

Workshop CPAMP/GT-Metodologia

Relatórios dos Temas do Ciclo 2019-2020-2021

GT METODOLOGIA
17/12/2020

Coordenação: CCEE

Assessoria Técnica:



Agenda

1. **Cronograma das atividades do ciclo 2019/2020**
2. **Apresentações dos Relatórios da Consulta Pública MME**
 - **SG Volatilidade do CMO/PLD**
 - **SG Representação Hidrológica**
 - **SG Representação da Produtibilidade Hidrelétrica**

Agenda

1. **Cronograma das atividades do ciclo 2019/2020**
2. **Apresentações dos Relatórios da Consulta Pública MME**
 - **SG Volatilidade do CMO/PLD**
 - **SG Representação Hidrológica**
 - **SG Representação da Produtibilidade Hidrelétrica**

1. Cronograma de atividades do ciclo 2020-2021 (incluindo atividades bianuais)

Avaliações e Testes Metodológicos

Temas	Ago/20	Set/20	Out/20	Nov/20	Dez/20	Jan/21	Fev/21	Mar/21	Abr/21	Mai/21	Jun/21	Jul/21
Ciclo 19/20												
Ciclo 20/21												
Ciclo 20/22												

Validações de versões

Temas	Ago/20	Set/20	Out/20	Nov/20	Dez/20	Jan/21	Fev/21	Mar/21	Abr/21	Mai/21	Jun/21	Jul/21
Ciclo 19/20												
Ciclo 20/21												
Ciclo 20/22												

Consultas públicas

Temas	Ago/20	Set/20	Out/20	Nov/20	Dez/20	Jan/21	Fev/21	Mar/21	Abr/21	Mai/21	Jun/21	Jul/21
Ciclo 19/20												
Ciclo 20/21												

Ciclo 2019/2020 (Finalização)

- Volatilidade (s/ ENA VE)
- Rep. Hidrológica
- Produtibilidade

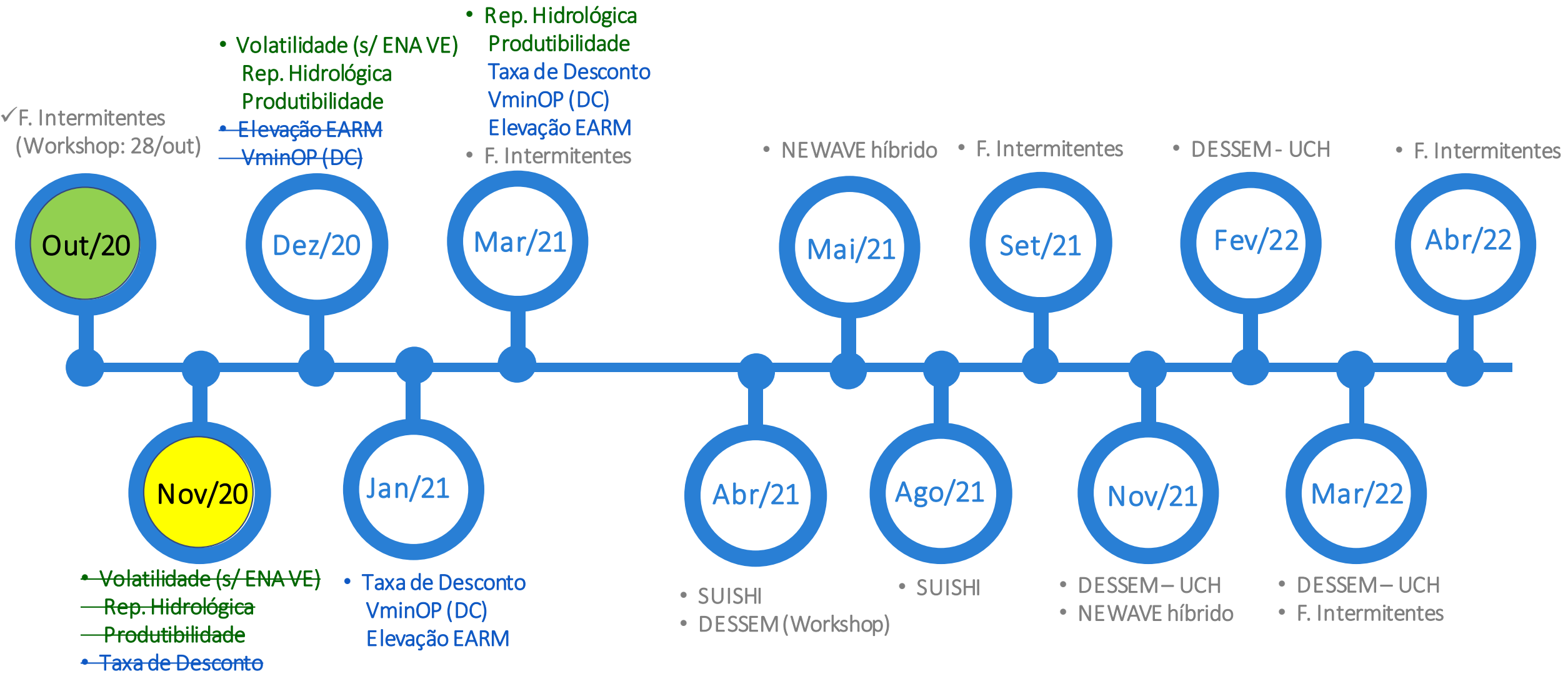
Ciclo 2020/2021

- Taxa de desconto
- VminOP (DC)
- Elevação EARM

Ciclo Bianual 2020/2022

- DESSEM UCH
- Fontes Intermitentes
- NW Híbrido
- SUISHI

1. Cronograma de atividades do ciclo 2020-2021: Encontro com os Agentes



Atividades do ciclo 2019-2020 (Finalização)
Atividades do ciclo 2020-2021
Atividades do ciclo bianual 2020-2022

1. Cronograma de atividades do ciclo 2020-2021

Cronogramas completos disponíveis em:

<http://www.mme.gov.br/web/guest/conselhos-e-comites/cnpe/cpamp>

CRONOGRAMAS	
 Cronograma de Trabalho do GT Governança da CPAMP 2019	DOWNLOAD
 Cronograma de Trabalho da CPAMP Ciclo 2019/2020	DOWNLOAD
 Cronograma de Trabalho da CPAMP Ciclo 2020/2021	DOWNLOAD ←
 Cronograma de Trabalho da CPAMP Ciclo 2020/2021 - Resumo	DOWNLOAD ←

Agenda

1. Cronograma das atividades do ciclo 2019/2020
2. **Apresentações dos Relatórios da Consulta Pública MME**
 - **SG Volatilidade do CMO/PLD**
 - **SG Representação Hidrológica**
 - **SG Representação da Produtibilidade Hidrelétrica**

