reservoir, 26 years of history, 100 wells (Field Problem 1).

Fonte: Dogru et al., A Parallel Reservoir Simulator for Large-Scale Reservoir Simulation, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Feb 2002

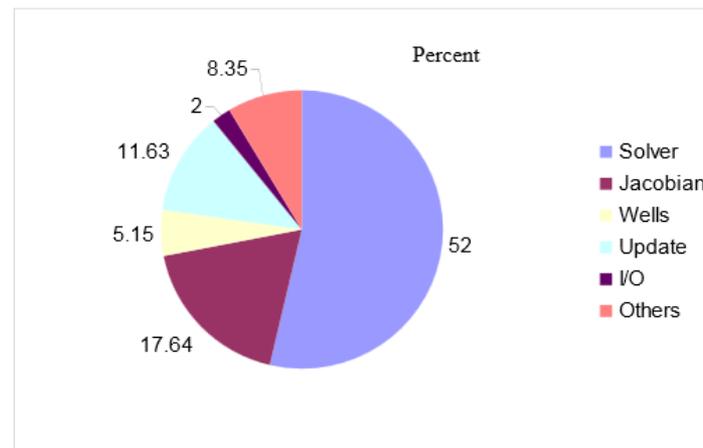
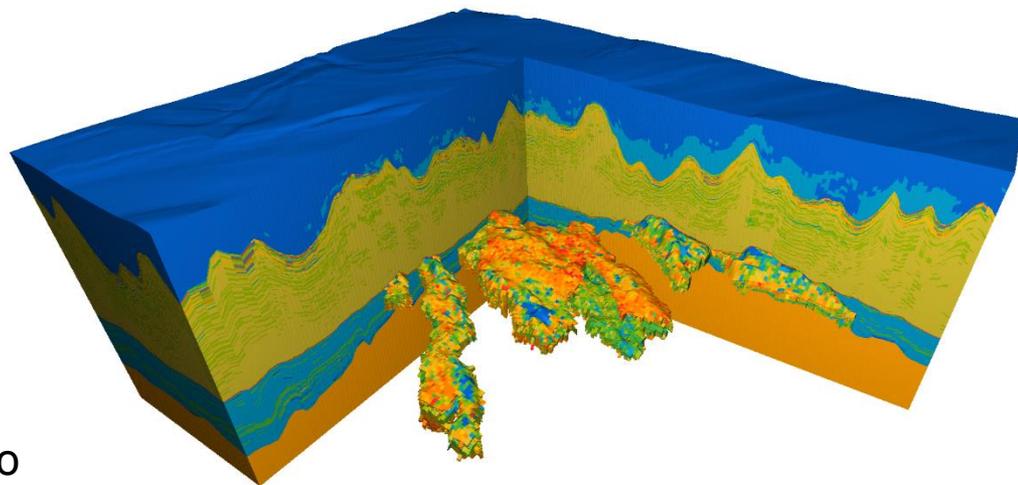


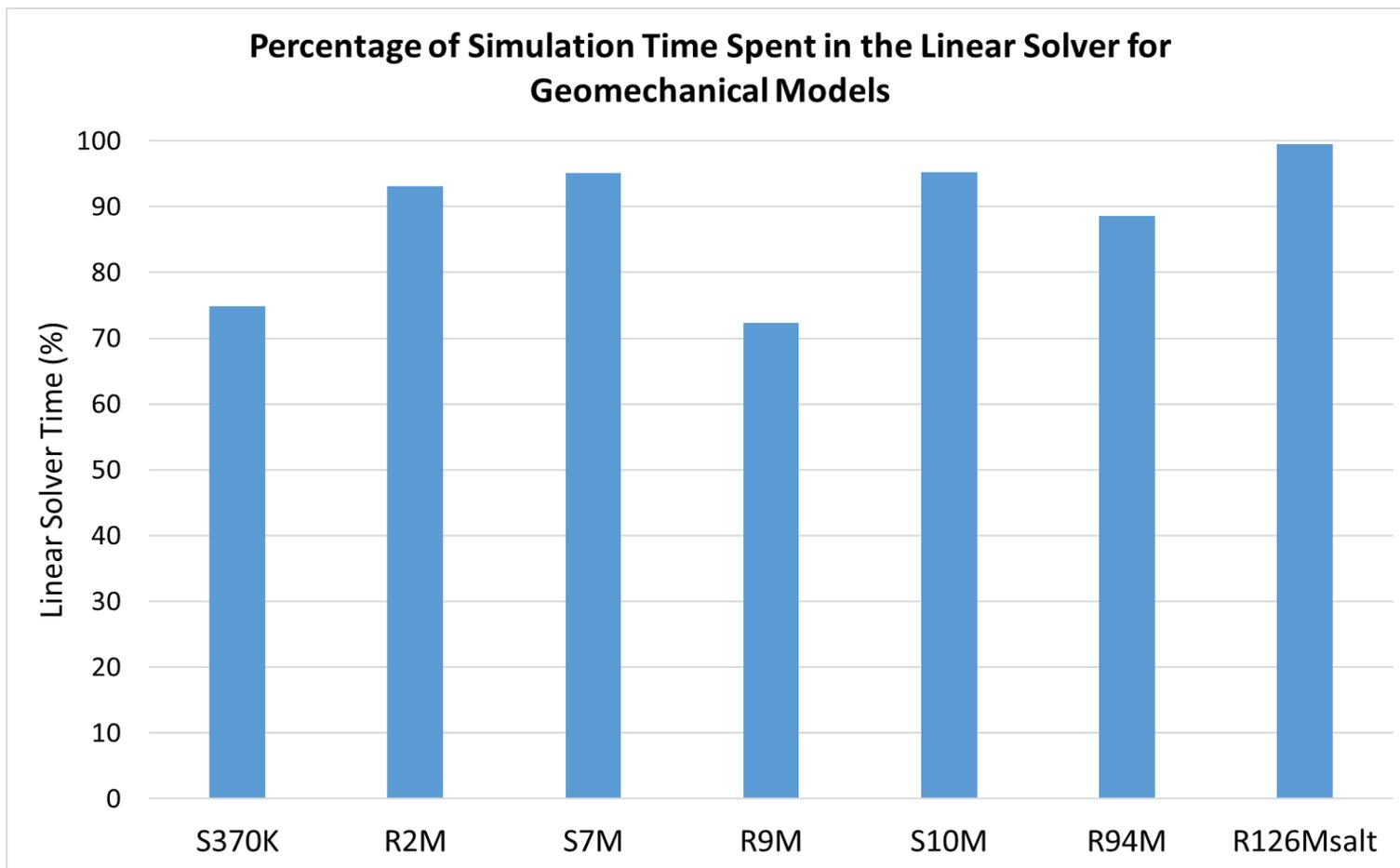
Figure 16- Distribution of Computational Work in a Next Generation Parallel Simulator

Fonte: Dogru et al., From Mega-Cell to Giga-Cell Reservoir Simulation, paper SPE 116675, 2008

Simulação Geomecânica

- Essencial para a produção segura
 - Pressão máxima de injeção, integridade de rochas capeadoras, etc.
- Discretização das equações de conservação de massa e momento por elementos finitos
 - Três incógnitas por nó (deslocamentos em cada direção)
 - Domínio inclui não apenas o reservatório com hidrocarbonetos, mas também as rochas adjacentes
 - Malhas de grandes dimensões (10^6 - 10^8 elementos)

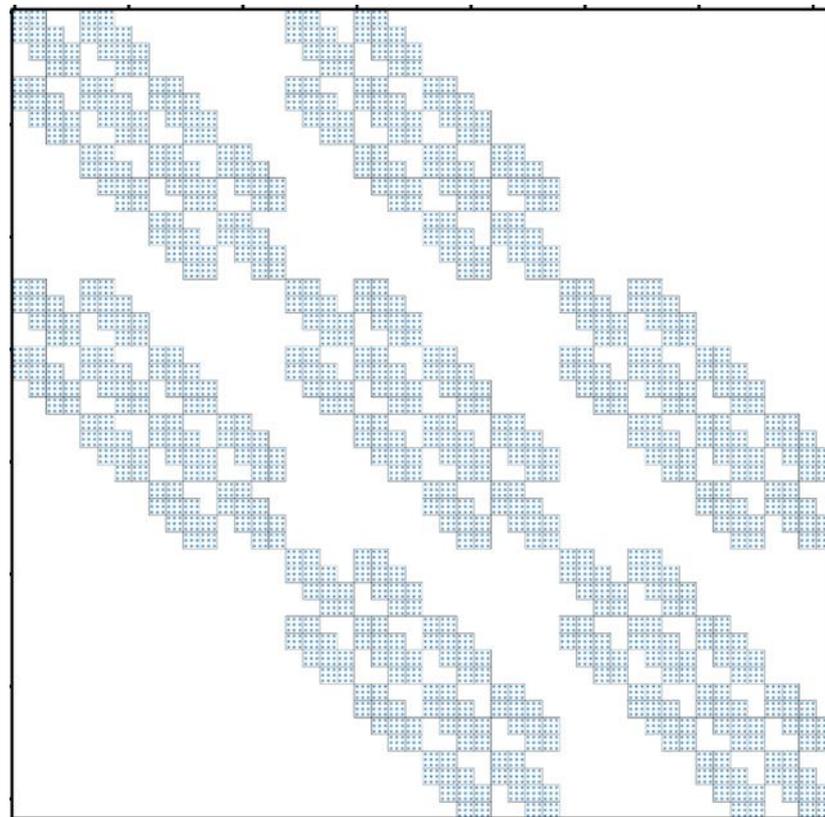




Rodadas no *cluster* Guaricema usando entre 40 e 720 núcleos.

