

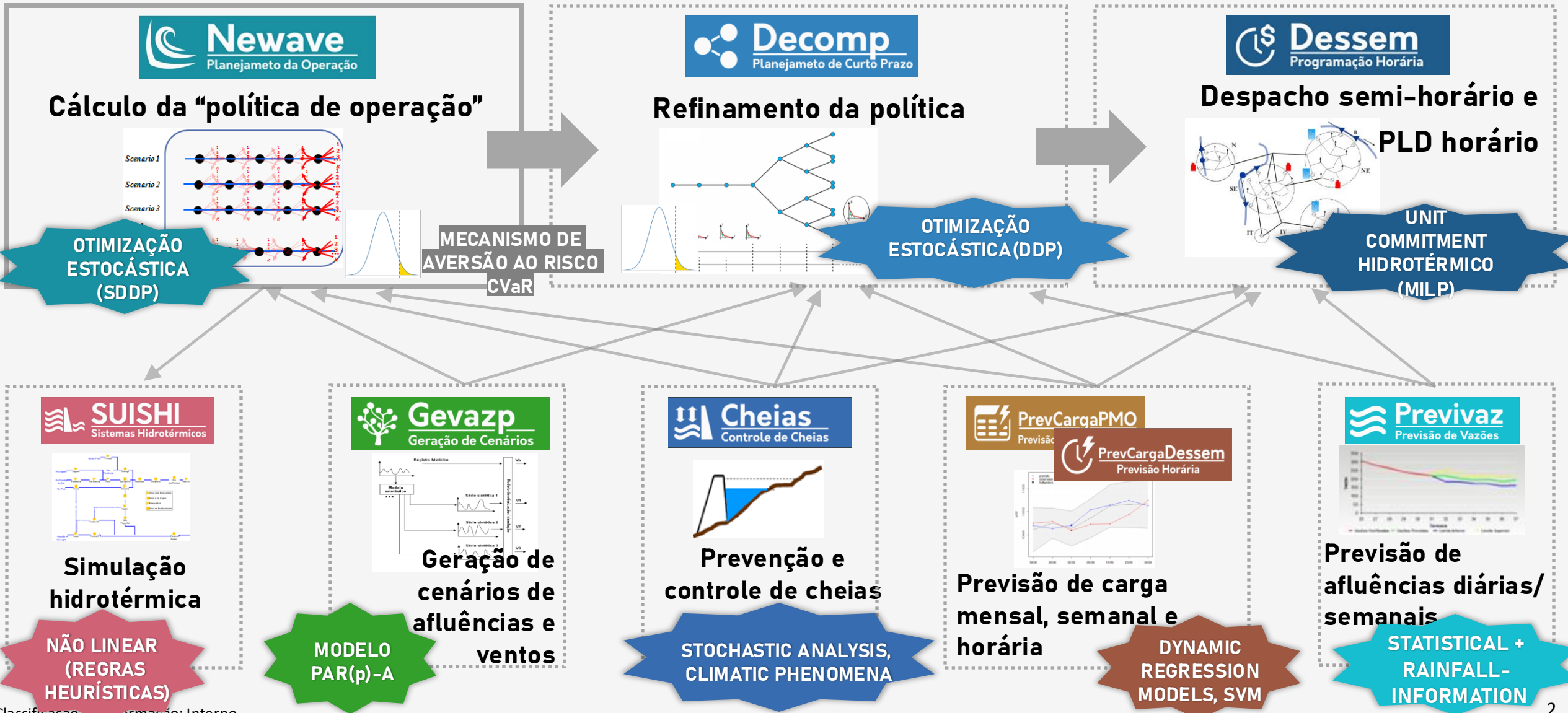
Avanços metodológicos nos modelos energéticos utilizados para operação e formação de preço

Cristiane Cruz – CEPEL
10/04/2025



**Norus
Summit** 2025

Cadeia de modelos energéticos



O que vamos ver

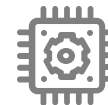
Individualização da configuração hidrelétrica em 2025