Relatório Técnico

Volatilidade do CMO/PLD: Resultados do modelo NEWAVE sem ENA como variável de estado

Assessoria Técnica:



Motivação

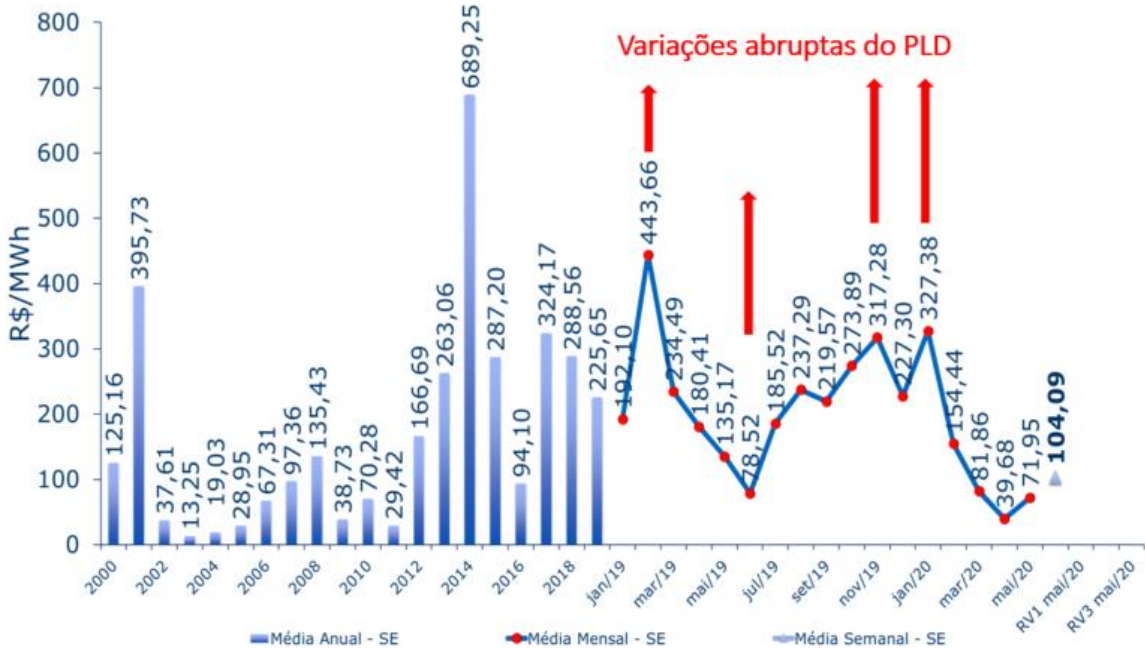
- Nota-se que no Brasil, a **volatilidade** ainda pode ser **considerada baixa** – aproximadamente **64% ao mês** – quando comparada a países com sistema elétricos semelhantes ao SIN.
- A volatilidade por si só não é indesejável em mercados de energia.

País/Mercado		Volatilidade horária	Volatilidade em base mensal
Canadá - Alberta		34,50%	926%
Chile (P. Azucar)		26,00%	698%
PJM		29,40%	789%
Colômbia		16,30%	437%
Califórnia (Independent System Operator)		29,80%	800%
Brasil - Semanal (DECOMP)	Sudeste	2,40%	64%
	Sul	2,40%	64%
	Nordeste	2,70%	72%
	Norte	2,20%	59%

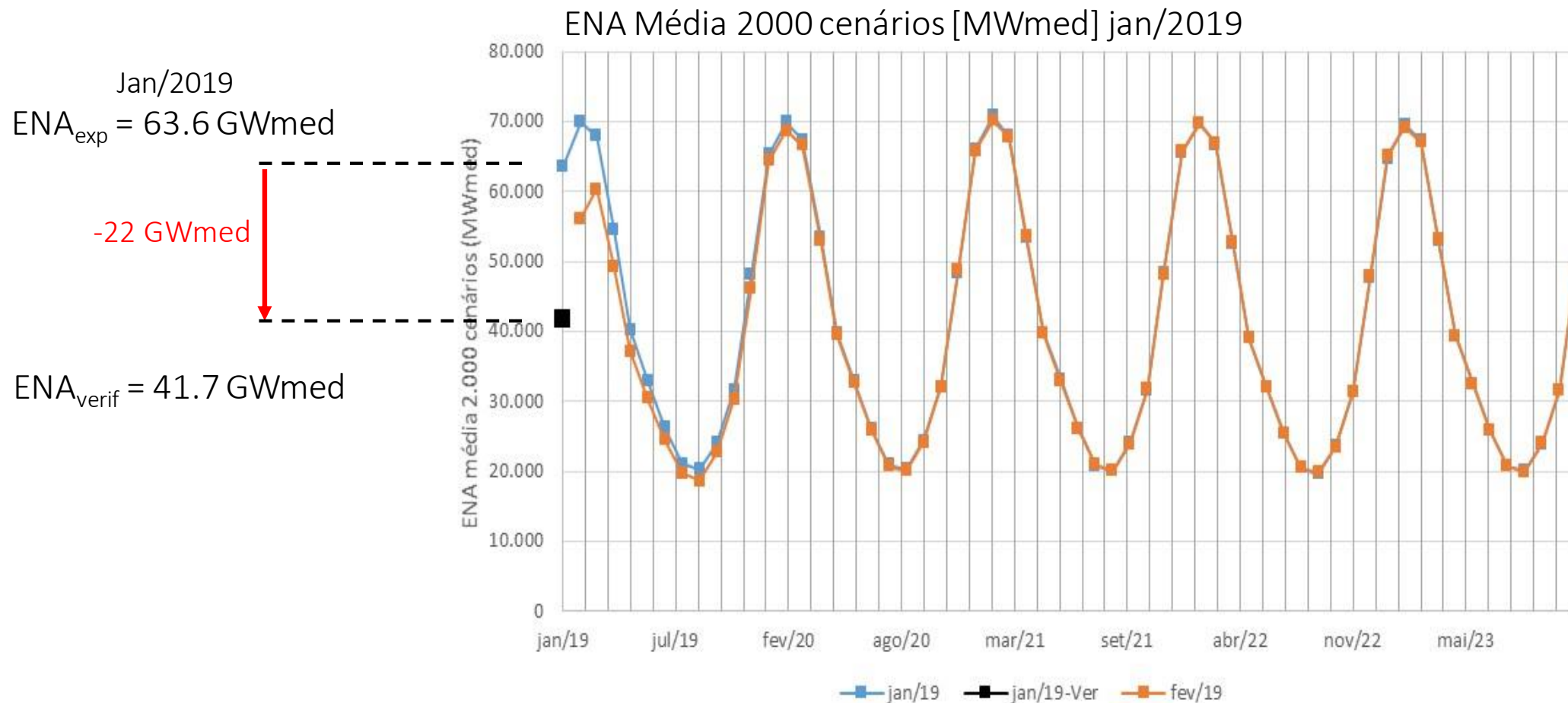
*Mercado brasileiro – Histórico de julho de 2018 a outubro de 2019

* Outros mercados – Histórico de 2013 a 2017

- O que causa desconforto aos Agentes de mercado são as variações abruptas do PLD, como a variação de janeiro para fevereiro/2019, passando de **192 R\$/MWh** para **444 R\$/MWh** (salto de **2,3 vezes**).