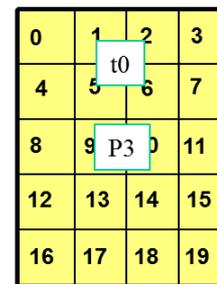
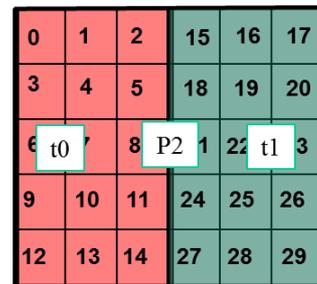
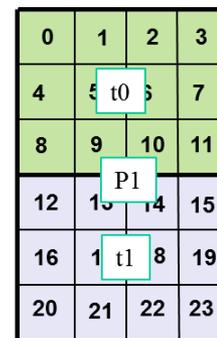
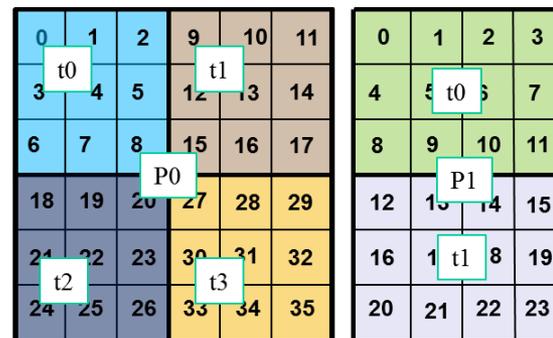
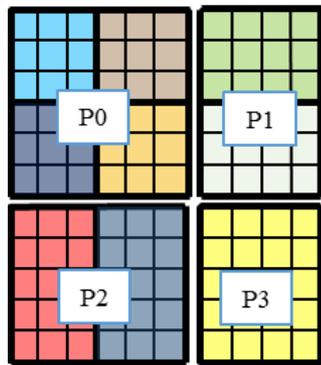
Descrição do SolverBR

- Suporte a matrizes vindas de duas fontes:
 - GeomecBR (simulador geomecânico proprietário)
 - Discretização em EF com matrizes simétricas, operador de 27-pt
 - Uma única matriz em toda simulação
 - PETSc era o solver linear original
 - Paralelismo MPI
 - Simuladores de reservatórios comerciais em uso na Petrobras
 - Matrizes com estrutura de blocos de tamanho variável (AIM, poços)
 - Paralelismo OpenMP

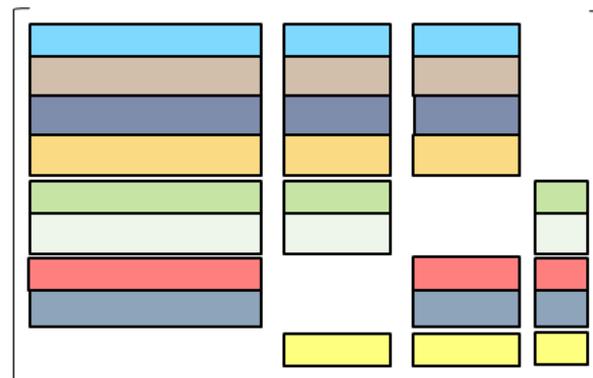


Descrição do SolverBR

- Programação híbrida OpenMP/MPI
 - Estrutura de dados em duas camadas
 - “Super-domínios” \leftrightarrow processos MPI
 - “Domínios” \leftrightarrow threads OpenMP
 - Armazenamento de vetores segue esse layout
 - Matrizes são armazenadas por linha
 - Implementação C++ abstrai o paralelismo e operações entre vetores e matrizes são executadas transparentemente em paralelo
-



$$\begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{02} & & \\ A_{10} & A_{11} & & A_{13} & \\ A_{20} & & A_{22} & A_{23} & \\ & A_{31} & A_{32} & A_{33} & \end{bmatrix}$$



Descrição do SolverBR

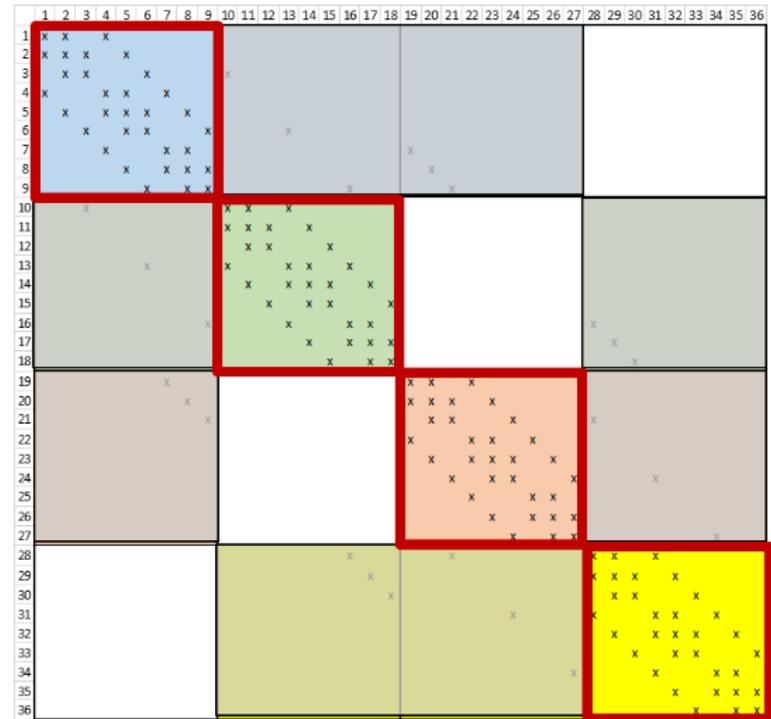
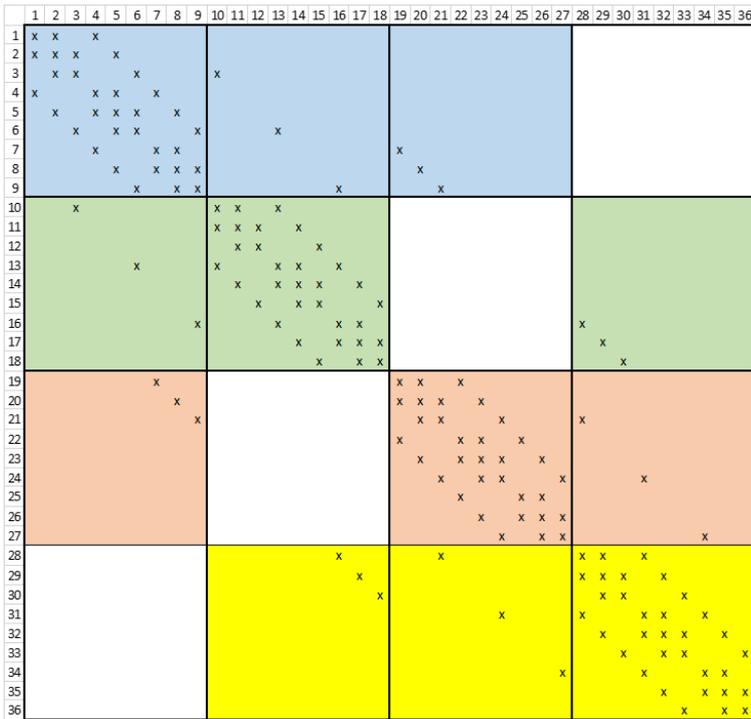
- Métodos de Krylov (gradientes conjugados, GMRES, etc.)
- Precondicionadores

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{array}{l} \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Ax} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{b} \text{ (left preconditioner)} \\ \mathbf{AM}^{-1}\mathbf{y} = \mathbf{b}, \mathbf{y} = \mathbf{Mx} \text{ (right preconditioner)} \end{array}$$

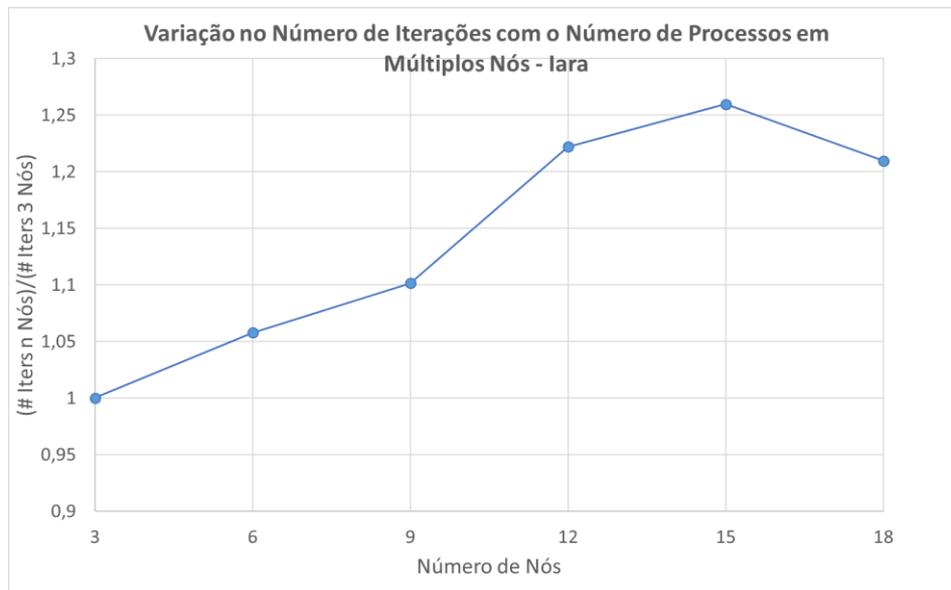
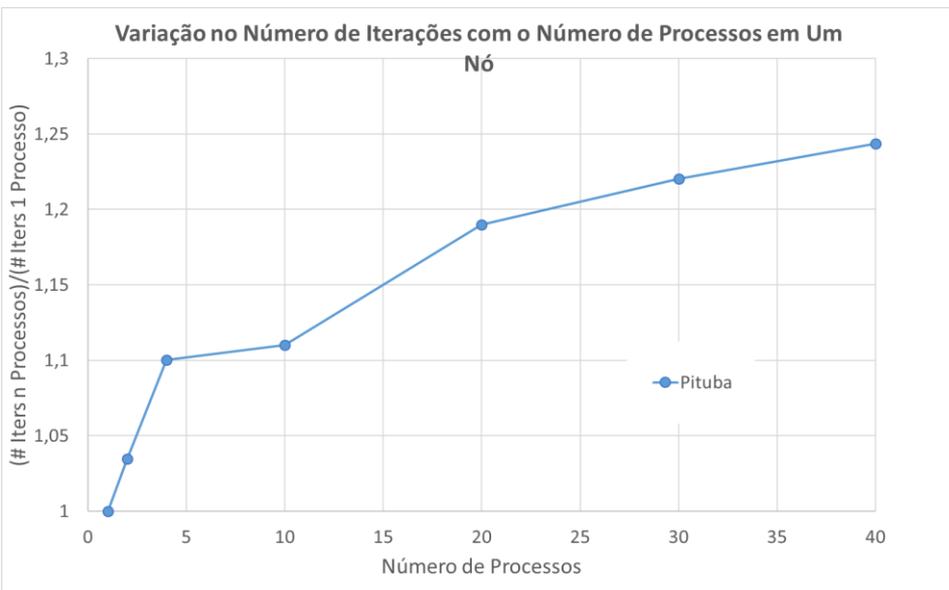
- **M** deve ser escolhido de tal forma que
 - **M** seja uma boa aproximação para **A**
 - Sistemas com **M** sejam baratos de resolver
-