Histórico de como
chegamos até
aqui



Características
novas de
nosso **novo**
modelo

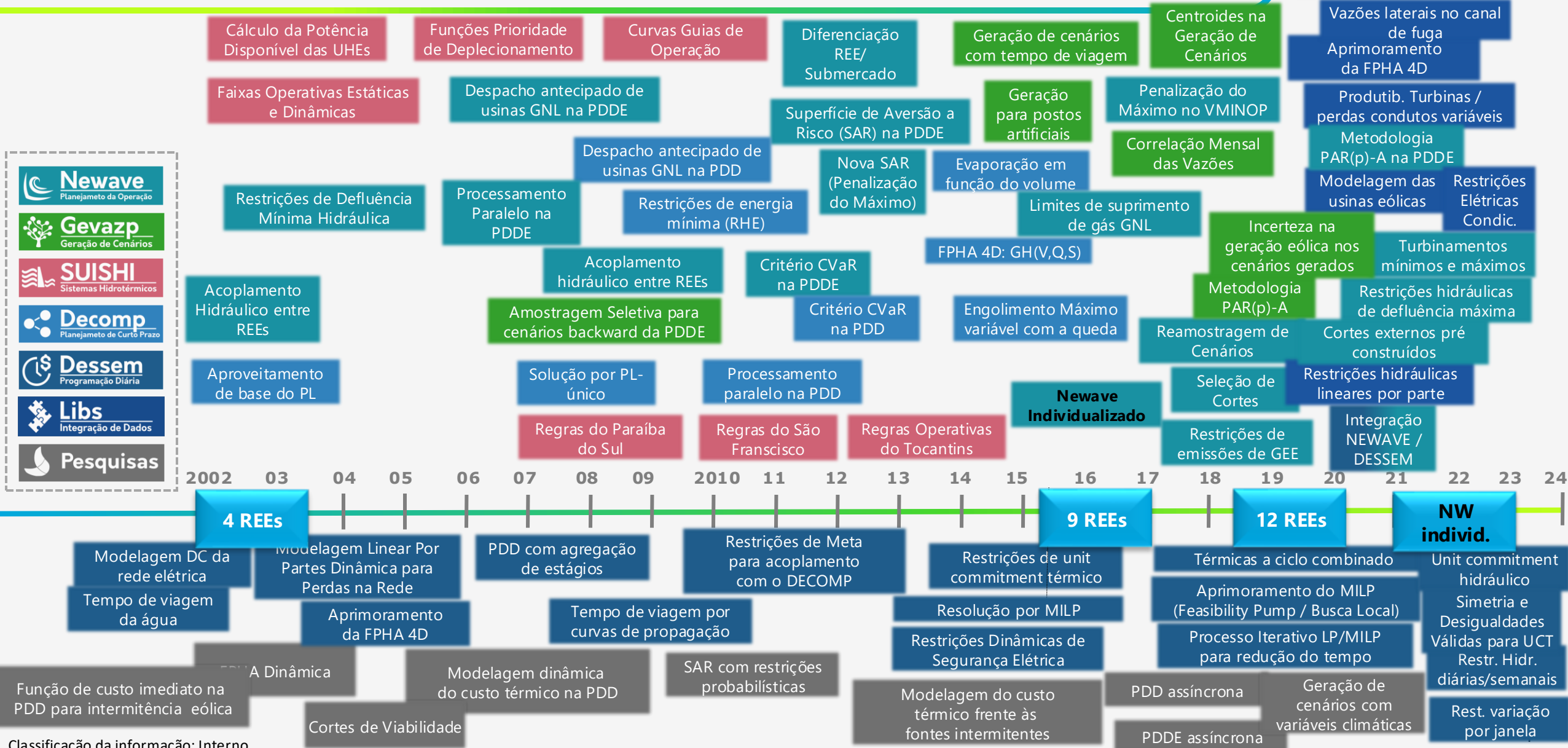


Oportunidades e
desafios
computacionais
e a **convergência**
do modelo



Como estamos
encaminhando
os **novos**
desafios de
modelagem no
longo prazo

Evoluções metodológicas e a representação hidráulica



Individualização da configuração hidráulica

Representação do sistema hidroelétrico mais aderente à realidade operativa

A **Modelagem Híbrida** combina os benefícios de ambas as modelagens, permitindo o equilíbrio:

- Detalhamento do sistema
- Representação da incerteza
- Qualidade da política de solução

Consulta pública do MME nº 151/2023

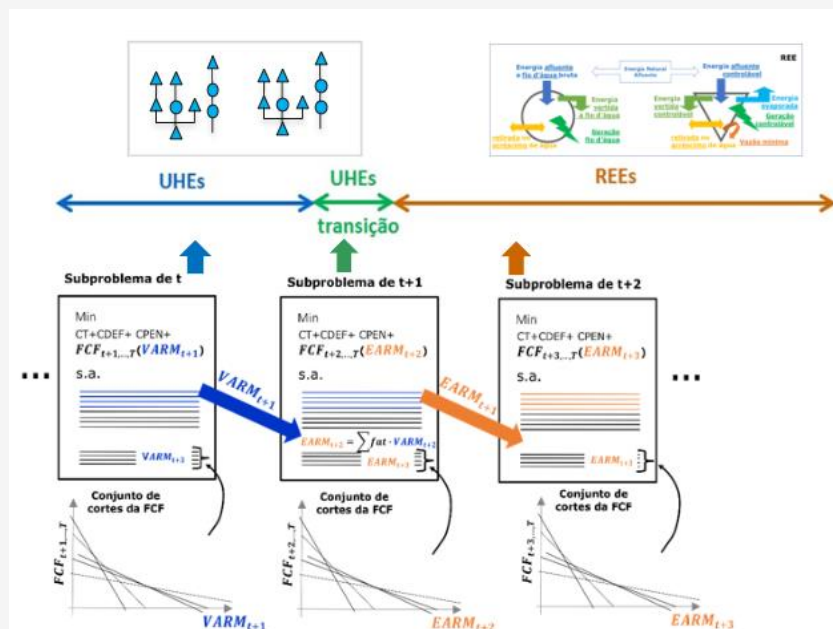


<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/consulta-publica-recebera-contribuicoes-para-aprimorar-modelos-computacionais-do-setor-eletrico>

