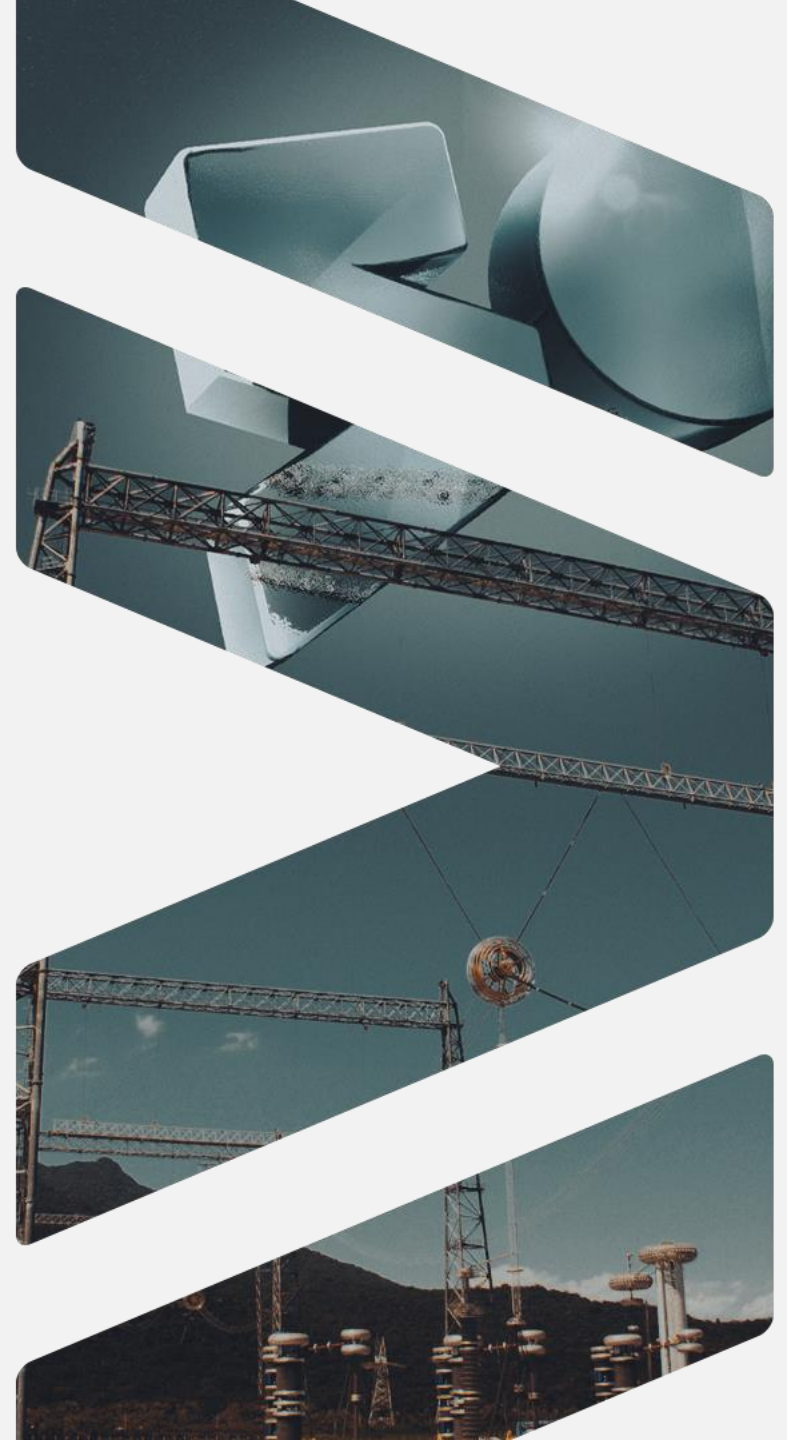




Aprimorando estratégias para potencializar a eficiência computacional dos modelos energéticos do CEPEL

Equipe NEWAVE

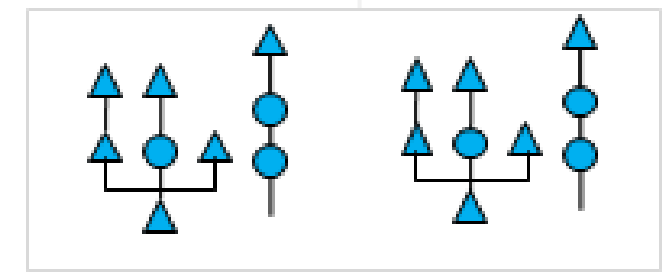
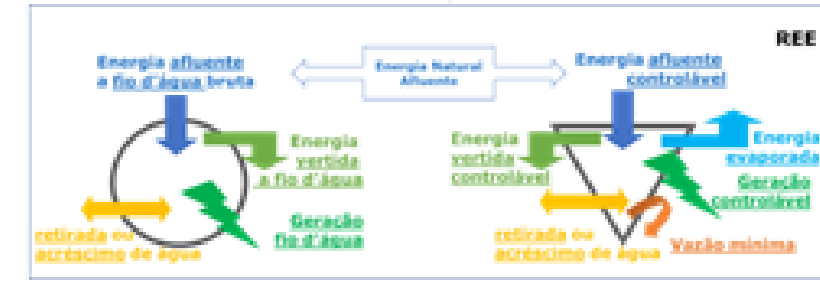
35º Workshop CPAMP, 02/05/2024