Descrição do SolverBR

- Fatorações incompletas
 - Precondicionador genérico de larga utilização
 - Recorrências dificultam a paralelização
 - Podem falhar em certos problemas
 - Inversas aproximadas
 - Aproximam diretamente a inversa da matriz
 - Paralelizáveis
 - Mais robustos que ILU
-



- Decomposição de Domínios
 - Altamente paralelizável
 - Conexões entre os domínios ignoradas



Descrição do SolverBR

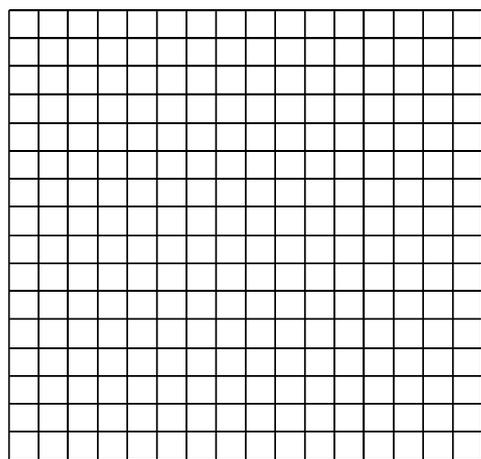
- Combinação de preconditionadores

$$M^{-1} = M_1^{-1} + M_2^{-1} \quad \text{Combinação aditiva}$$

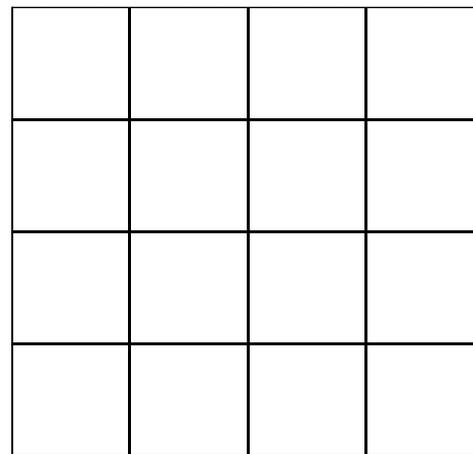
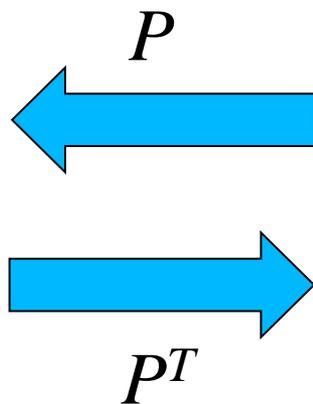
$$M^{-1} = M_1^{-1} + M_2^{-1} - M_2^{-1}AM_1^{-1} \quad \text{Combinação multiplicativa}$$

- Dois preconditionadores especiais foram introduzidos para serem combinados com os de decomposição de domínios
-

- Multiescala



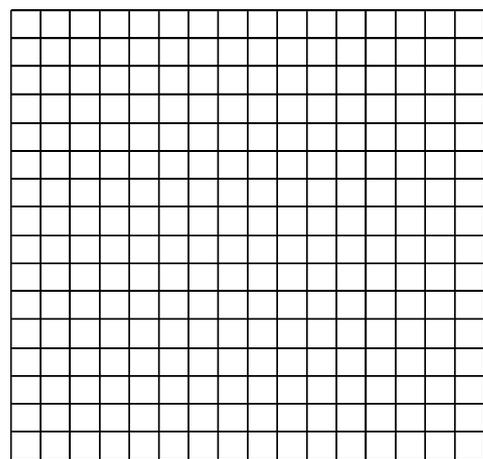
Malha Fina



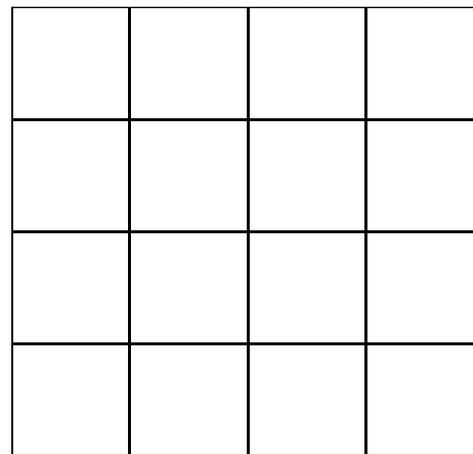
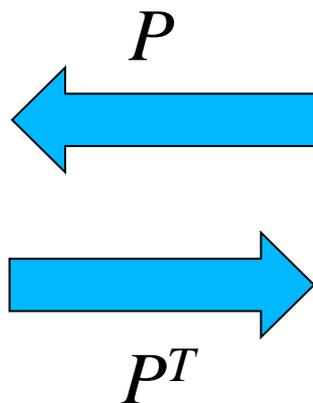
Malha Grossa

1. Transferência para malha grossa: $z = P^T u$.
2. Resolução do sistema grosseiro $(P^T A P)y = z$.
3. Transferência para malha fina: $x = P y$.

Multiescala



Malha Fina



Malha Grossa

1. Transferência para malha grossa: $z = P^T u$.
2. Resolução do sistema grosseiro $(P^T A P)y = z$.
3. Transferência para malha fina: $x = P y$.

SolverBR
executa essas
operações
eficientemente
em paralelo

- CPR
 - Extrai uma equação de pressão que é resolvida separadamente a cada iteração

x x x	x x x		x							x
x x x	x x x		x							x
x x x	x x x		x							x
x x x	x x x	x		x						x
x x x	x x x	x		x						x
	x x x	x			x x x					
x x x			x	x			x			
	x x x		x	x	x x x		x			
		x		x	x x x			x x x		
		x		x	x x x			x x x		
		x		x	x x x			x x x		
			x			x	x			
				x		x	x	x x x		
					x x x		x	x x x		x
					x x x		x	x x x		x
					x x x		x	x x x		x
x x x	x x x									x
								x x x		x

Matriz Original

- CPR
 - Um sistema de pressões é extraído e resolvido separadamente a cada iteração

(x)	x	x	(x)	x	x	(x)							(x)
x	x	x	x	x	x	x							x
x	x	x	x	x	x	x							x
(x)	x	x	(x)	x	x	x							(x)
x	x	x	x	x	x	x							x
		(x)	x	x		(x)	x	x					
(x)	x	x		(x)	(x)			(x)					
		(x)	x	x		(x)	(x)	(x)	x	x		(x)	
			(x)		(x)	(x)	x	x	x		(x)	x	x
					(x)	(x)	x	x	x				
					(x)	(x)	x	x	x				
						(x)	x	x	x				(x)
(x)	x	x	(x)	x	x								(x)
												(x)	(x)

Matriz Original

x	x		x									x	
x	x	x		x								x	
	x	x			x								
x				x	x		x						
	x			x	x	x		x					
		x		x	x					x			
				x			x	x					
						x		x	x				x
x	x											x	
												x	x

Matriz de Pressões

- CPR
 - Um sistema de pressões é extraído e resolvido separadamente a cada iteração

(x)	x x x	(x) x x	(x)						(x)
x x x	x x x	x x x	x						x
x x x	x x x	x x x							x
(x)	x x x	(x) x x	(x)						(x)
x x x	x x x	x x x	x						x
x x x	x x x	x x x	x						x
	(x) x x	(x)			(x) x x				
(x) x x			(x)	(x)			(x)		
	(x) x x		(x)	(x)	(x) x x		(x)		
		(x)		(x)	(x) x x		(x) x x		
		x		x	x x x		x x x		
		x		x	x x x		x x x		
		x		x	x x x		x x x		
			(x)			(x)	(x) x x		(x)
			(x)			(x)	(x) x x		
					(x) x x		(x) x x		(x)
					x x x		x x x		
(x) x x	(x) x x								(x)
								(x) x x	(x)

Matriz Original

x	x		x						x
x	x	x		x					x
	x	x			x				
x			x	x		x			
	x		x	x	x		x		
		x		x	x			x	
			x			x	x		
				x		x	x		x
x	x								x
								x	x

Matriz de Pressões

GMRES Flexível deve ser utilizado!