Relatório técnico do CEPEL 1002/2022

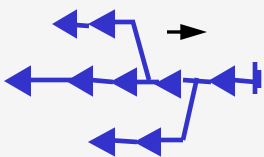
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL Relatório de Projeto - DSE - 1002 / 2022 Cliente: CPAMP		 A pesquisa que constrói o futuro
Título: Representação de usinas hidrelétricas individualmente e de forma agregada na programação dinâmica dual estocástica - NEWAVE Híbrido		Nº de Páginas: 93 Nº de Anexos: 0
Departamento: Departamento de Sistemas Eletroenergéticos - DSE Centro de Lucro: C250000101		Centro de Custo: C205000023
Resumo: Este relatório apresenta a abordagem denominada híbrida no modelo NEWAVE, onde as usinas hidrelétricas podem ser representadas individualmente até determinado período de tempo no horizonte de planejamento, e a reservatórios equivalentes após esse período. Com isso, tira-se proveito de ambas as modelagens: obtém-se os benefícios de uma representação individualizada das usinas hidrelétricas no horizonte mais próximo à tomada de decisão operacional, onde os resultados devem ser mais bem detalhados, e modelam-se tantos reservatórios equivalentes de energia quantos forem necessários para representar a diversidade hidrológica nos estágios temporais posteriores, de forma a não aumentar demasiadamente o esforço computacional para cálculo da política operativa. Descreve-se a modelagem das restrições em ambos os horizontes individualizado e agregado, assim como o acoplamento entre essas duas representações.		
Observações.		
Autores: Cristiane Barbosa da Cruz Oliveira - Cepel André Luiz Diniz Souto Lima - Cepel Thátiana Conceição Justino - Cepel Robério da Rocha Barboza - City Connect		Palavras-Chave: Planejamento da operação de longo/médio prazo; Programação dinâmica dual estocástica, Reservatório equivalente de energia, Usinas hidrelétricas individualizadas.
Classificação de acesso: ☒ Público ☐ Interno ☐ Setorial ☐ Confidencial		

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

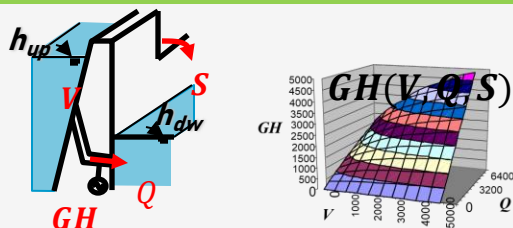


Representação do parque hidráulico

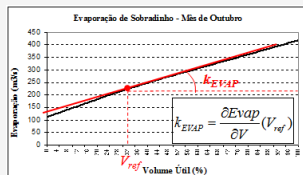
Restrições físicas



USINAS EM CASCATA

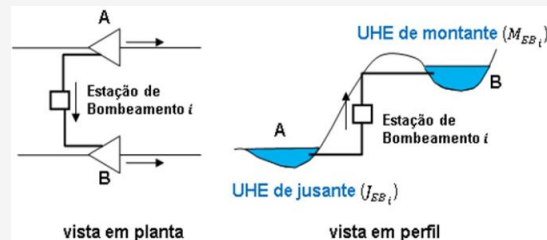


PRODUTIVIDADE VARIÁVEL COM ALTURA DE QUEDA e VAZÃO

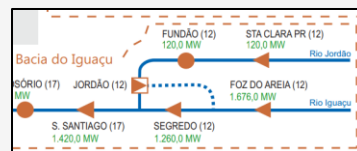


EVAPORAÇÃO VARIÁVEL COM VOLUME

Componentes adicionais



ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO (USINAS REVERSÍVEIS)

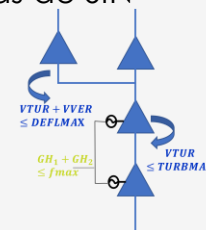


source: www.ons.org.br

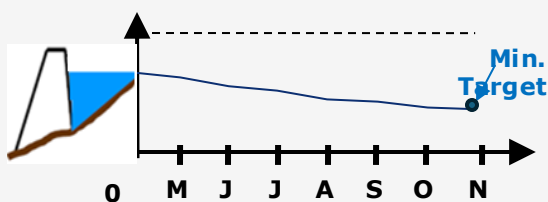
CANAIS DE DESVIO

NOVIDADES NA MODELAGEM

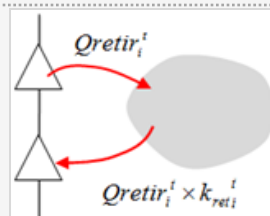
- **Turbinamento** máximo e mínimo
- **Defluência** máxima
- Restrições hidráulicas lineares por partes (LPP): **ANA**
- Restrições **elétricas especiais**: questões de transmissão, controles de tensão e etc, em áreas específicas do SIN
- Restrições hidráulicas de volume (**RHV**)
- Restrições hidráulicas de vazão (**RHQ**)
- Aprimoramentos FPHa: ajuste, produtividade e perdas variáveis e famílias de polinômios de jusante por partes.



Restrições de uso múltiplo e de segurança



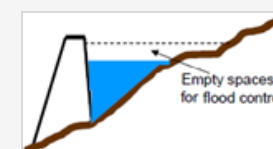
ARMAZENAMENTO MÍNIMO (VMINOP)



USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA



DEFLUÊNCIAS E TURBINAMENTOS MÁXIMOS E MÍNIMOS



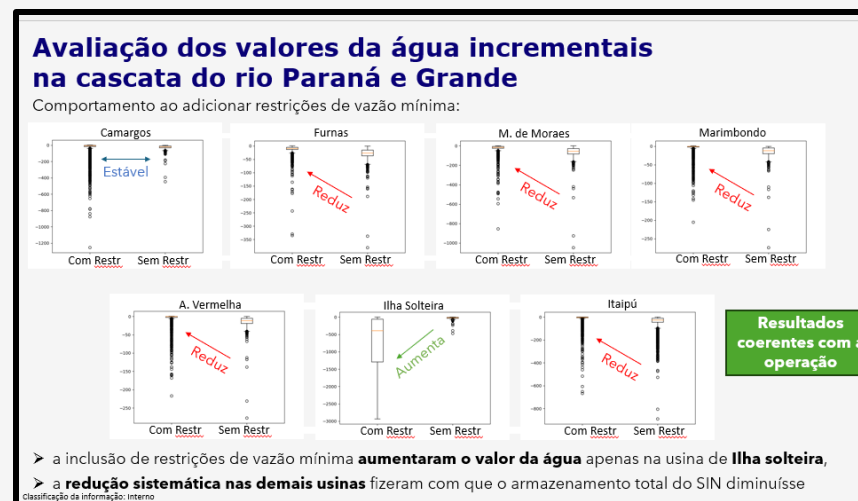
ARMAZENAMENTO MÁXIMO (CONTROLE DE CHEIAS)

Individualização da configuração hidroelétrica

- **Formulação do NEWAVE torna-se mais aderente** as dos modelos que utilizam a função de custo futuro (FCF)
- **Maior severidade** das restrições hidráulicas:
 - Restrições específicas para usina impede “compensações” na operação de outra.