Evolução Metodológica no Tempo



A individualização: Oportunidades e desafios computacionais



Oportunidades



PLATAFORMA ÚNICA
DE DESENVOLVIMENTO EM C++
PROJETO LIBS

Novas restrições foram desenvolvidas no ambiente **compartilhado** e **comum** aos modelos energéticos, as **LIBS**.

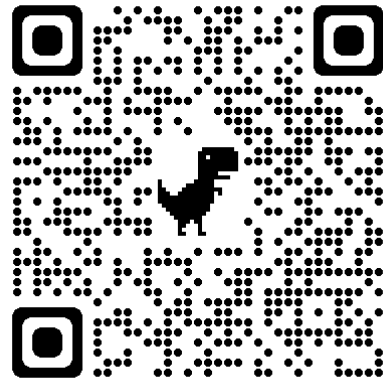
- Limites **mínimos** e **máximos** de **turbinamento** das usinas hidrelétricas.
- Limites **máximos** de **defluência** das usinas hidrelétricas.
- Restrições **elétricas** especiais.
- Restrições hidráulicas lineares por partes (LPP – **restrições da ANA**).
- Usinas **eólicas**.
- Aprimoramentos **FPHa**: de ajuste, representação da produtividade e **perdas variáveis** e **famílias** de **polinômios** de **jusante** por partes.



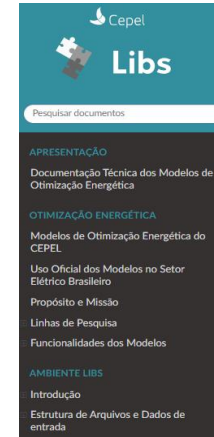
ACELERA O DESENVOLVIMENTO
CONSISTÊNCIA DAS FUNCIONALIDADES E DADOS
INTEGRAÇÃO DAS EQUIPES.



Acesso público aos manuais, relatórios e notas técnicas de todos os modelos energético



<https://www.cepel.br/produtos/documentacao-tecnica/>

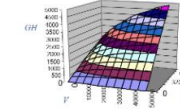


Função de Produção Hidrelétrica

A função de produção das usinas hidrelétricas consiste na conversão entre a vazão turbinada e a energia gerada, considerando a variação da produtividade da usina de forma **não linear** com a altura de queda e eventuais perdas que ocorrem nesse processo. Assim, uma questão fundamental nos modelos de otimização energética é a modelagem, em problema de otimização linear (PL) ou linear inteira-mista (MILP) dessas relações não lineares, como ilustrado a seguir.

GERAÇÃO HIDROELÉTRICA

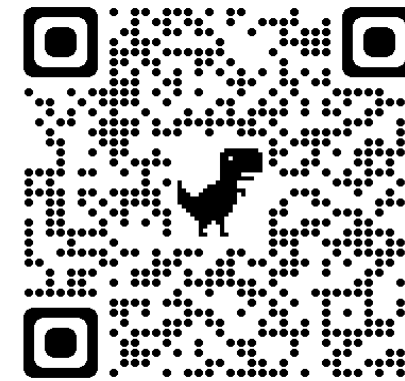
É uma **função não linear** da vazão turbinada e da altura de queda dos reservatórios



QUESTÃO:

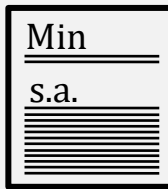
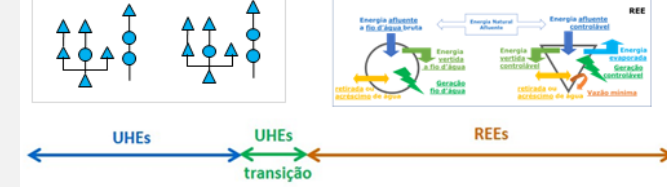
Como representar, em um **problema de Programação Linear** (ou linear inteira-mista), a função de produção das usinas hidroelétricas?