Descrição do SolverBR

- Versão GPU
 - Suporta uma ou múltiplas GPUs (um processo MPI por GPU)
 - API para movimentar dados entre a CPU e a GPU
 - Utilização de C++ facilitou a implementação
 - Uso de bibliotecas especializadas (CuSparse e VexCL) e código próprio (CUDA/OpenACC)
 - Disponível apenas para o GeomecBR
-

Acoplamento com Simuladores

- GeomecBR
 - API para atribuição de valores semelhante ao PETSc
 - Ranks MPI vazios para versão GPU
 - Simuladores de Escoamento
 - Implementado algoritmo de particionamento de malha
 - Estrutura de dados que reproduzem as utilizadas nos simuladores evitando cópias de dados
-

Resultados – GeomecBR

- Comparações SolverBR x PETSc e escalabilidade
- Desempenho multiescala
- Desempenho GPU

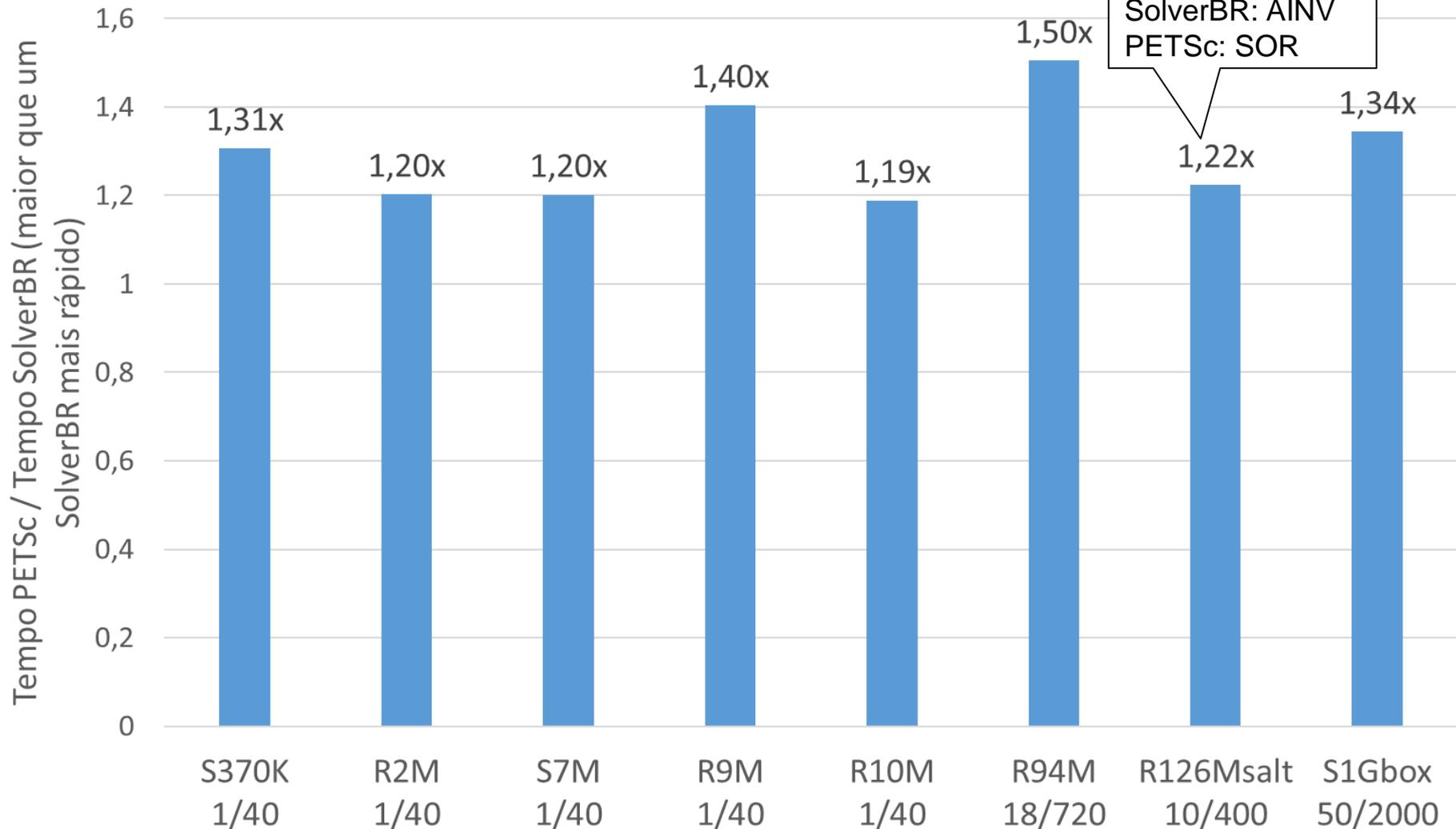
Processadores por nó	2x Intel Xeon 6148
Número de núcleos por nó	40
Memória RAM por nó	384 GB
Conexão entre nós	Infiniband 100 Gbps

Cluster Guaricema

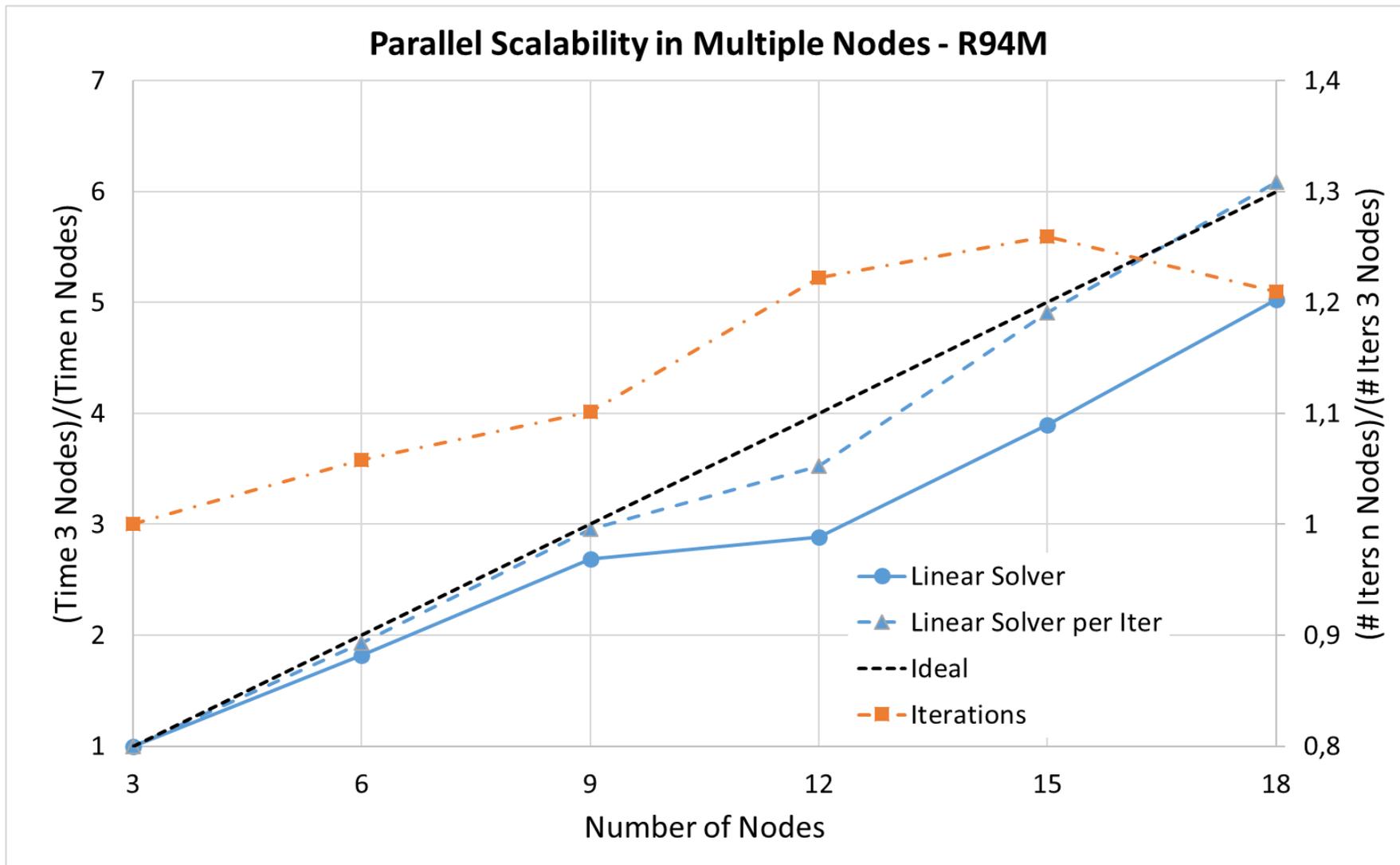
Processadores CPU por nó	2x Intel Xeon 6240
Número de núcleos CPU por nó	36
Memória RAM CPU por nó	384 GB
GPUs por nó	4x NVidia V100
Memória RAM GPU por nó	32 GB
Conexão entre nós	Infiniband 100 Gbps