Motivação

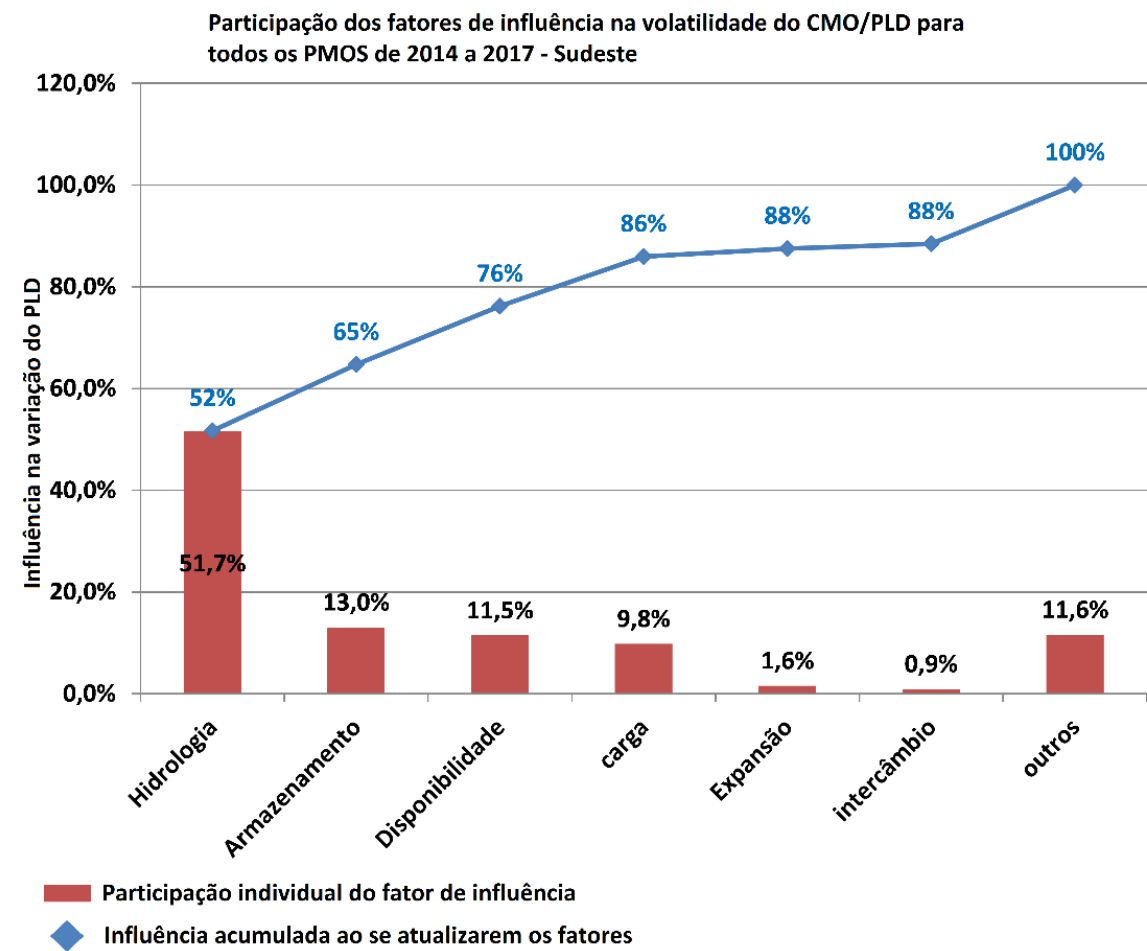


Para o PMO de fev/2019, o Armazenamento inicial foi **14,7 GWmed** abaixo do esperado, enquanto houve uma redução de **46,6 GWmed** na ENA esperada para os próximos meses.

Ou seja, o impacto nos cenários da ENA foi **3 vezes maior** que no armazenamento.

Motivação

- Principais **variáveis** que influenciam no preço.



- Este trabalho apresentou a relação matemática do **impacto** causado pelas **variáveis** de estado **afluência** e **volume armazenado**, propondo a exclusão da **afluência** como **variação de estado** para **mitigar a volatilidade do CMO/PLD**.



Background Técnico da Literatura

A utilização da informação de tendência hidrológica em problemas de operação de reservatórios tem historicamente uma importância na literatura internacional ao longo do tempo em diversos trabalhos, para diferentes sistemas

Inclusão de vazões passadas na FCF (British Columbia, EUA/CAN, 1955)

[Home](#) > [Journal of the Operations Research Society of America](#) > Vol. 3, No. 2 >

The Use of Storage Water in a Hydroelectric System

John D. C. Little

Inclusão da vazão prevista como variável de estado (rio Nilo, 1984)

Water Resources Research

Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization

Jery R. Stedinger, Bola F. Sule, Daniel P. Loucks



Volume 20, Issue 11
November 1984
Pages 1499-1505

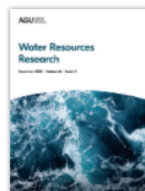
Importância da consideração da tendência hidrológica (California, 1995)

Water Resources Research

Water Policy and Economics

The Value of Hydrologic Information in Stochastic Dynamic Programming Models of a Multireservoir System

J. Alberto Tejada-Guibert, Sharon A. Johnson, Jery R. Stedinger



Volume 31, Issue 10
October 1995
Pages 2571-2579

Inclusão de afluição passada como variável de estado (Brasil, 1986)

[Home](#) > [INFORMS Journal on Applied Analytics](#) > Vol. 16, No. 1 >

Coordinating the Energy Generation of the Brazilian National Hydrothermal Electrical Generating System

L. A. Terry, M. V. F. Pereira, T. A. Araripe Neto, L. F. C. A. Silva, P. R. H. Sales

Published Online: 1 Feb 1986 | <https://doi.org/10.1287/inte.16.1.16>

Modelo par-P (Brasil, 1997)

Stochastic streamflow model for hydroelectric systems

Publication Date: Dec 31, 1997

Product Type: Miscellaneous

Available from PMAPS '97, c/o British Columbia Hydro, 67911 Southpoint Drive, Burnaby, BC (Canada) V3N 4X8

Modelo autorregressivo com variável exógena (Canadá, 2017)

Water Resources Research

Volume 53, Issue 11

November 2017

Pages 9845-9859

Research Article | [Free Access](#) |

Optimizing Multireservoir System Operating Policies Using Exogenous Hydrologic Variables