Observação: Consideração das defluências mínimas em usinas a fio d'água.

- **FCF** com variáveis de estado diferenciados **por usina**:
 - Valor da água individualizado é capaz de representar melhor as regras operativas implícitas na política.
 - Maior grau liberdade nas decisões operativas.
 - Aumento do espaço de estados.



As restrições operativas: CMO e Valor da água

XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
20 a 24 de novembro de 2023 - CCEB - Brasília - DF

1750
GOP/1

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

ANÁLISE DOS VALORES DA ÁGUA, OPERAÇÃO DO SISTEMA E CÁLCULO DE PREÇOS DO SIN COM A MODELAGEM INDIVIDUALIZADA DOS RESERVATÓRIOS NO PLANEJAMENTO DE MÉDIO/LONGO PRAZOS

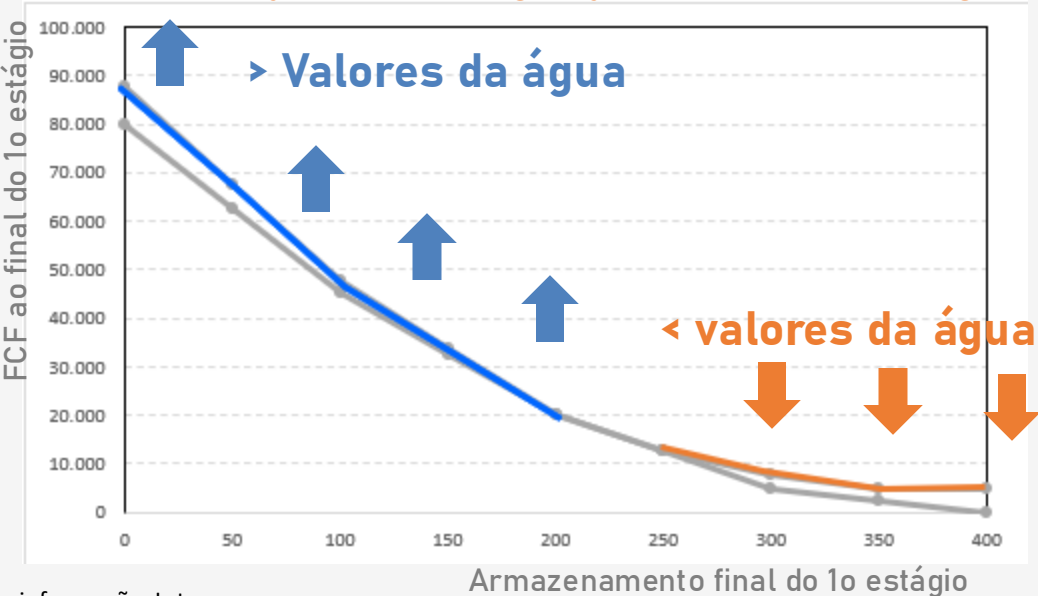
CRISTIANE BARBOSA DA CRUZ OLIVEIRA(1); LILIAN CHAVES BRANDÃO DOS SANTOS(1); ANDRÉ LUIZ DINIZ(1); DÉBORA DIAS JARDIM PENNA(2);
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, CEPEL(1); OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO(2)

Electric Power Systems Research
Volume 235, October 2024, 110819

Water values and marginal costs for power generation planning under more restrictive constraints and a more detailed representation of hydro plants

Cristiane Barbosa da Cruz , Lílian Chaves Brandão, André Luiz Diniz

- Sem restrições hidráulicas
- Com restrições de vazão/geração **MÍNIMA** no 2º estágio
- Com restrições de vazão/geração **MÁXIMA** no 2º estágio



O impacto das restrições hidráulicas em cada série e período

Restrição Hidráulica (no estágio t)	Custo total	Custo no estágio t	CMO no estágio t	Valor da água para t – 1 (usina com a restrição)
Vazão mínima ou Geração mínima	↑	↓ =	↓ =	↑
Armazenamento mínimo	↑	↑ =	↑ =	↑
Vazão/turbinamento ou geração máxima	↑	↑ =	↑ =	↓ ↓ (negativo)
Armazenamento máximo	↑	↓ =	↓ =	↓ ↓ (negativo)

EVITA
GERAÇÃO
FORÇA
GERAÇÃO

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

52,4 MILHÕES DE SUBPROBLEMAS

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

PDE

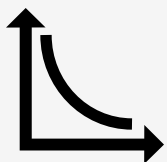
SUBPROBLEMA DE
 PROGRAMAÇÃO LINEAR
 PMO/PLD **REE**

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



SUBPROBLEMA DE
 PROGRAMAÇÃO LINEAR
 PMO/PLD **INDIVIDUALIZADO**

VARIÁVEIS**3,8K**
 RESTRIÇÕES....**4,5K** + ~10K
 CORTES DE BENDERS [50ª ITER]



Variáveis de estado para definição da política operativa:

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

ENERGIA ARMazenada....**12**
 ENERGIA AFLUENTE.....**144**
 ANTECIPAÇÃO TÉRMICA.....24
 VMinOpMax.....12