Cluster Ogbon

PETSc x SolverBR - Tempo do Solver

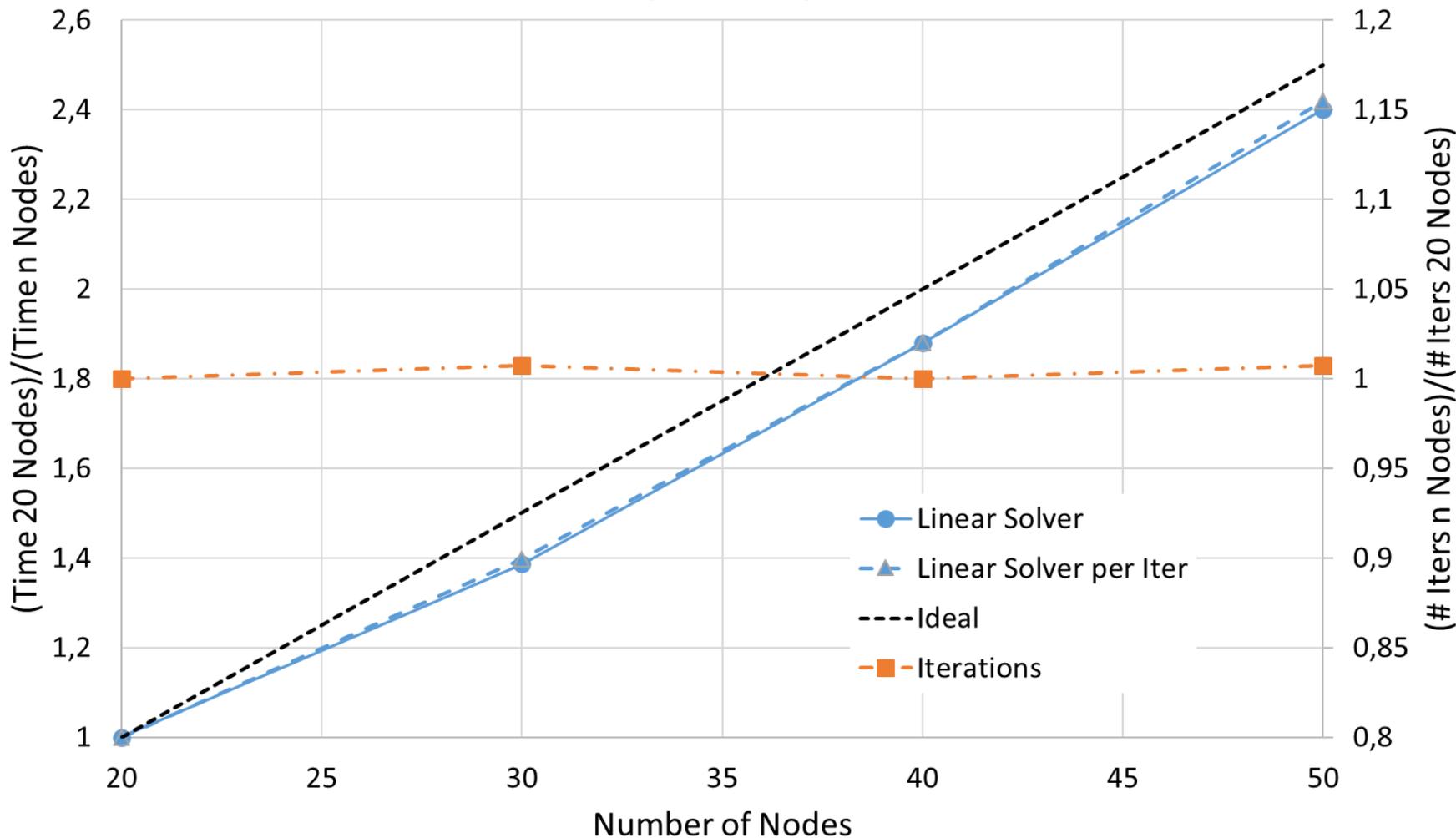


Resultados – GeomecBR

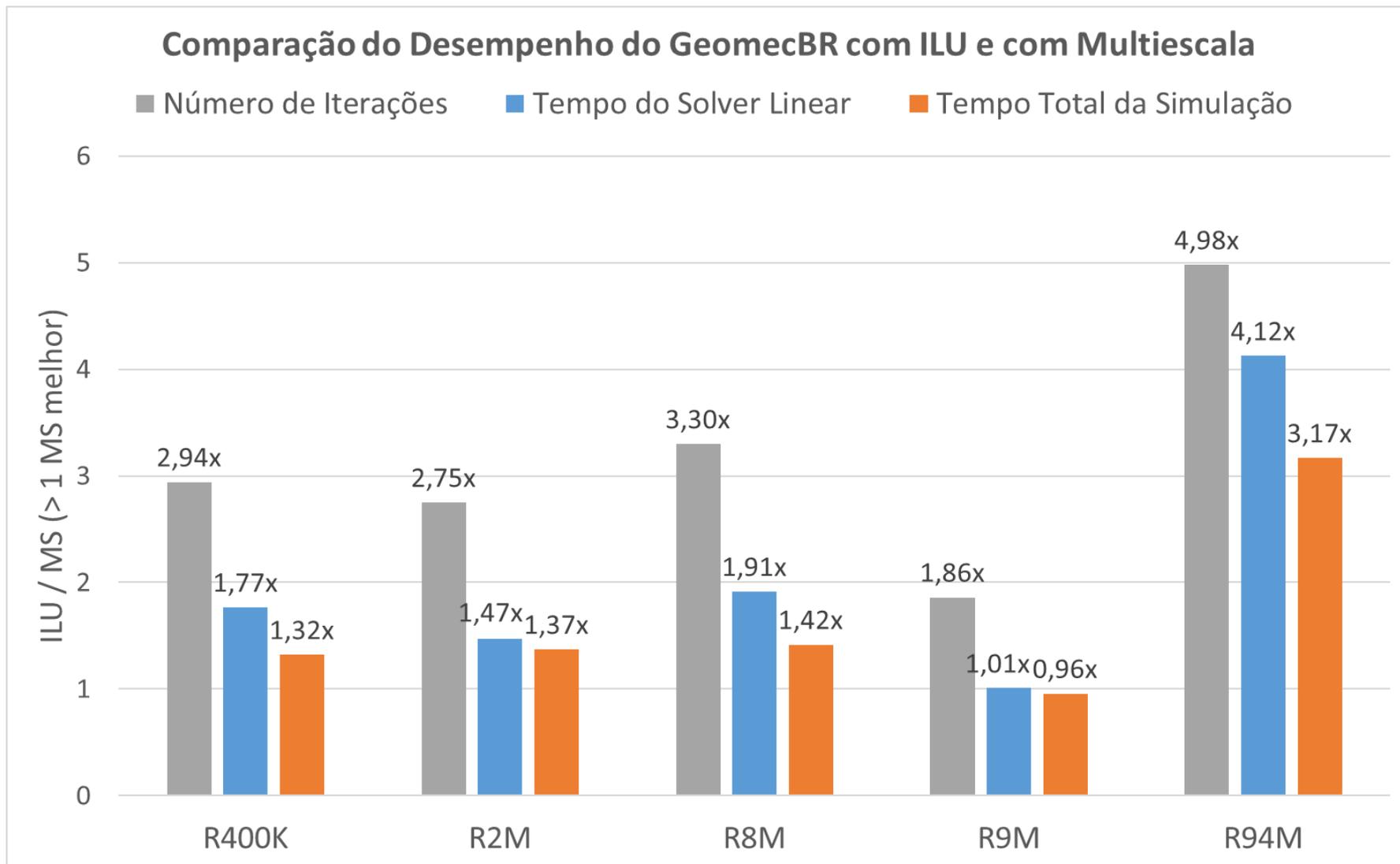


Resultados – GeomecBR

Parallel Scalability in Multiple Nodes - S1Gbox



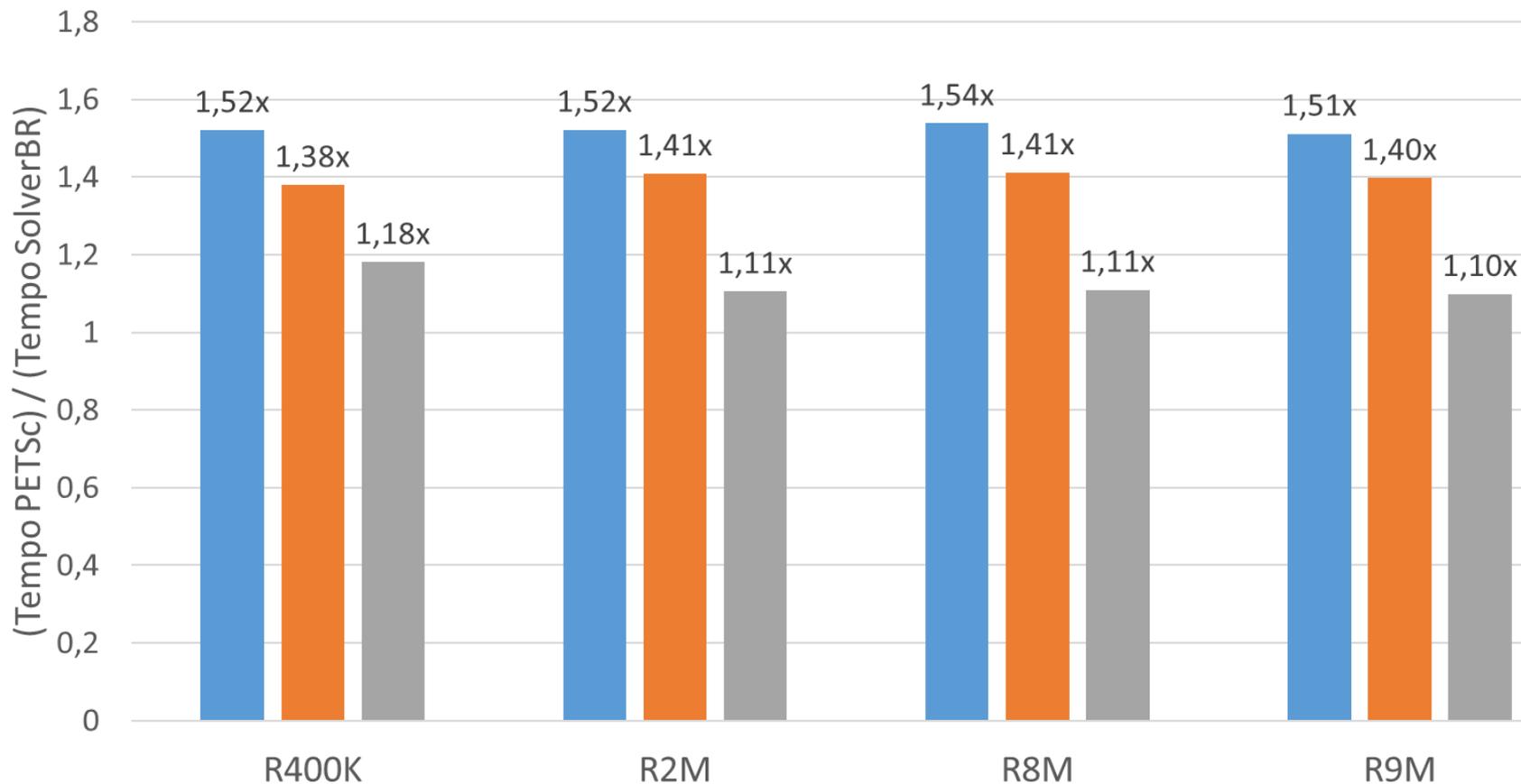