Jasson Pina, Amaury Tilmant, Pascal Côté

Representação da situação hidrológica por cadeia de Markov (N. Zelândia, 2012)



European Journal of Operational Research

Volume 218, Issue 2, 16 April 2012, Pages 470-483



Stochastics and Statistics

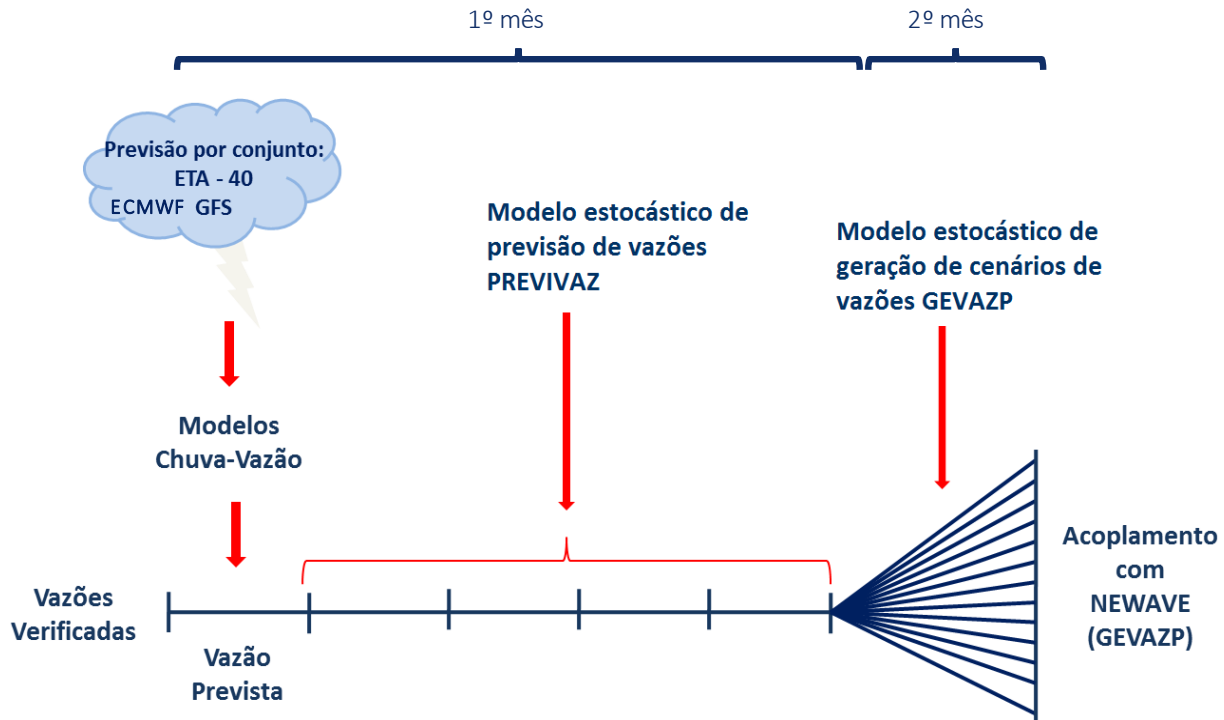
Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion ☆

A.B. Philpott^a, V.L. de Matos^b

A proposta

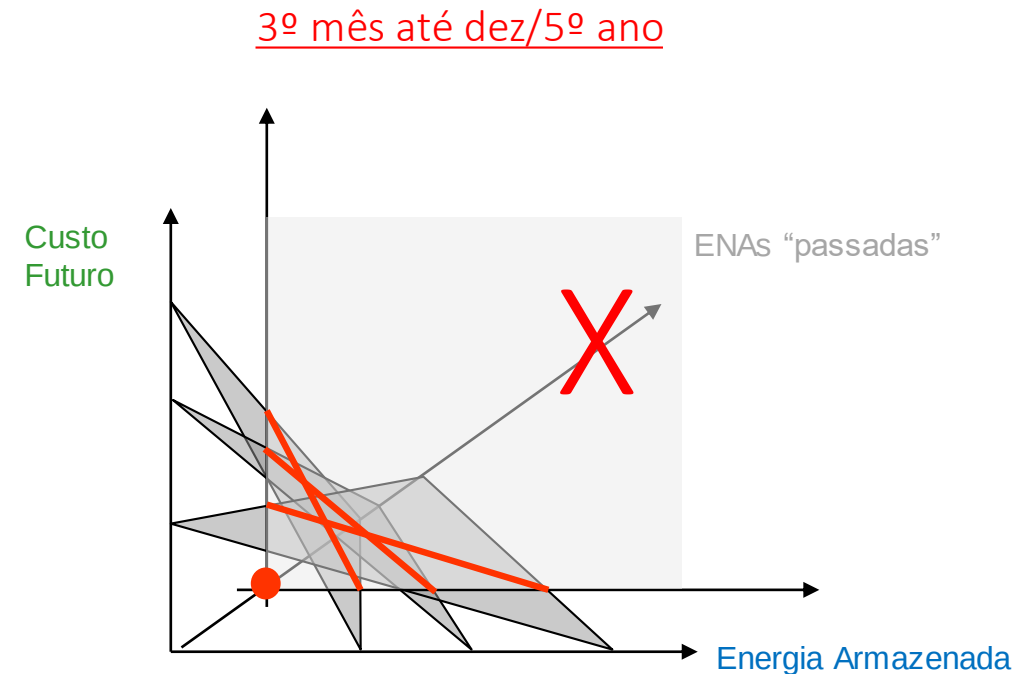
DECOMP

- Mantém a metodologia vigente
- Acoplamento com NEWAVE considerando a metodologia sem VETH



NEWAVE

- Proposta: Metodologia sem tendência hidrológica como variável de estado (sem VETH)
- Construir a FCF tendo apenas o armazenamento como variável de estado



Métricas de volatilidade das rodadas encadeadas de janeiro/2019 a junho/2020

A simulação encadeada NEWAVE-DECOMP do caso sem VETH com CVaR* (10,90) resultou em menor volatilidade do CMO/PLD para todas as métricas utilizadas.