Documentação metodológica das funcionalidades dos modelos na Web



<https://see.cepel.br/manual/libs/>

Desafios computacionais



Dimensões do problema de otimização:

25,3 MILHÕES DE SUBPROBLEMAS

- ESTÁGIOS.....120
- ITERAÇÕES.....50
- ABERTURAS.....20
- CENÁRIOS FWD...200
- Estágios SF.....60
- Cenários SF.....2000

PMO/PLD

50,8 MILHÕES DE SUBPROBLEMAS

- ESTÁGIOS.....240
- ITERAÇÕES.....50
- ABERTURAS.....20
- CENÁRIOS FWD...200
- Estágios SF.....240
- Cenários SF.....2000

GARANTIA FÍSICA

52,4 MILHÕES DE SUBPROBLEMAS

- ESTÁGIOS.....248
- ITERAÇÕES.....50
- ABERTURAS.....20
- CENÁRIOS FWD...200
- Estágios SF.....188
- Cenários SF.....2000

PDE

SUBPROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR
PMO/PLD REE

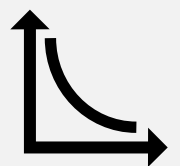
VARIÁVEIS.....650
RESTRICÇÕES.....200 + ~10K CORTES DE BENDERS [50ª ITER]



SUBPROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR
PMO/PLD INDIVIDUALIZADO

VARIÁVEIS3,8K
RESTRICÇÕES....4,5K + ~10K CORTES DE BENDERS [50ª ITER]

Desafios computacionais



Variáveis de estado para definição da política operativa:

REE

COEFICIENTES DOS CORTES DE BENDERS
PMO/PLD **REE**

ENERGIA ARMAZENADA....12
 ENERGIA AFLUENTE.....144
 ANTECIPAÇÃO TÉRMICA....24
 VMinOpMax.....12

$$\mathbb{R}^{192} = \mathbb{R}^{144+48}$$



INDIVIDUALIZADO

COEFICIENTES DOS CORTES DE BENDERS
PMO/PLD **INDIVIDUALIZADO**

VOLUME ARMAZENADO...160
 VAZÃO AFLUENTE.....1920
 ANTECIPAÇÃO TÉRMICA....24
 VMinOpMax.....12

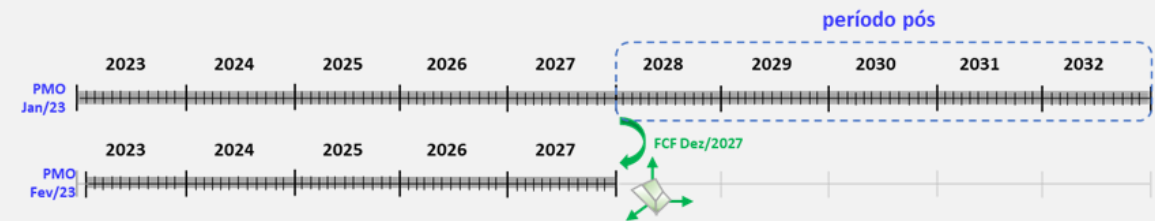
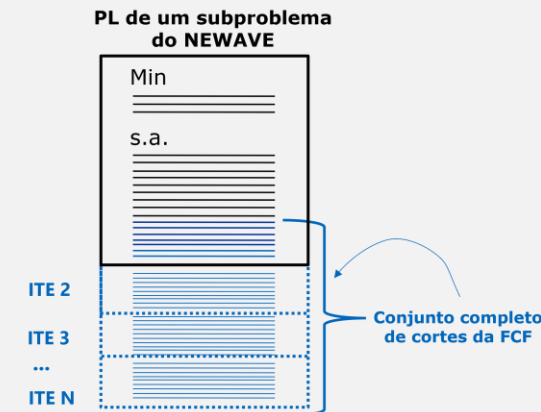
$$\mathbb{R}^{2116} = \mathbb{R}^{1920+196}$$

Aprimoramentos nas estratégias computacionais



REDUÇÃO NO TEMPO DE PROCESSAMENTO

- **Seleção de cortes** na etapa forward da PDDE
- Aprimoramentos de **recuperação de base**
- Aprimoramento em processos de **montagem do PL**
- **Armazenamento** dos cortes por **período**
- **Armazenamento local** dos cortes **por nó**, além da opção tradicional por processo
- **Nova** estratégia de **paralelização** do processo de **geração de cenários** Afluência x Ventos
- Condição de contorno final do horizonte de planejamento: **Função de Custo Futuro Externa (PÓS)**