Resultados – GeomecBR MS



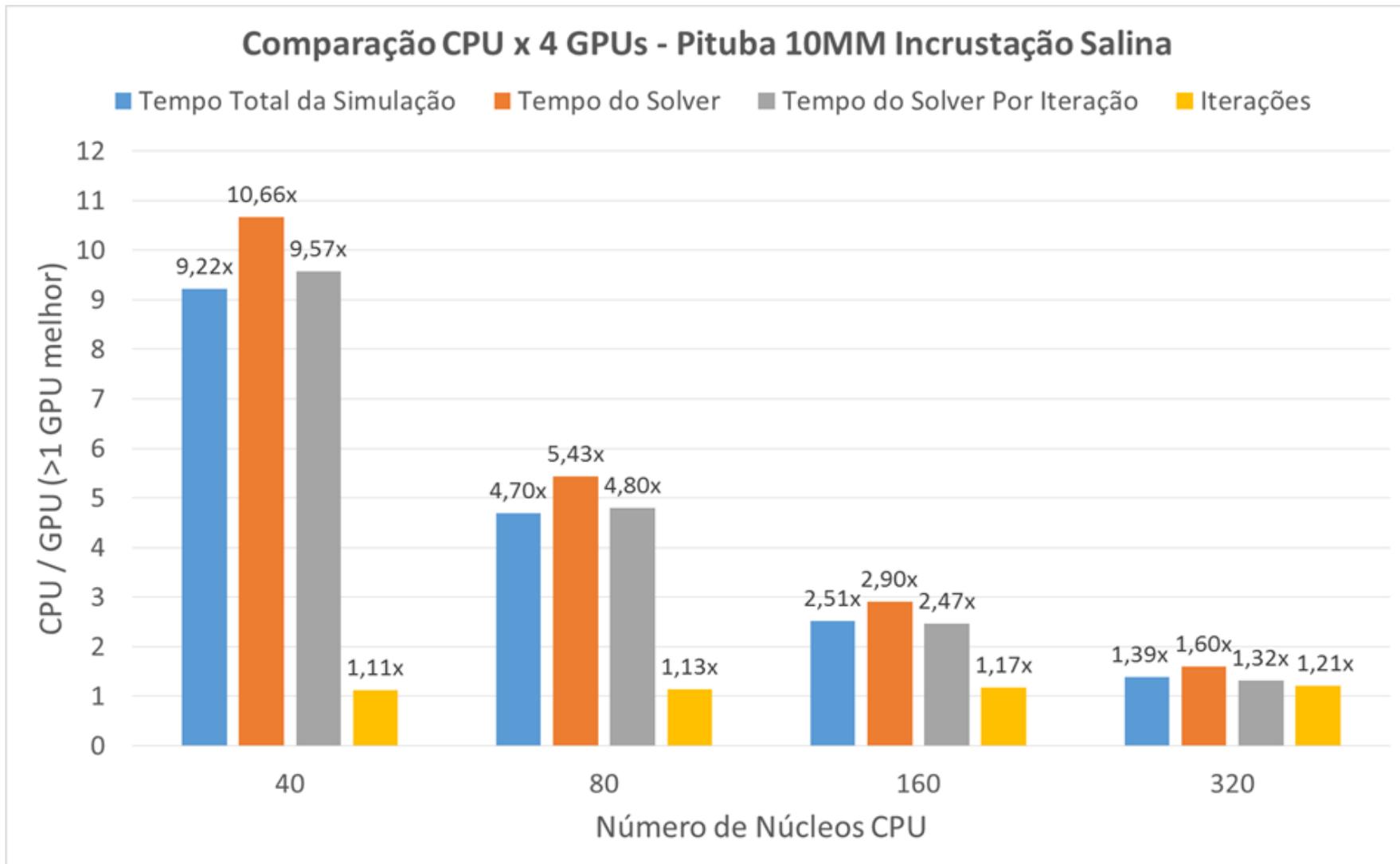
Resultados – GeomecBR MS

Comparação do Desempenho do PETSc com o SolverBR para Multiescala Tempo do Solver Linear

■ Matriz Blocada e Simétrica ■ Matriz Blocada e Não Simétrica ■ Matriz Escalar e Não Simétrica