jan/2019 a jun/2020

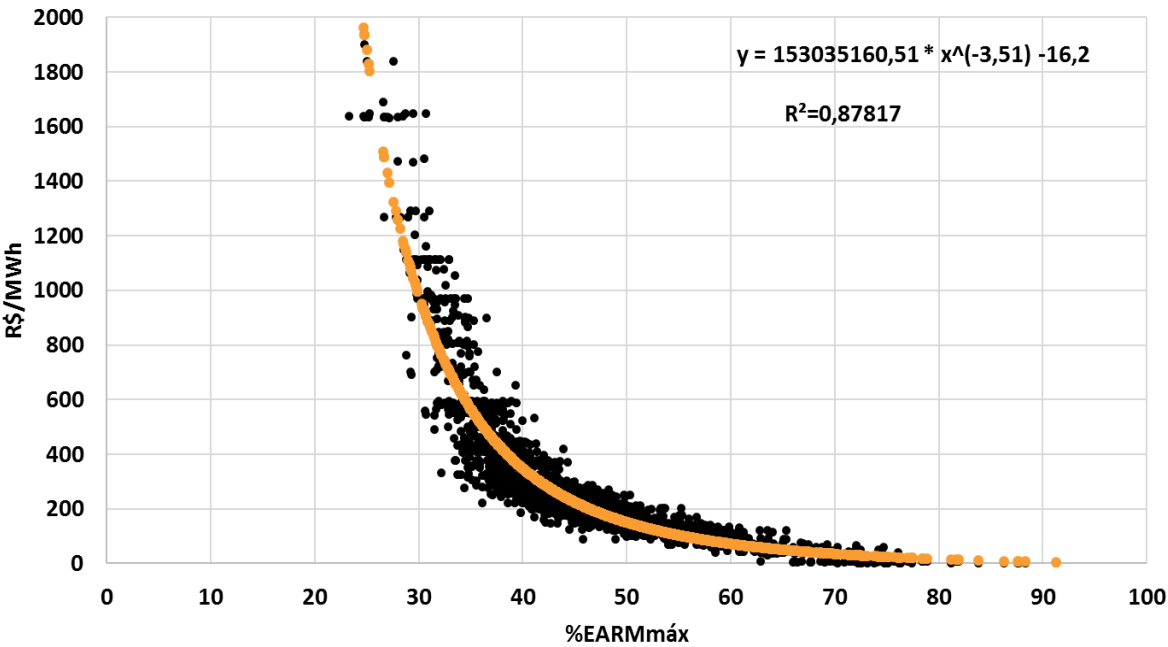
Caso	Volatilidade Semanal	Volatilidade em base mensal	Desvio Padrão [R\$/MWh]	FM [25%]	FM [50%]	FM [100%]	FM [200%]
Oficial	27%	54%	96,57	27%	8%	0%	0%
Vigente	36%	72%	124,52	32%	15%	3%	0%
sem VETH 1090	26%	52%	46,33	15%	5%	0%	0%

Frequência é o número de vezes que a série tem uma variação maior que o limite:

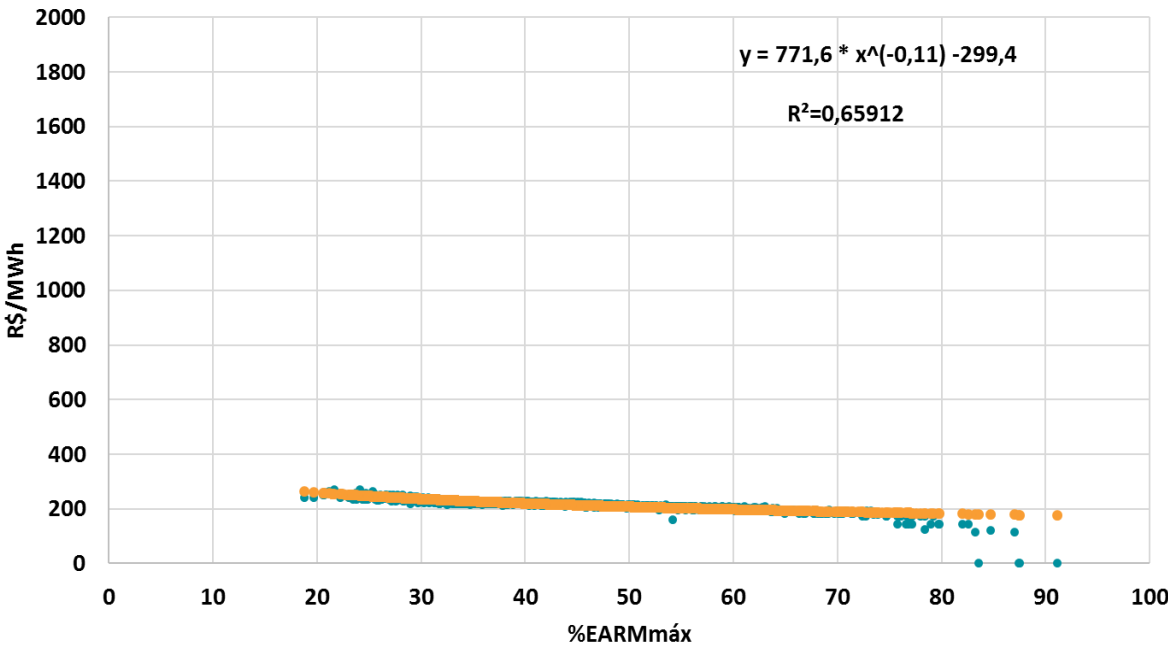
$$Frequência = \text{abs}(R_t - R_{t-1}) \cdot 100 / R_t$$