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

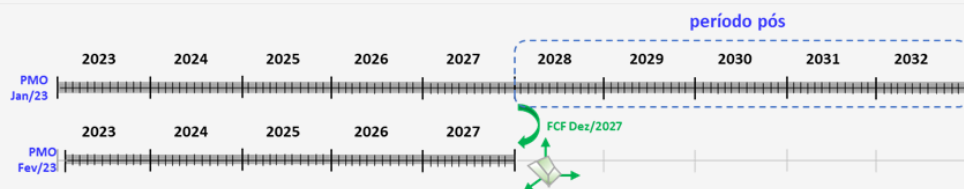
VOLUME ARMazenado...**160**
 VAZÃO AFLUENTE.....**1920**
 ANTECIPAÇÃO TÉRMICA.....24
 VMinOpMax.....12

Melhorias computacionais já entregues



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**
- **Nova paralelização** na **geração de cenários**
- **Função de Custo Futuro Externa (PÓS)**



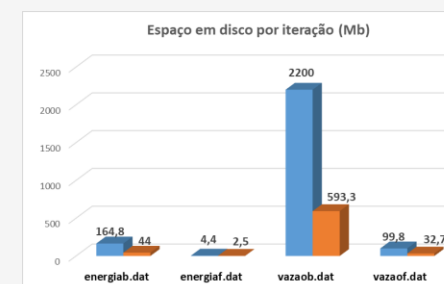
ARMAZENAMENTO EM DISCO

- 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**



CONSUMO DE MEMÓRIA RAM

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



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



cortes.dat
~3,5GB

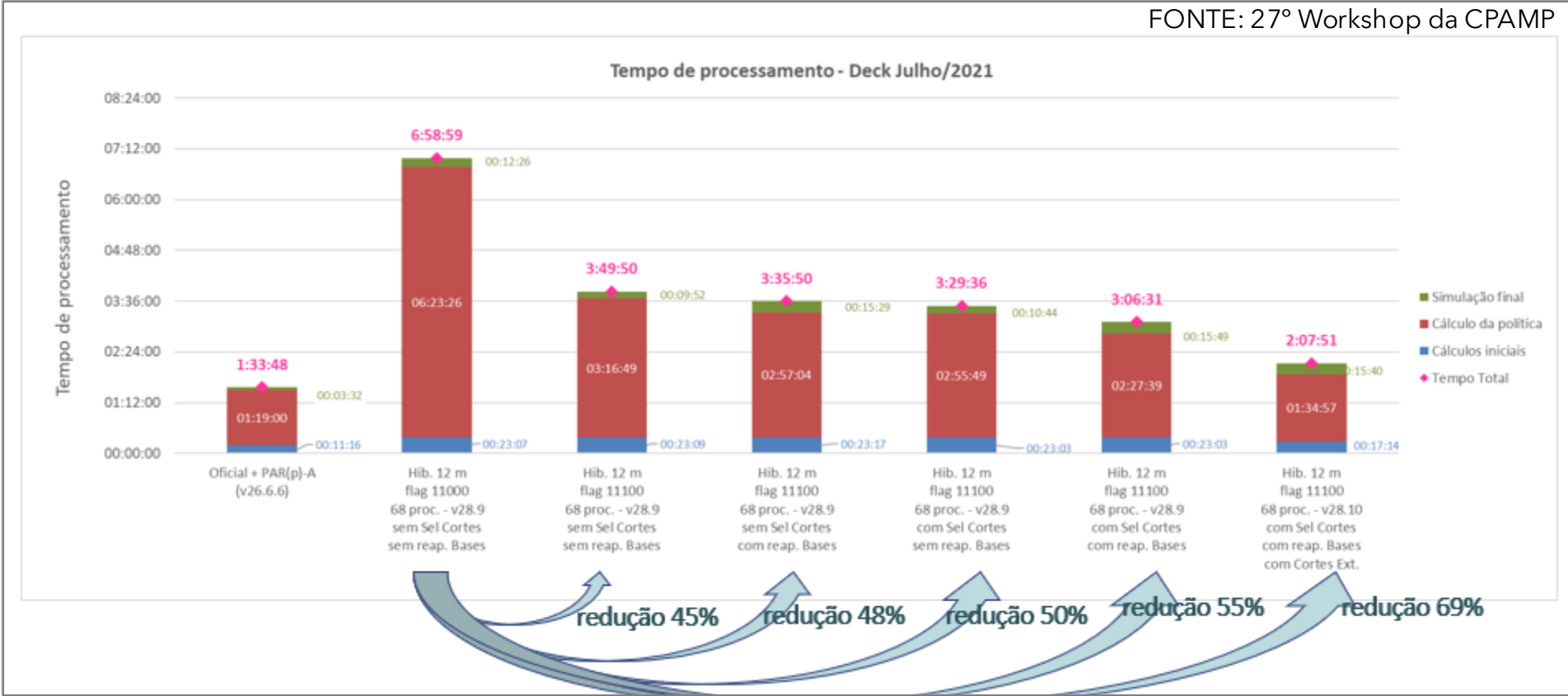


cortes-002.dat
~165MB



Melhorias computacionais já entregues

FONTE: 27º Workshop da CPAMP

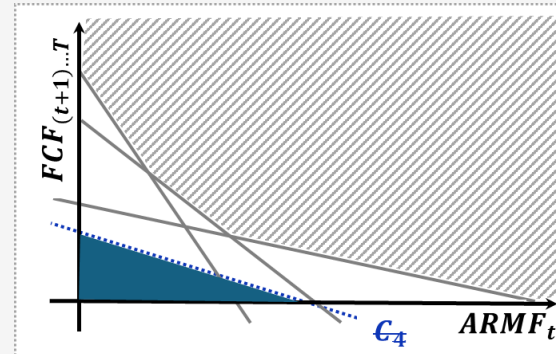
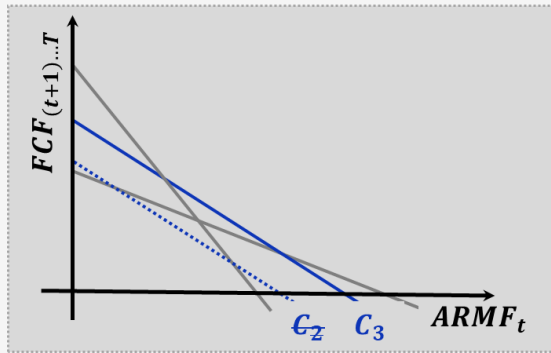

 - 70%

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

Análise feita pela CCEE

Avanços para 2025

1. **Eliminação** de cortes de cortes de Benders **dominados**. [abril de 2025]
[Tekaya, Shapiro et al,2012], [Silva, 2024]



2. **Seleção de cortes** na simulação final. [abril de 2025]
[Diniz,2009], [de Matos, Philpott, Finardi,2012],
[Brandi, Ramps et al, 2015] [Diniz, Maceira, et al, 2017]
3. Atualização do ambiente computacional de desenvolvimento: [abril de 2025]