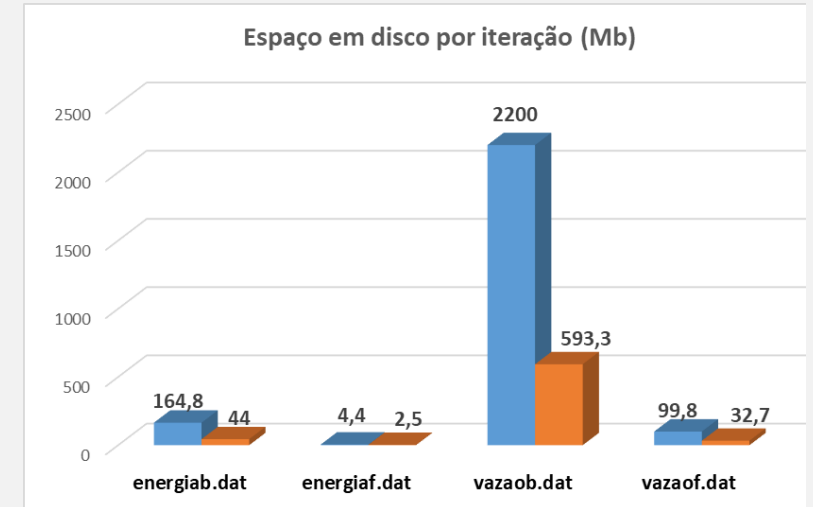


Aprimoramentos nas estratégias computacionais



REDUÇÃO NO ARMAZENAMENTO EM DISCO

- Tamanho dos arquivos de cenários da *forward e backward*
- Possibilidade de não imprimir o arquivo com estados dos cortes (cortese.dat)
- **Armazenamento dos cortes por período**



Em 45 iterações:
Redução de 111 GB para 30 GB (PMO)



REDUÇÃO CONSUMO DE MEMÓRIA RAM

- Redução de ~ 245MB/processo
 - 48GB em execuções com 200 processos



cortes.dat
~3,5GB

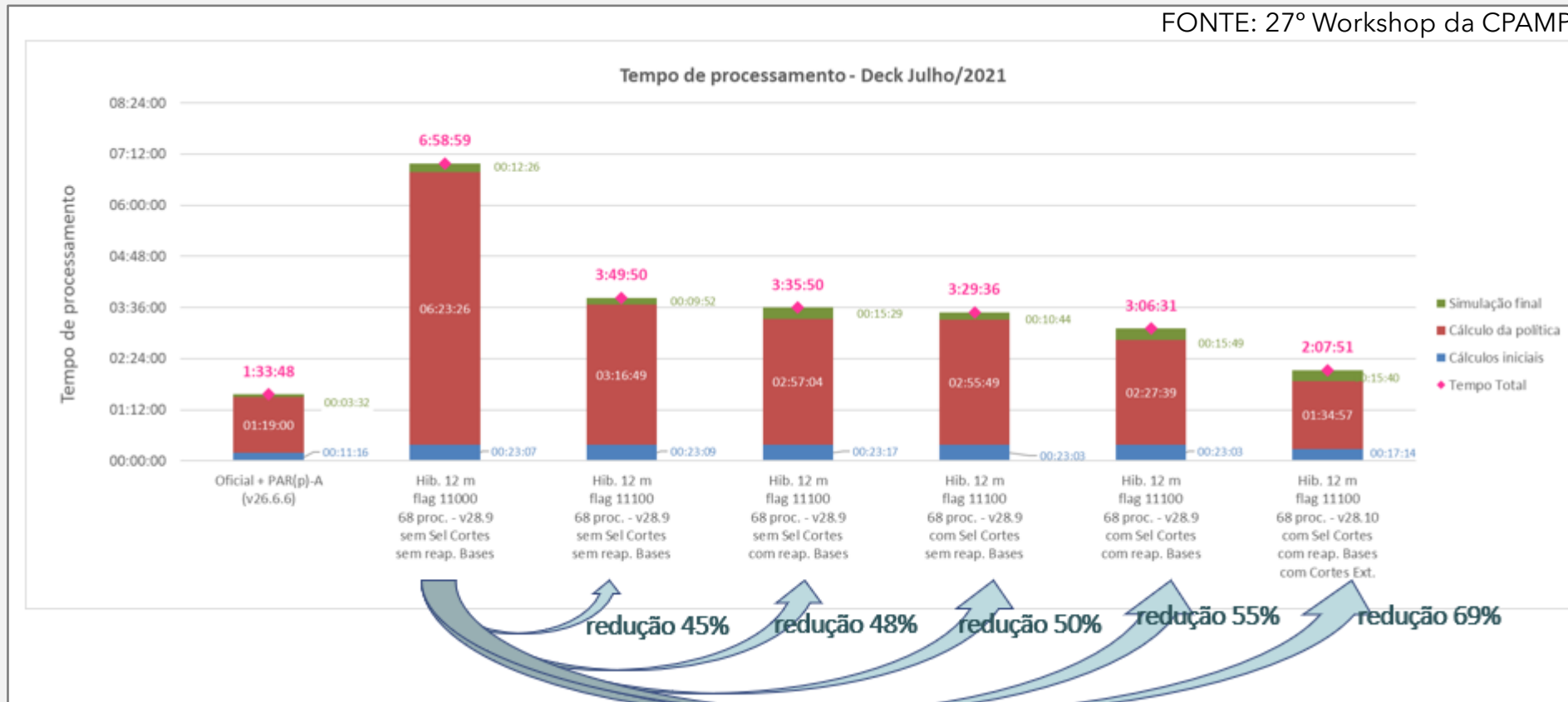


cortes-002.dat
~165MB



Redução no tempo de processamento

FONTE: 27º Workshop da CPAMP



- 70%

Comparação de tempo com rodadas REE em versões da família 29 já tem as efficientizações implementadas.