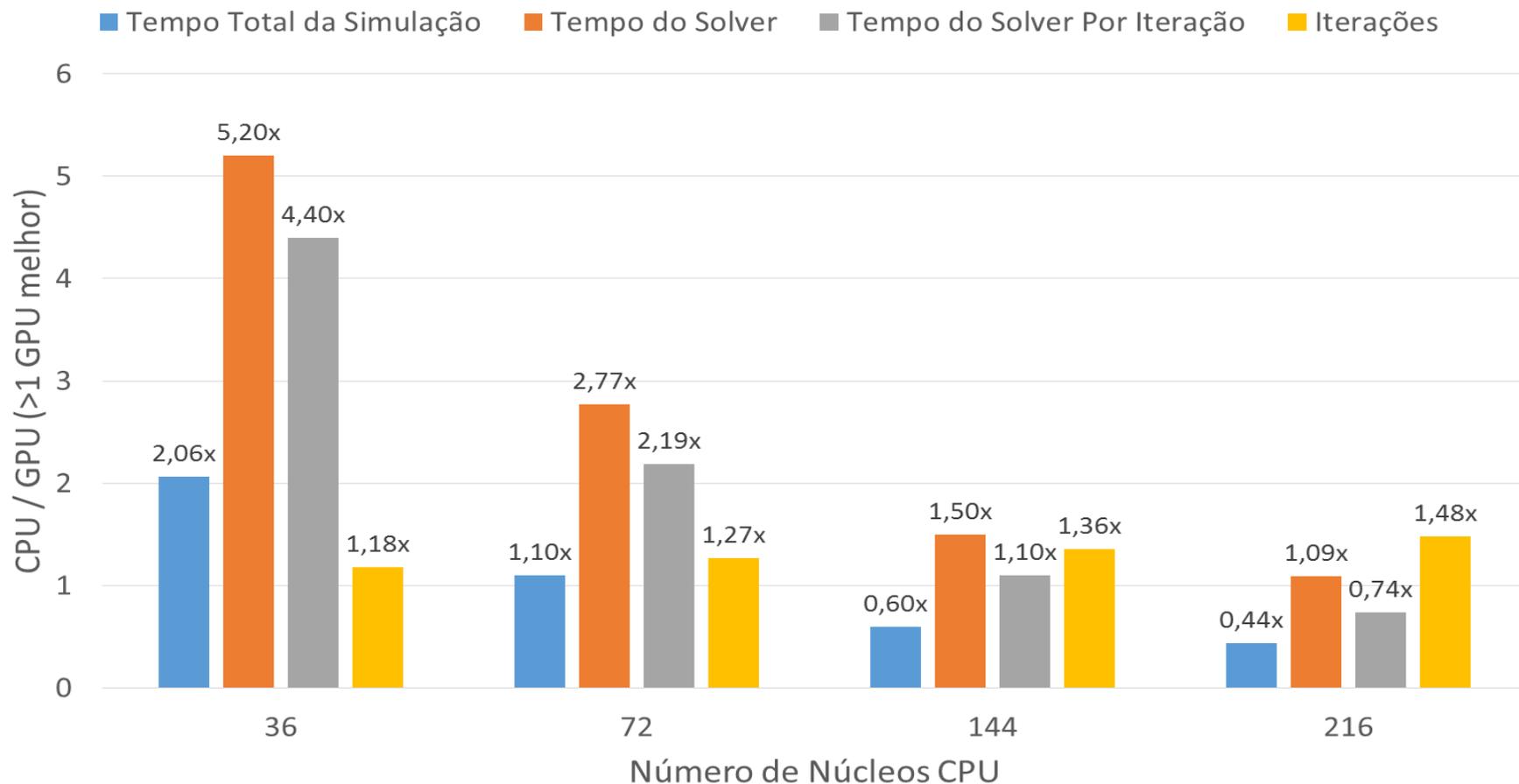


Resultados – GeomecBR GPU

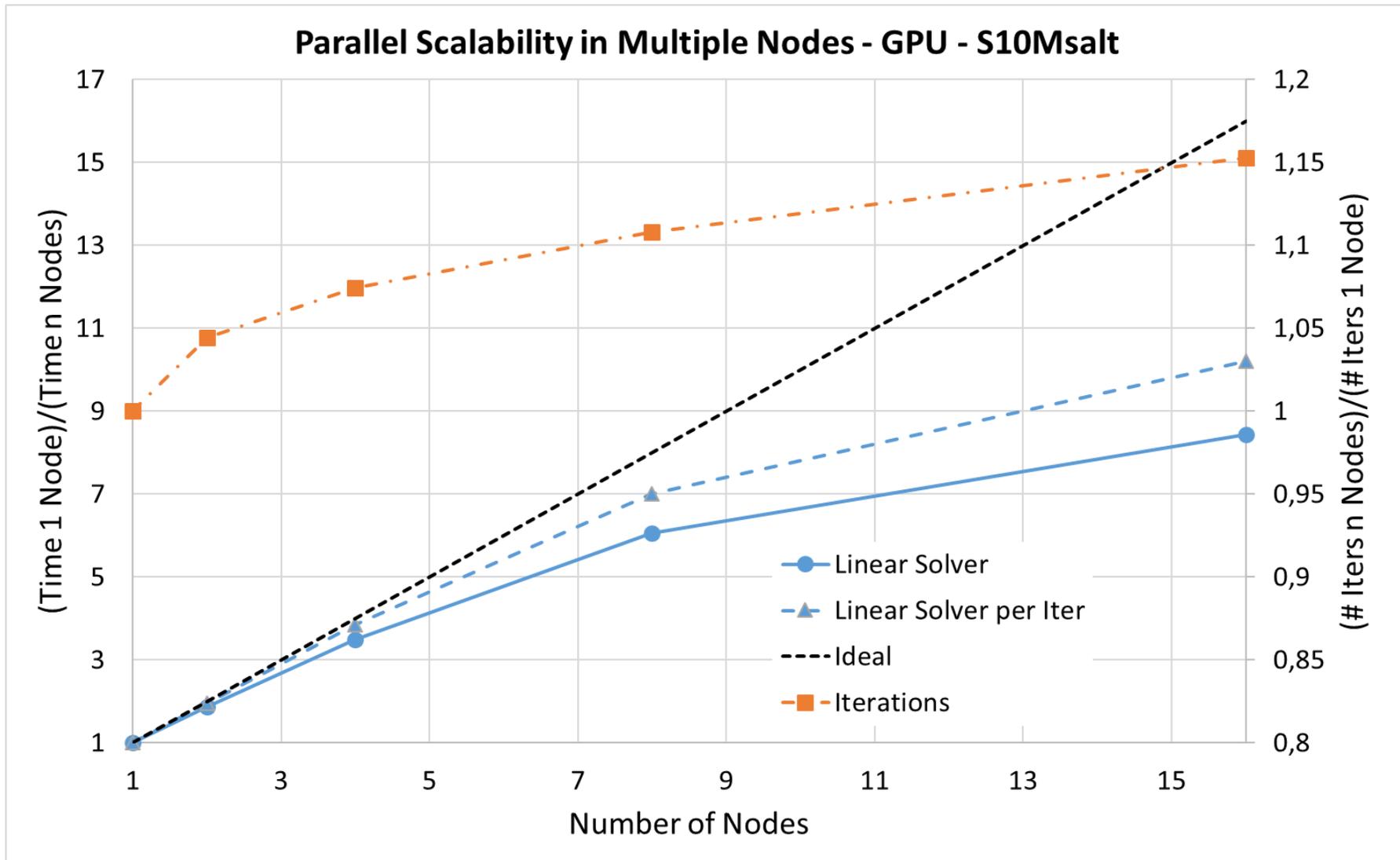


Resultados – GeomecBR GPU

Comparação CPU x 4 GPUs - Pituba 10MM



Resultados – GeomecBR GPU



Resultados – Simuladores de Fluxo

Simulator Fluid Model	name	# cells	# comp.	# wells	# well compl. (total)	simulation time (years)
Compositional	R300K	3.74e+5	8	99	8,733	31
	R500K	5.05e+5	9	2	131	37
	S6M	6.25e+6	9	89	3,675	20
	R3M	3.26e+6	8	15	1,450	7
Black-Oil	R128K	1.29e+5	3	36	554	19
	R425K	4.25e+5	3	177	1,478	27
	SPE10	1.09e+6	3	5	425	15
	R136K	1.36e+5	3	2	203	7

- Rodadas no cluster Guaricema com 1, 10, 20, 30 e 40 núcleos

Comparação do Desempenho SolverBR x Solver Original

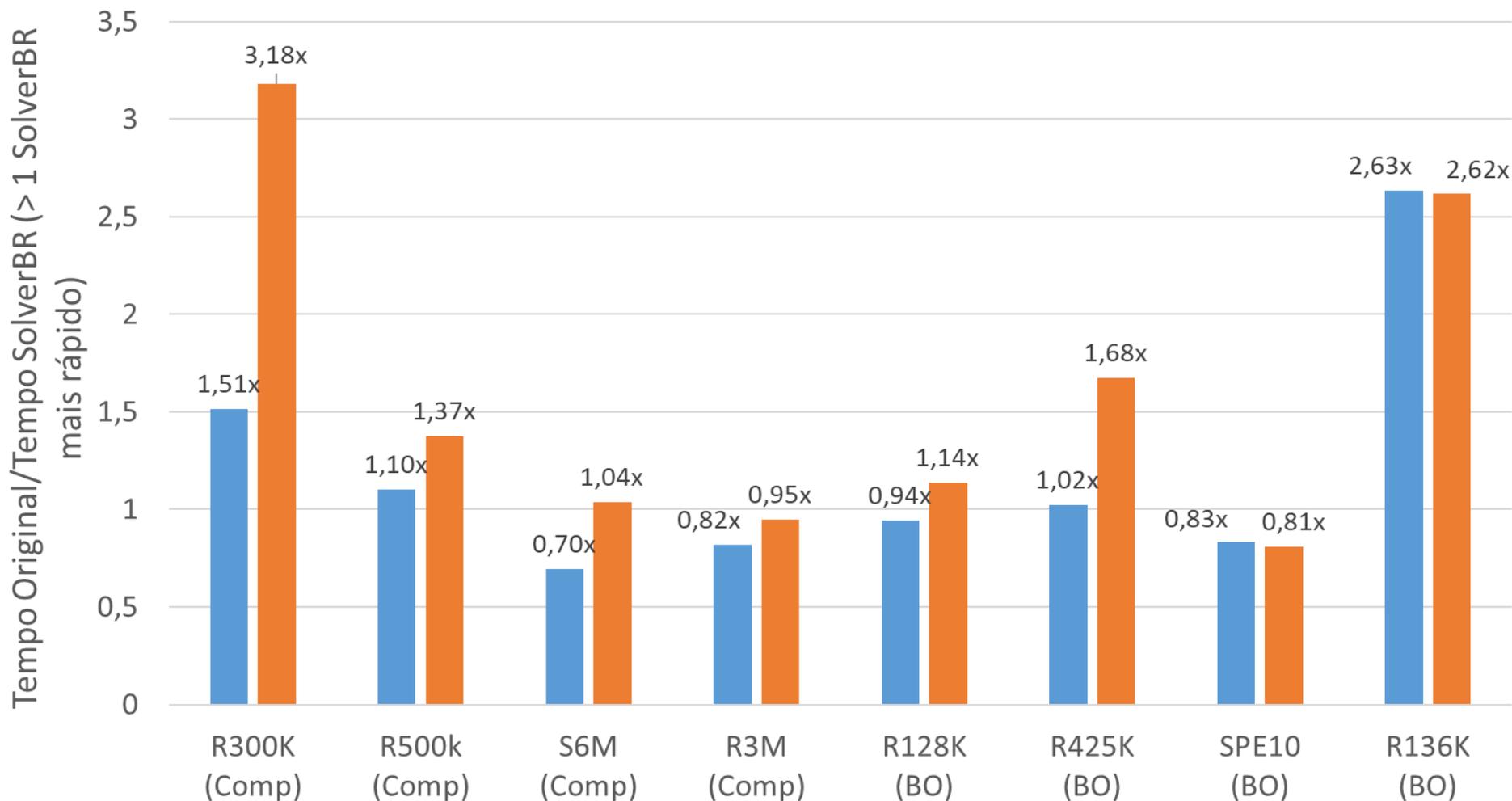
■ Tempo Total da Simulação ■ Tempo do Solver Linear

Tempo Original/Tempo SolverBR (>1 SolverBR mais rápido)



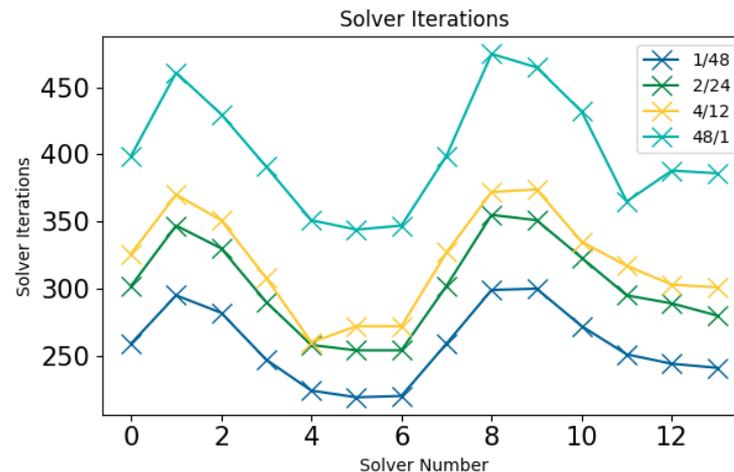
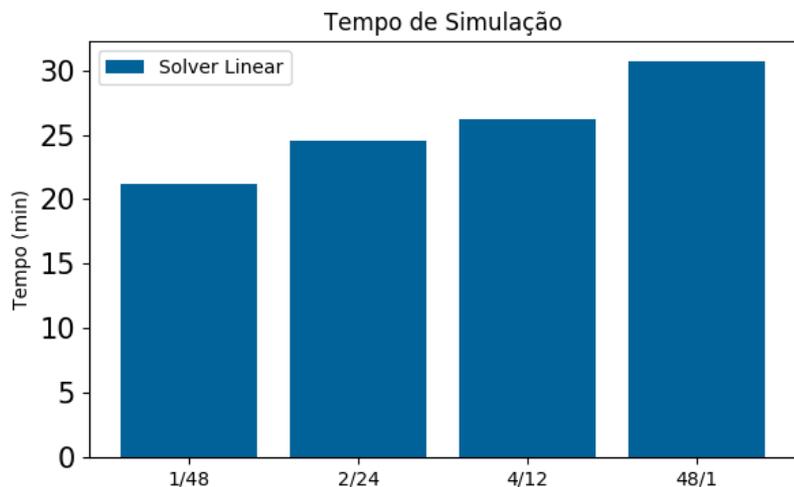
Comparação de Desempenho Melhor SolverBR x Melhor Solver Original