Sistema Operacional: Distribuição Linux Ubuntu 24.04 LTS.
Bibliotecas: COIN, CPLEX, Compiladores e MPI.

Avanços para 2025

- Análise para redução de hiperplanos semelhantes da FPHa
 - Critério **angular** de paralelismo com tolerância entre hiperplanos
 - **Distância** entre hiperplanos na região **ativa**

- Avaliação de **outros pacotes** como XPRESS e Gurobi.

- Operacionalização** da biblioteca **Gurobi** [abril de 2025]

Disponibilização do NEWAVE com Gurobi **embutido** – Trial [maio de 2025]

Dessem disponibilizado com Gurobi embutido – Trial em abril de 2025

- Avaliação das soluções com **GPU**.

NOVIDADE: Com a liberação open source do PDLP pela NVIDIA, a Gurobi iniciou testes com esse método de primeira ordem e já observa desempenho competitivo frente ao Simplex em problemas de grande escala.

Eletrobras
Cepel

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

Apresentação do CEPEL no
35º Workshop CPAMP, 02/05/2024

NVIDIA

Home AI Data Center Driving Gaming Pro Graphics Robotics Healthcare Startups

NVIDIA Open-Sources cuOpt, Ushering in New Era of Decision Optimization

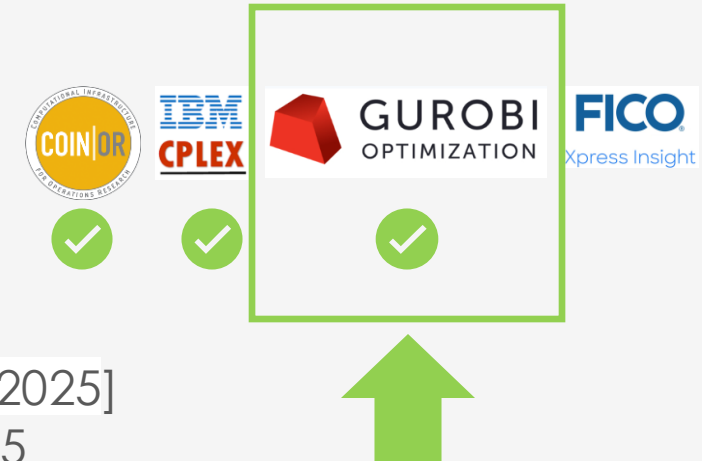
Gurobi Optimization, HIGHS, SimpleRose, COPT and other industry leaders advance complex decision-making and supply chain optimization with NVIDIA accelerated computing and cuOpt software.