CMO vs EARM fevereiro/2019

Dispersão: EARM x CMO - Sudeste (2º mês) - Vigente

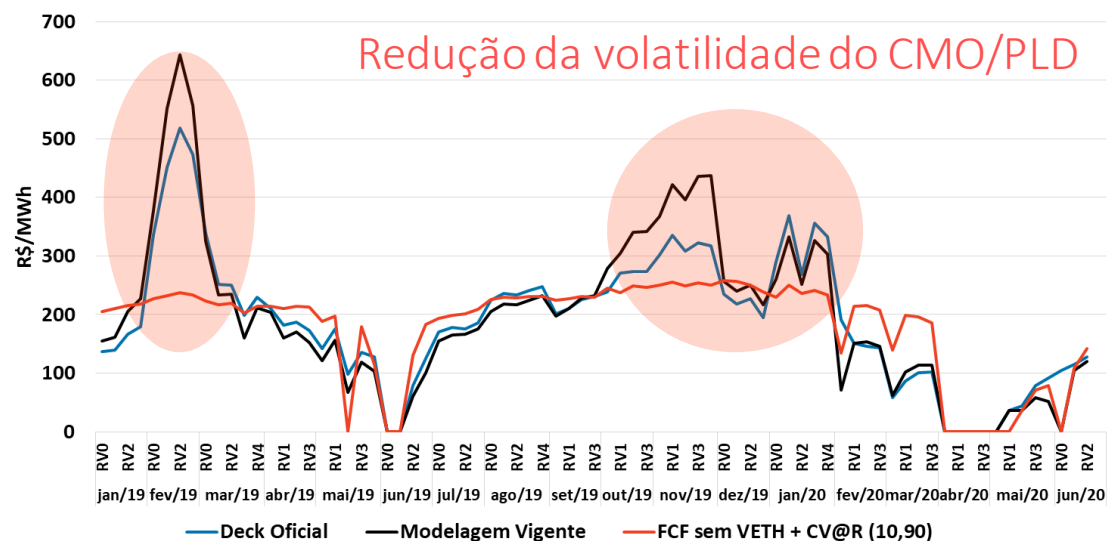


Dispersão: EARM x CMO - Sudeste (2º mês) - 1090 sem VETH

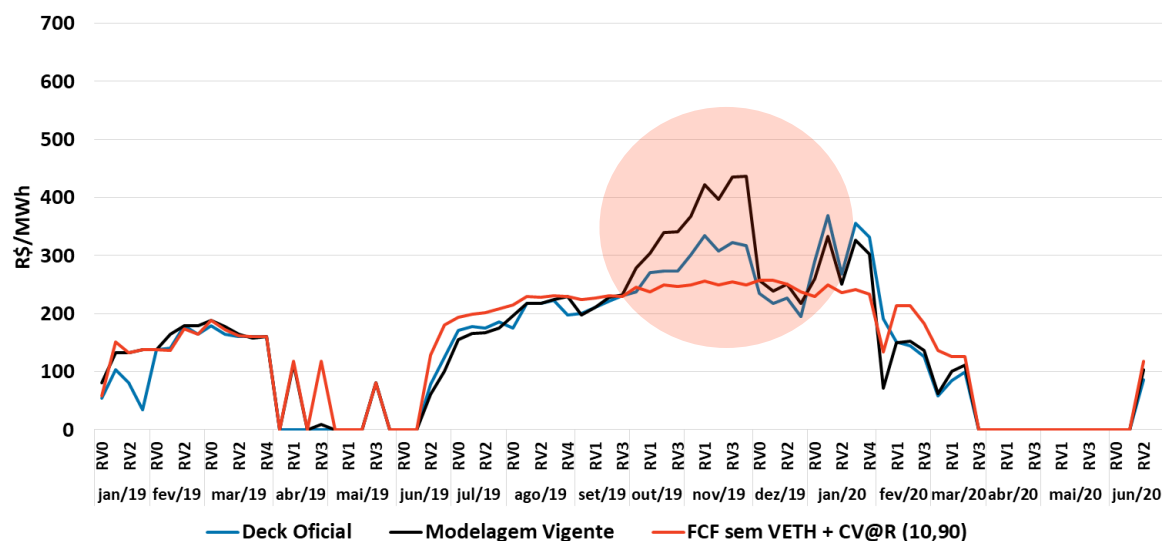


Rodadas encadeadas de janeiro/2019 a junho/2020

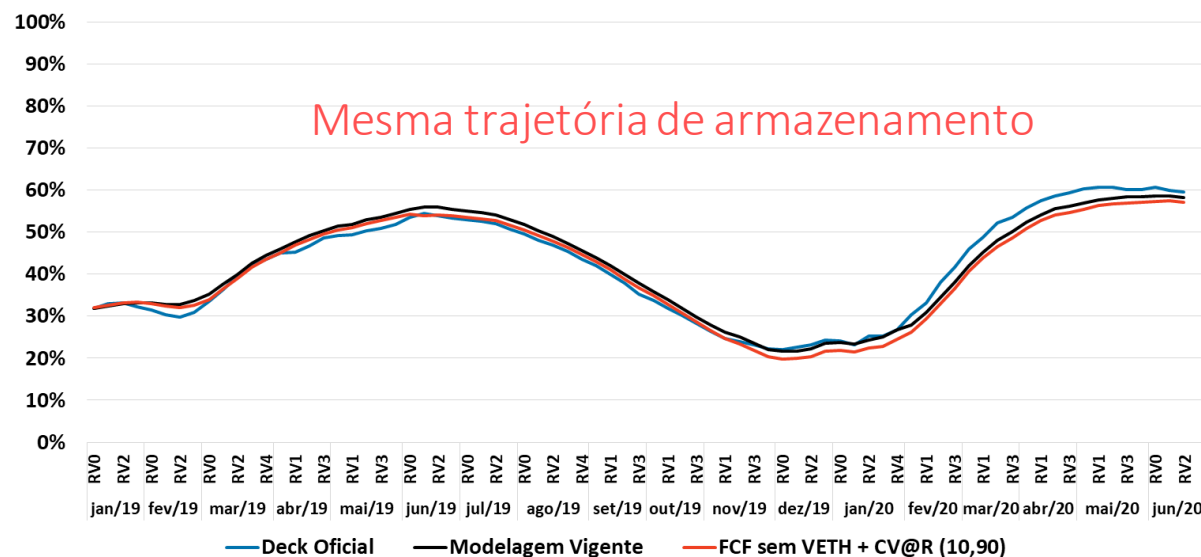
PLD Sudeste (sem limitação de piso e teto)



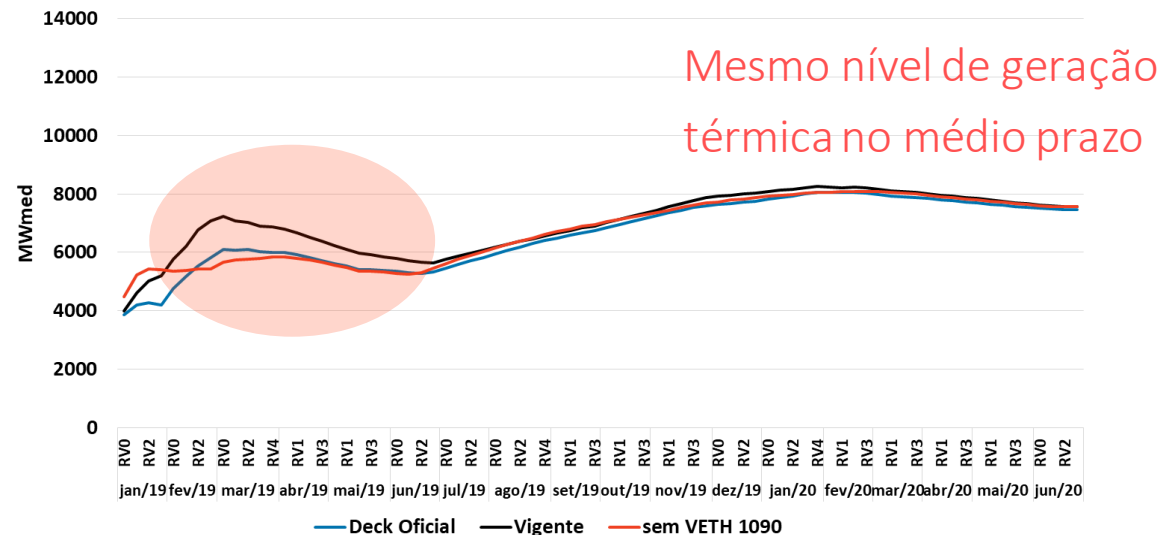
PLD Nordeste (sem limitação de piso e teto)