■ Tempo Total da Simulação ■ Tempo do Solver Linear



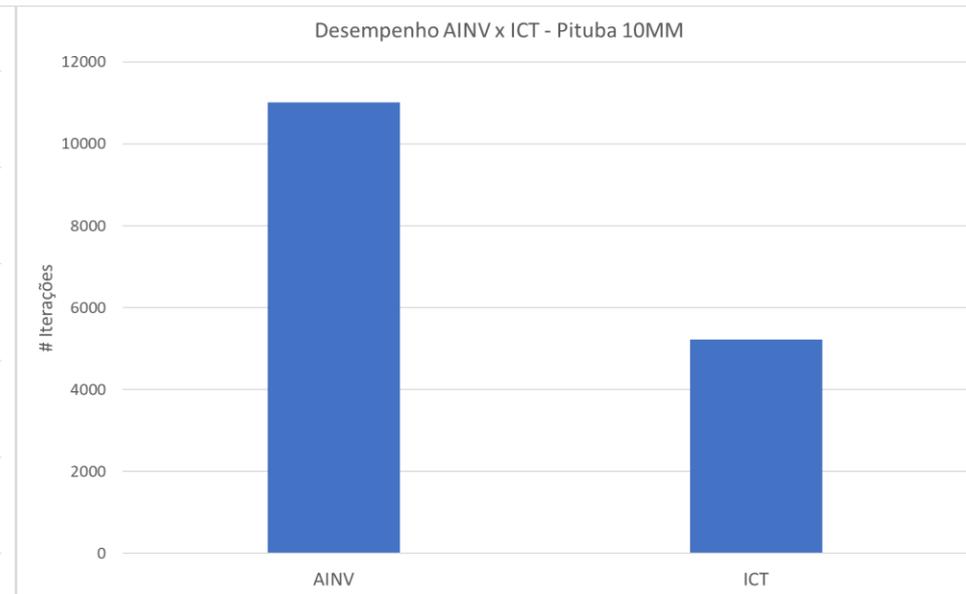
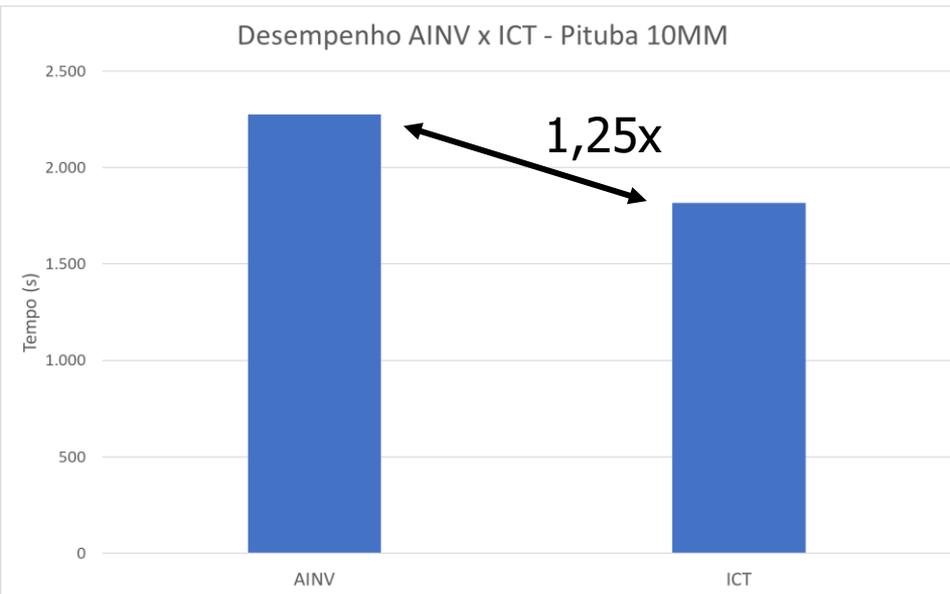
Próximos Passos

- ILU level-scheduling: abordagem de paralelismo de grão fino que evita os problemas de convergência da decomposição de domínios



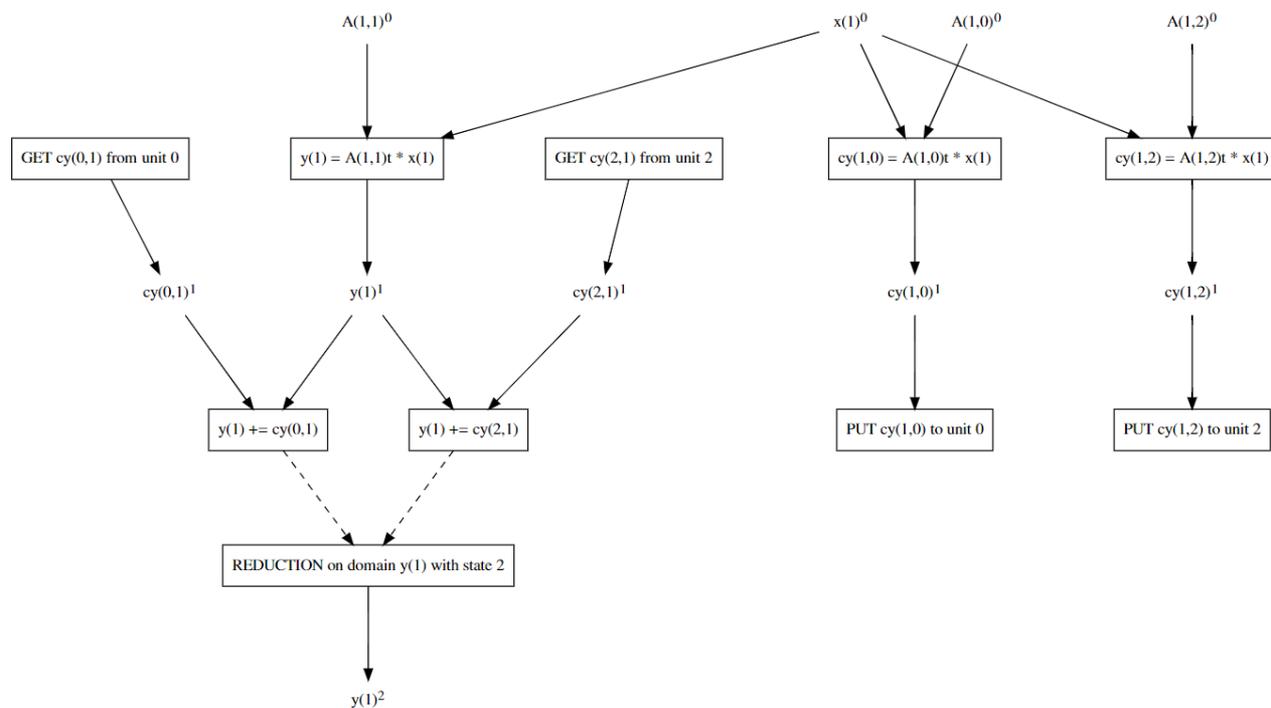
Próximos Passos

- ICT: versão mais robusta de ILU que consegue resolver problemas com modelo de sal



Próximos Passos

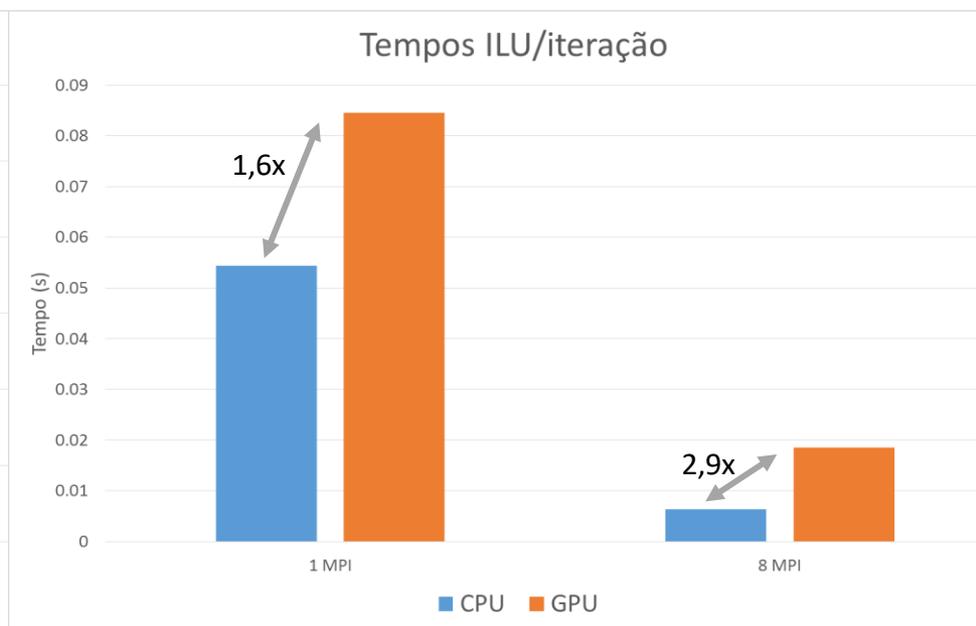
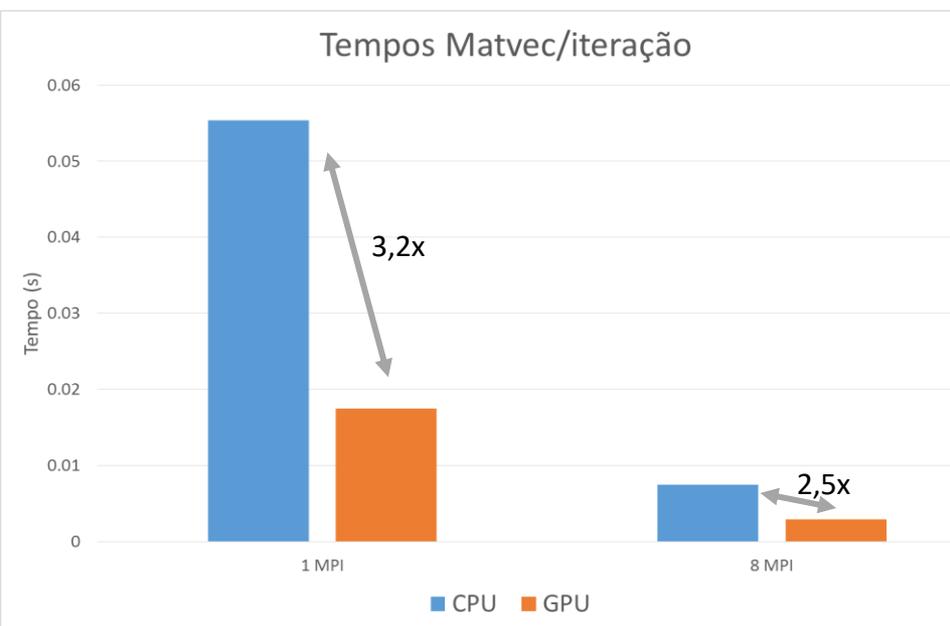
- Sistema de execução dinâmica de tarefas baseado em dataflow para facilitar a formulação e implementação de algoritmos paralelos
 - Paralelismo de grão grosso e processamento distribuído



Próximos Passos

Comparação CPU x GPU – Desempenho Matvec e ILU

Resultados apontam para a necessidade de desenvolver preconditionadores específicos para GPUs



Próximos Passos

- Algoritmos de decomposição de domínios mais avançados (p.ex. Additive Schwarz)
 - Formulações multiescala algébricas aplicáveis aos simuladores de escoamento
 - Continuar com otimizações de código específicas
-