Análise feita pela CCEE

Aprimoramentos nas estratégias computacionais



Estratégias investigadas e em investigação

As estratégias visam reduzir o tempo computacional **preservando a acurácia da solução**

MELHORIA	EXPECTATIVA DE EFICIENTIZAÇÃO
Seleção de cortes de Benders na etapa forward	Tamanho dos subproblemas resolvidos pela etapa forward
FPHA validada no modelo DECOMP em módulo LIBs desenvolvido em C++	Eficientização do processo de cálculo com inclusão de bibliotecas especializadas
Arquivo de cortes por período	Leitura e escrita
Opção de retirada de impressão dos estados que geraram os cortes	Só é utilizada em tempos de validação do modelo.
Forward assíncrona	Redução dos atuais 120 pontos de sincronismo (horizonte de PMO) para um único ponto no final do horizonte.
Salvar a solução dos PLs da forward para serem utilizados como base na backward	Solução dos subproblemas da backward por proximidade de solução com a respectiva série forward.
Reordenação crescente das ENAs do SIN para solução das aberturas	Solução dos subproblemas por proximidade de solução.
Salvar o RHS por série forward contendo os cálculos das afluições passadas para ser utilizado na respectiva série da backward	Cálculo do RHS dos cortes de Benders
Melhorias no processo atual de seleção de cortes de Benders	Solução dos subproblemas



■ Testada
■ Implementada e em teste
■ Em implementação
■ Em ajuste após primeiros testes
■ A ser implementado
■ Em discussão

- Período POS representado por Cortes Externos.
- Redução de consumo de:
 - espaço em disco.
 - memória RAM.
- Nova estratégia de paralelismo na geração de cenários.

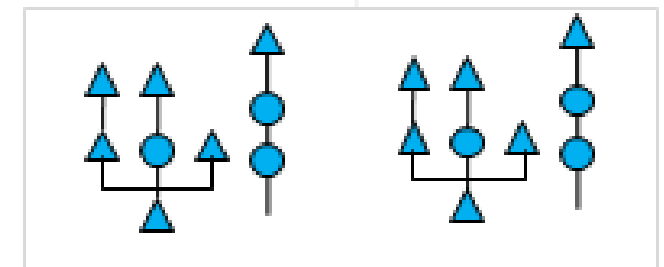
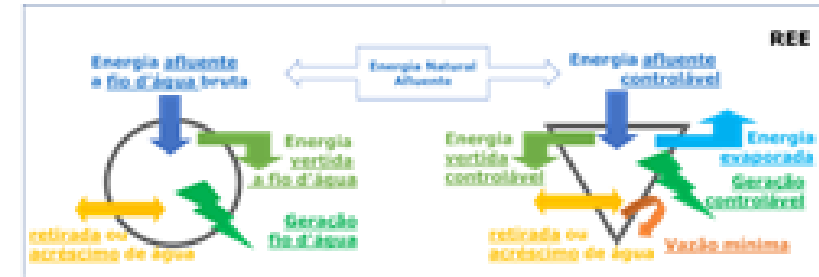
Aprimoramentos nas estratégias computacionais



- CPU x GPU (Ideia de tese e testes em 2015).
- Avaliar o uso de métodos de pontos interiores.
 - Aumento das dimensões do subproblema.
 - Solver CPLEX.
- Assincronismo na backward:
 - Iteração mais rápida.
 - Requisito de reprodutibilidade reduz o desempenho.
 - Maior requisito de memória e disco dado o aumento da quantidade de cortes (mais iterações).
 - + Ambiente massivamente paralelo
 - + Eliminação de cortes