EARM SIN

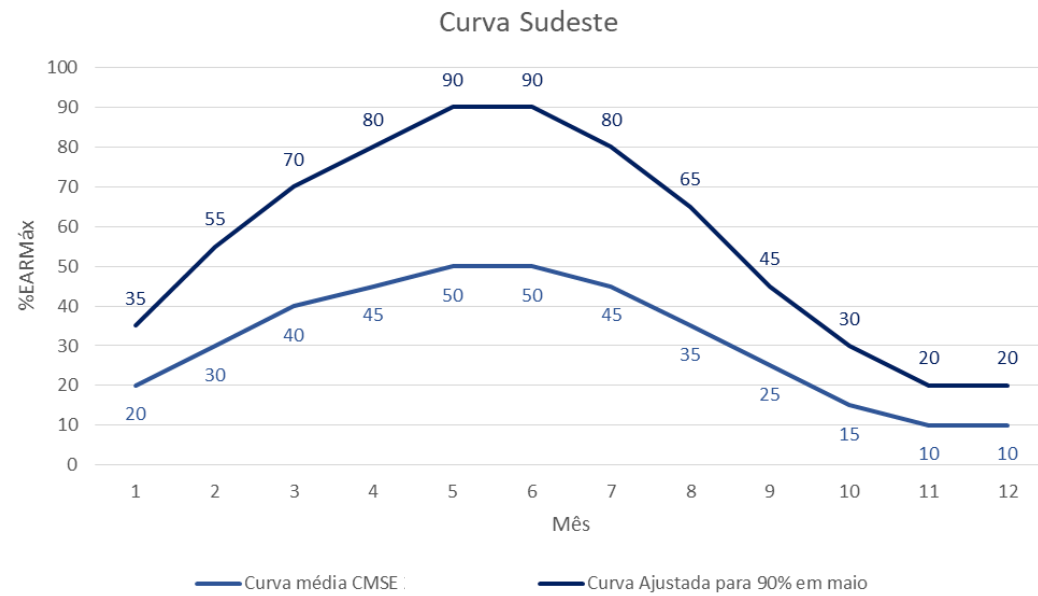
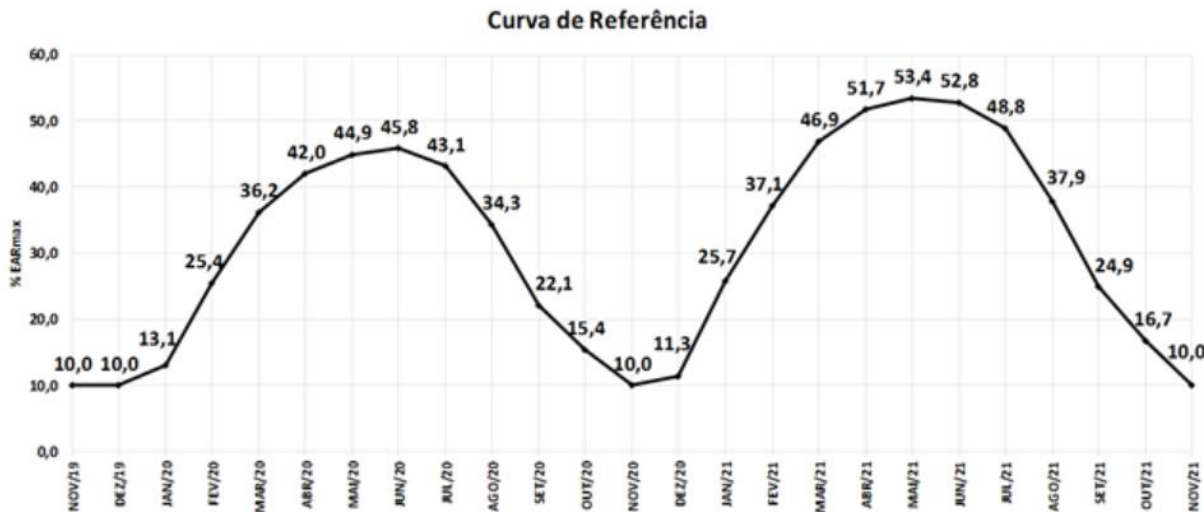


GT SIN - Média Acumulada



Ajuste de curvas considerando a curva de referência do CMSE

- Como foi preciso apertar muito os parâmetros do CVaR e na busca por assegurar níveis mínimos de armazenamento, avaliou-se 2 curvas de VMinOp sazonais.
- As curvas foram definidas com base na curva de referência do CMSE:
 1. Curva Média CMSE: Tira a média das curvas de 2020 e de 2021
 2. Curva Ajustada para *90% em maio: Curva média CMSE redimensionada proporcionalmente, de tal forma que o nível e maio seja 90%.



Média das curvas de 20 e 21 Resultam na curva média.

Execuções Totais – Tabela de métricas observadas – *Backtest* 2012-2015

Para as simulações encadeada NEWAVE-DECOMP sem VETH + VMinOP com CMSE Ajustada, o caso com CVaR (20,35) resultou armazenamento maior.