March 18, 2025 by Gordana Neskovic

BLOG

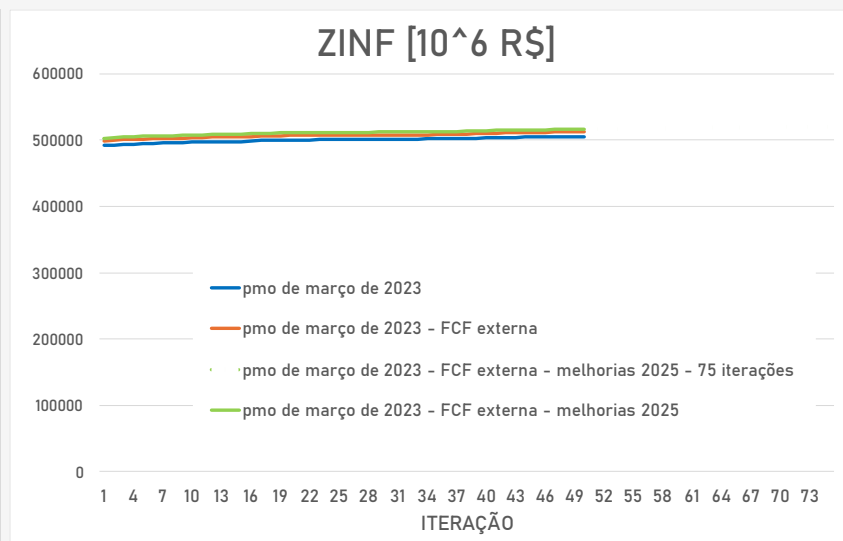
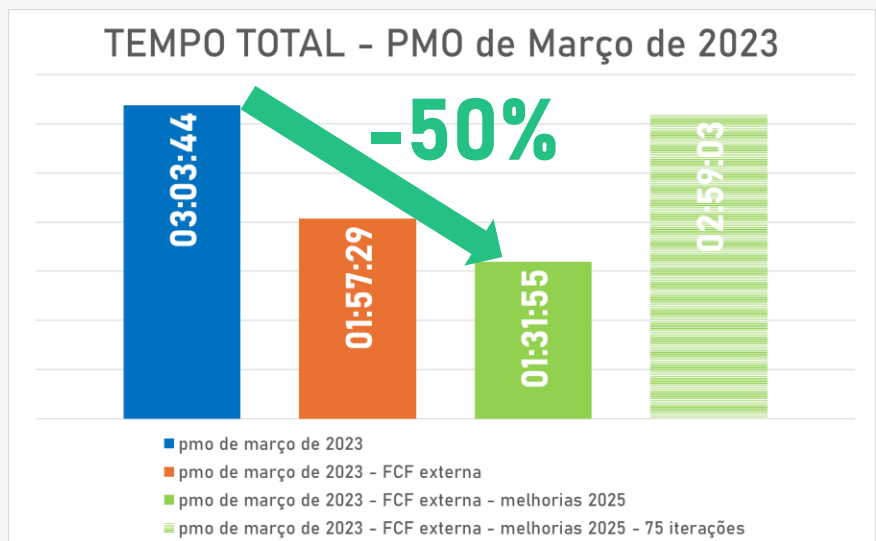
Gurobi Teams With NVIDIA to Advance First-Order Methods for Large-Scale Optimization

Gurobi applauds the open-sourcing of NVIDIA's cuOpt PDLP to help explore faster, more efficient solutions for real-world challenges.



Avanços para acelerar a execução e o processo iterativo já implementados

1. Execução com **período POS** estudo já construída.
2. Operacionalização da biblioteca **Gurobi**.
3. **Eliminação** de cortes de cortes de Benders **dominados**: algoritmo de comparação por pares.
4. Análise para **redução** de **hiperplanos semelhantes** da FPHa - Critério **angular**



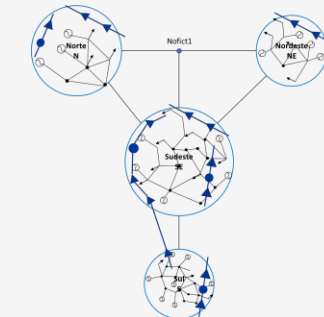
- 50%

+25 ITERAÇÕES

2025 e os demais aprimoramentos para evolução do modelo NEWAVE

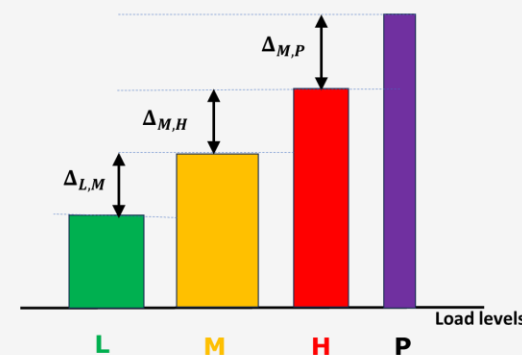
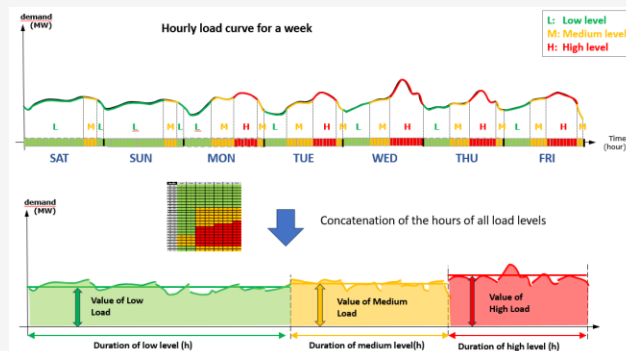
1. Representação da **rede elétrica** no modelo **NEWAVE** [Barboza, 2025]

- Fluxo de potência linear na rede básica do SIN
- Fluxo de potência nos sistemas HVDC
- Geração e demanda por barra
- Custo marginal da barra