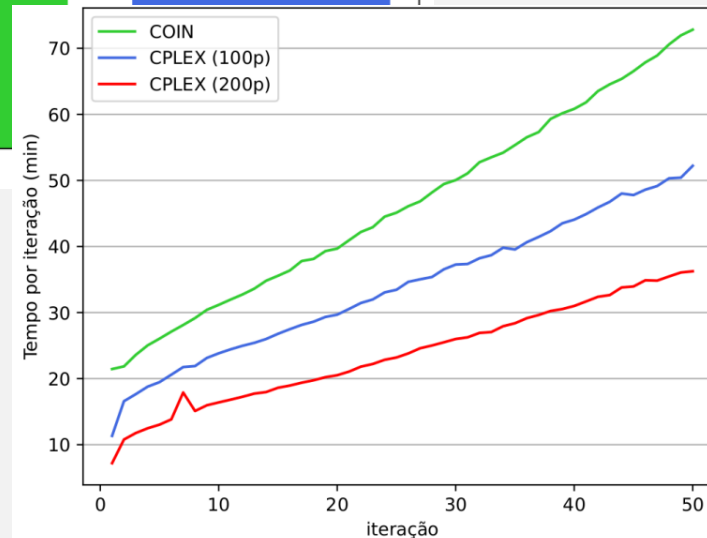
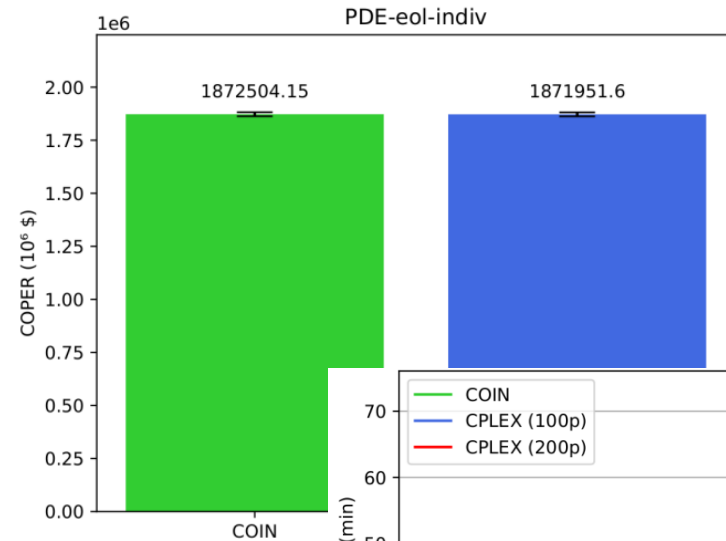
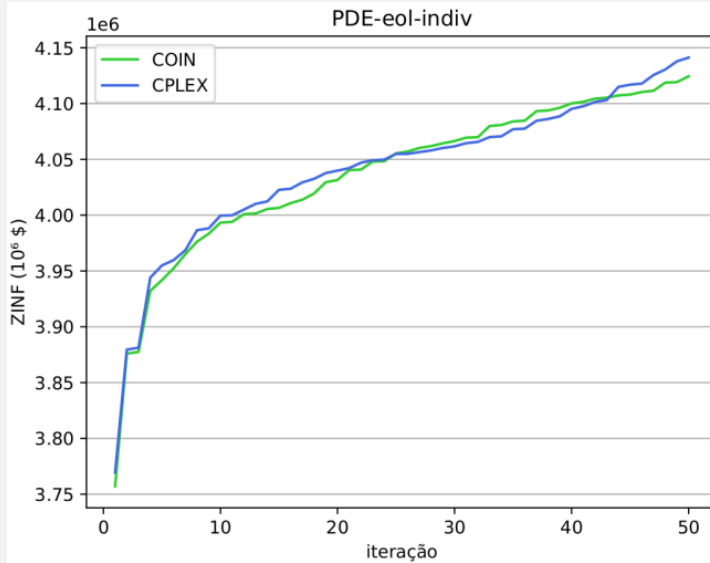
Avanços computacionais

Próximos passos



Nova biblioteca de solvers

- Operacionalização da biblioteca **IBM CPLEX 12.9** [15/03/2024].



**PDE 2031
INDIVIDUALIZADO**



Solver	Tempo total	Tempo relativo ao COIN
COIN (100p)	46h 12min	-
CPLEX (100p)	31h 59min	69,2%
CPLEX (200p)	24h 07min	52,2%

~24 horas



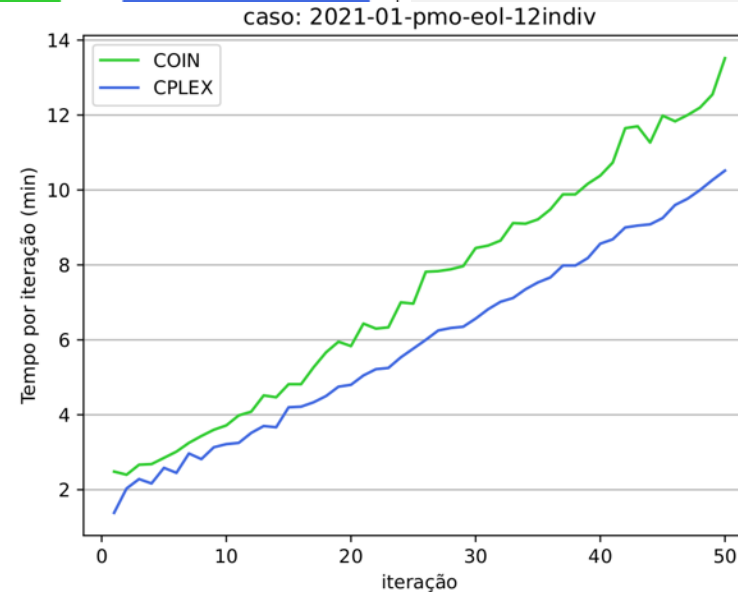
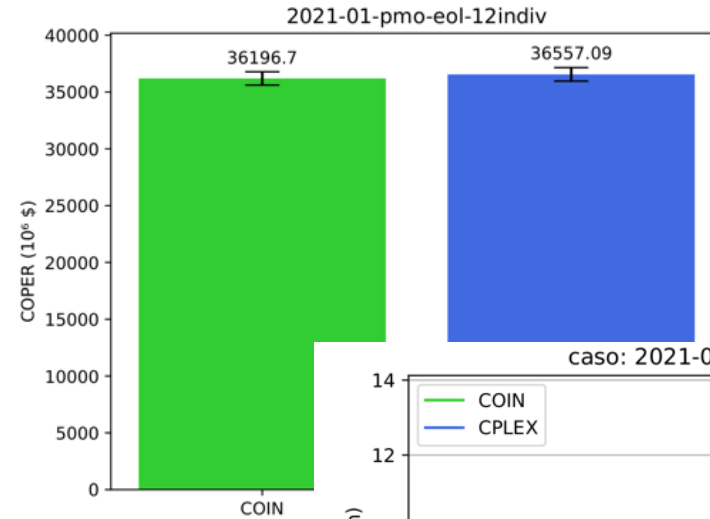
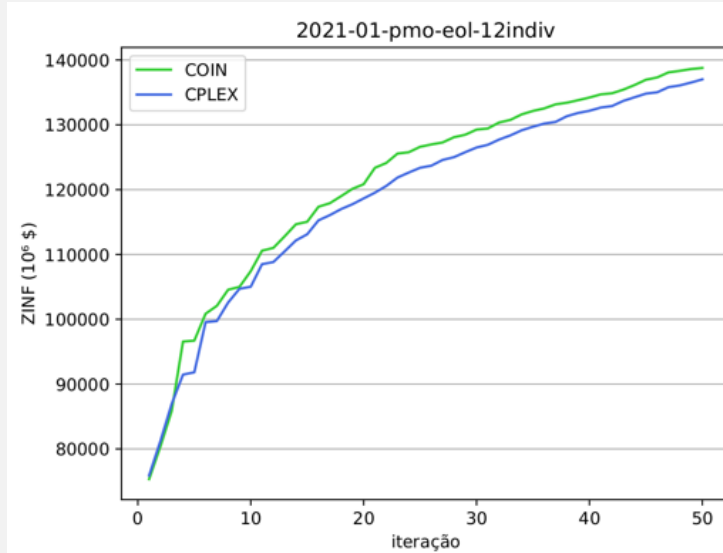
Eletrobras
Cepel

Nova biblioteca de solvers

- Operacionalização da biblioteca **IBM CPLEX 12.9** [15/03/2024].

PMO 01/2021
12 INDIV.


 - 18%



Solver	Tempo total	Tempo relativo ao COIN
COIN	7h 49min	-
CPLEX	6h 25min	82,1%



Nova biblioteca de solvers

- Operacionalização da biblioteca **IBM CPLEX** 12.9 [15/03/2024].
- Biblioteca **compartilhada** entre os **modelos** energéticos está sendo implementada no ambiente **LIBs**.
- Viabilidade de acesso aos outros pacotes como XPRESS e Gurobi.



Os cortes de Benders: estratégias de seleção e eliminação

1 Eliminação de cortes de Benders “paralelos”.

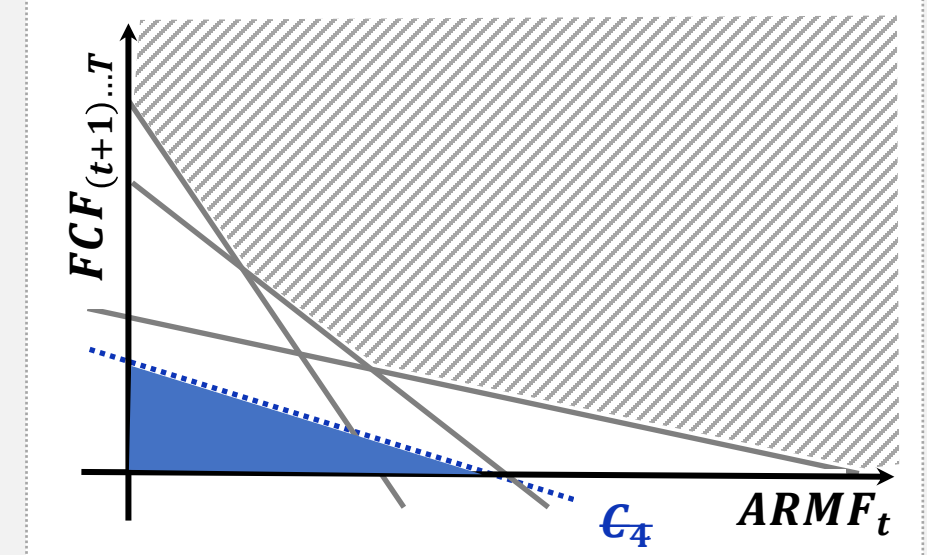
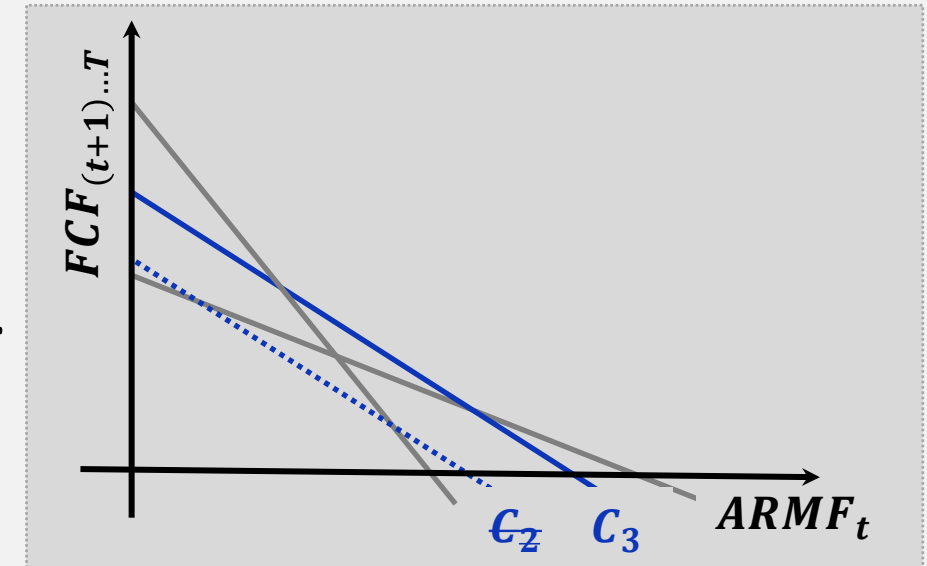
2 Seleção de cortes nas etapas backward e forward da PDDE.