2. Aumento da **quantidade de patamares de carga** para maior detalhamento das questões horárias.

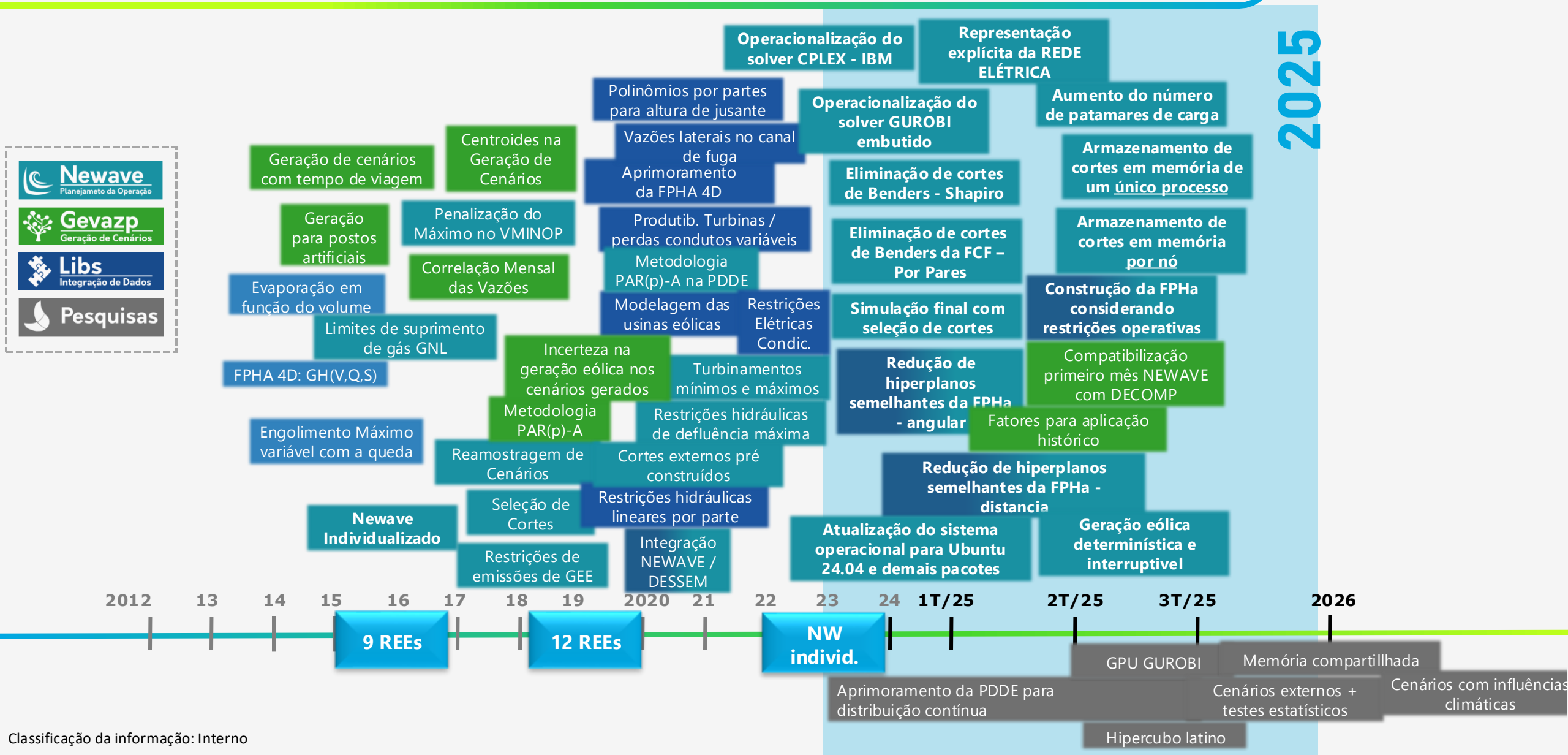
Embora os patamares de carga não sejam cronológicos, podem ser desenvolvidas restrições de variação máxima ($\Delta x, y$) na injeção das fontes (ex: térmicas mais lentas) entre os patamares de carga



Os limites de geração (Δ) podem ser estimados em função das características de cada fonte e duração dos patamares.

$$\begin{aligned}
 -\Delta_{H,P} &\leq (GTER_{L,t,P} - GTER_{L,t,H}) \leq \Delta_{H,P} \\
 -\Delta_{M,H} &\leq (GTER_{L,t,H} - GTER_{L,t,M}) \leq \Delta_{M,H} \\
 -\Delta_{L,M} &\leq (GTER_{L,t,M} - GTER_{L,t,L}) \leq \Delta_{L,M}
 \end{aligned}$$

L: Low level
 M: Medium level
 H: High level
 ...
 P: Peak level



OBRIGADA

Cristiane Cruz
Equipe NEWAVE

+55 21 2598-6454
criscruz@cepel.br
newave@cepel.br

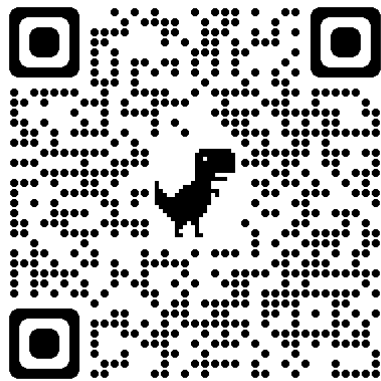
www.cepel.br

 /company/eletrobrascepel  /cepeloficial  /cepeloficial

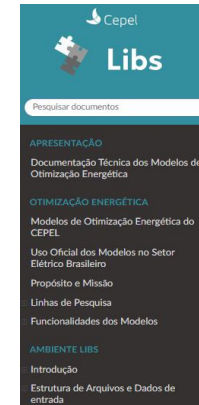
Documentação unificada ONLINE



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



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

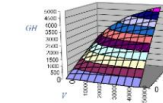


Funcão de Produção Hidrelétrica

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

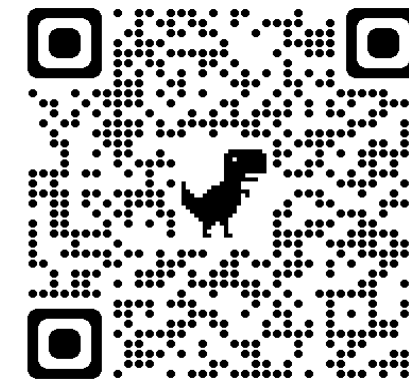
➤ É uma **função não linear** da vazão turbinada e da altura de queda dos reservatórios



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/>

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.

Referências

[Barboza, 2025] R. R. Barboza, “Representação da Rede Elétrica no Problema de Planejamento Hidro-Termo-Eólico Resolvido por Programação Dinâmica Dual Estocástica: Aplicação ao Modelo Newave”, Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2025.