[Diniz,2009], [de Matos, Philpott, Finardi,2012],

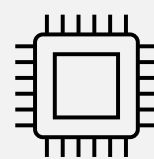
[Brandi, Ramps et al, 2015] [Diniz, Maceira, et al, 2017]

3 Eliminação de cortes de Benders dominados

[Tekaya, Shapiro et al,2012], [Silva, 2024]



Próximos passos

- Atualização do ambiente computacional de desenvolvimento:
 - **Sistema Operacional:** Distribuição Linux Ubuntu 24.04 LTS.
 - **Bibliotecas:** COIN, CPLEX, Compiladores e MPI.
- **Armazenamento** de cortes de Benders em **memória**. (EM ANDAMENTO)
 - Por um único processo.
 - Por um processo em cada nó. (troca de mensagens intra nó)
- Uso de memória **compartilhada**. 
- **Partida quente** para casos interrompidos ou para extensão do número de iterações.
 - Permite o uso de serviços **spot em nuvem** (EM ANDAMENTO)



\$ REDUÇÃO DE CUSTOS EM NUVEM

Referências

- [Tekaya, Shapiro et al,2012]** W. Tekaya, A. Shapiro, M. P. Soares, J. P. Costa, “Worst-case-expectation approach to optimization under uncertainty”, Operations Research, v.61, n.6, pp. 1435-1449, 2012
-
- [Diniz,2009]** A.L, Diniz, “Processo iterativo de construção da função de produção das usinas hidroelétricas para o problema de coordenação hidrotérmica”, XX SNPTEE, 2009
-
- [de Matos, Philpott, Finardi, 2012]** V.L. de Matos, A.B. Philpott, E.C. Finardi, “Improving the Performance of Stochastic Dual Dynamic Programming”, Optimization Online, Jul 2012.
-
- [Brandi, Ramps et al, 2015]** R.B.S. Brandi, T.P. Ramos, B.H. Dias, A.L.M. Marcato, I.C. Silva Junior, “Improving stochastic dynamic programming on hydrothermal systems through an iterative process”, Electric Power Systems Research, v.123. pp. 147-153, Jun. 2015
-
- [Pinto, Borges, Maceira, 2013]** R. J. Pinto, C. L. T. Borges, M. E. P. Maceira, "An Efficient Parallel Algorithm for Large Scale Hydrothermal System Operation Planning", IEEE Transactions on Power Systems, v.29, n.4, pp. 4888-4896, Nov. 2013.
-
- [Diniz, Maceira, et al, 2017]** A. L. Diniz, M. E. Maceira, R. J. Pinto, C. L. Vasconcellos, D. D. J. Penna e C. B. Cruz, “Estratégia de seleção de cortes de Benders para redução do tempo computacional da programação dinâmica dual estocástica,” Relatório Técnico CEPEL nº 11138, 2017.
-
- [Silva, 2024]** A. P. Silva, ““Análise Topológica dos Cortes da Função de Custo Futuro Baseada em Geometria Analítica: Aplicação ao Problema de Despacho Hidrotérmico” Dissertação de Mestrado, UFJF, 2024.






INOVAÇÃO QUE ULTRAPASSA HORIZONTES



Obrigada!

newave@cepel.br

-  [/company/eletrobrascepel](#)
-  [/cepeloficial](#)
-  [/cepeloficial](#)