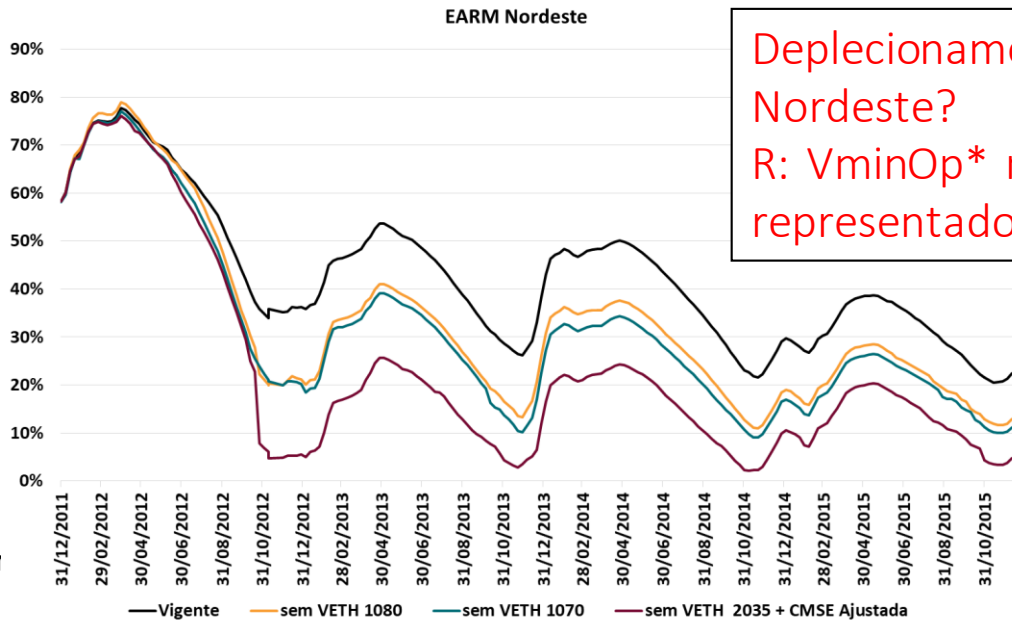
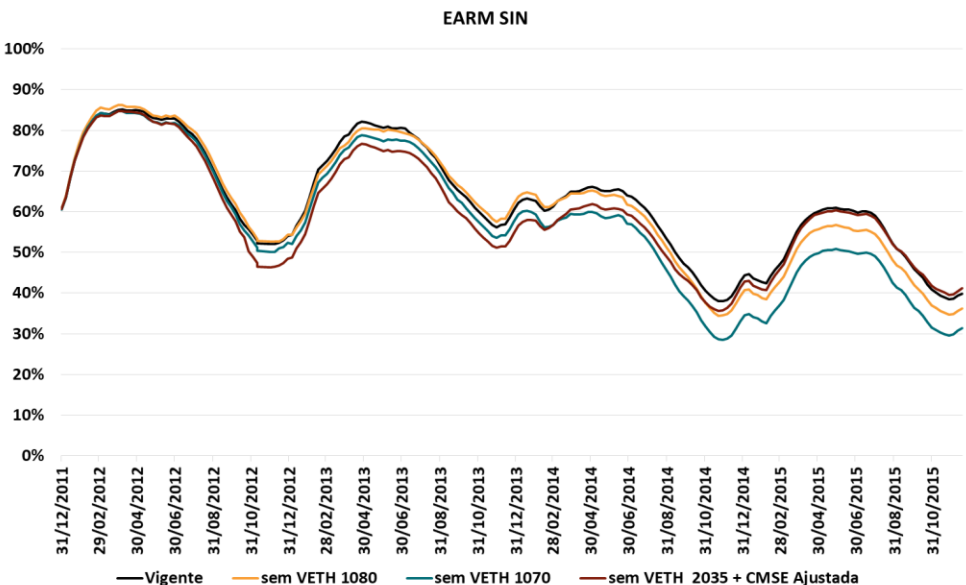
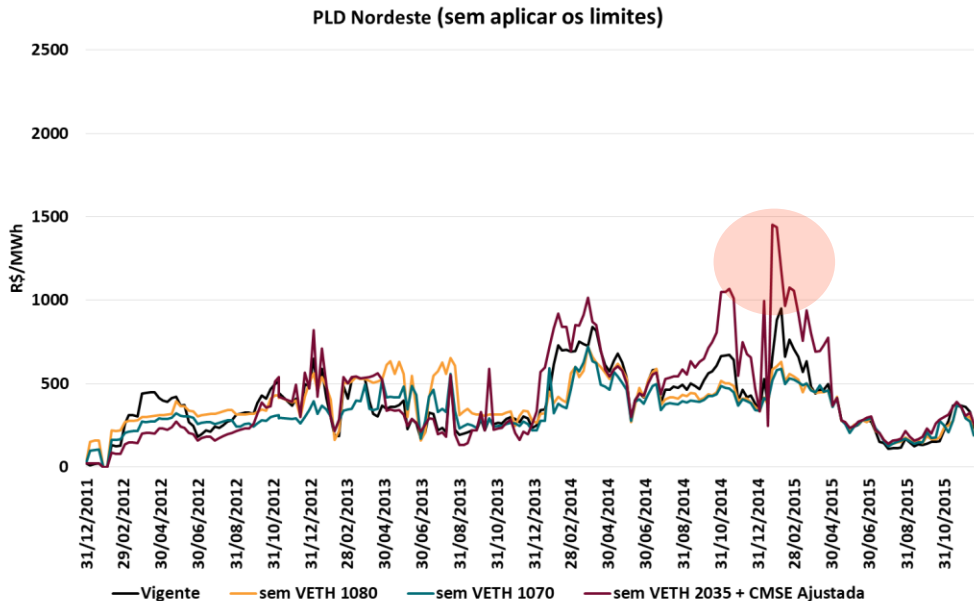
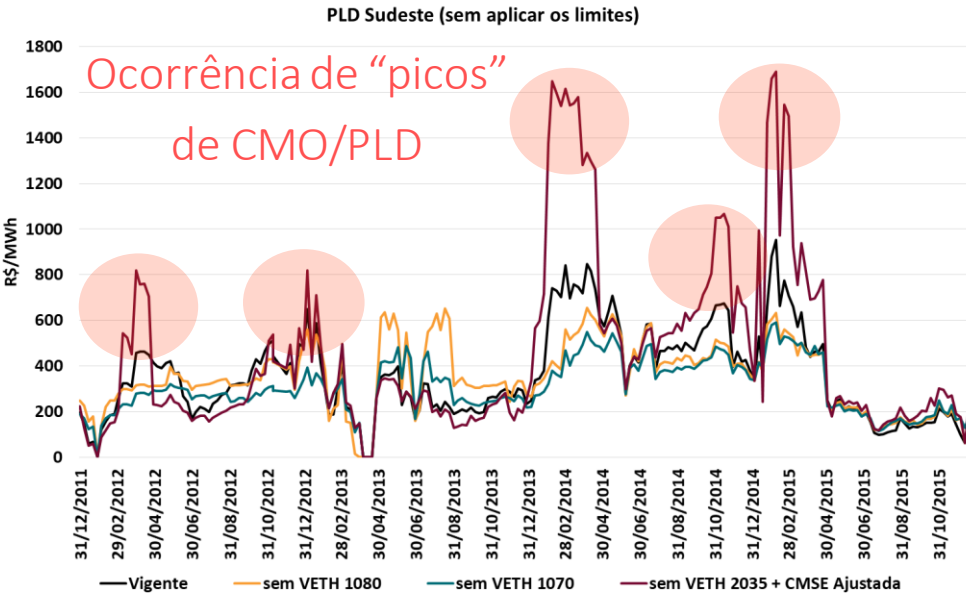
2012 a 2015

Caso	Vol. Semanal	Vol. em base Mensal	STD [R\$/MWh]	FM [25%]	FM [50%]	FM [100%]	FM [200%]	EARM SIN[%]
Vigente	23%	45%	191,86	28%	13%	4%	2%	39,8
sem VETH 1090	36%	72%	237,60	28%	9%	2%	1%	42,3
sem VETH 1080	25%	50%	139,65	18%	7%	2%	1%	36,6
sem VETH 1070	17%	33%	112,76	16%	5%	1%	0%	31,4
sem VETH 5035 + CMSE Aj.	33%	66%	384,06	27%	10%	3%	1%	37,2
sem VETH 2035 + CMSE Aj.	35%	70%	387,43	28%	11%	3%	2%	41,1
sem VETH 5050 + CMSE Aj.	44%	87%	415,90	27%	11%	3%	2%	39,2
sem VETH 2050 + CMSE Aj.	37%	75%	411,04	31%	13%	3%	2%	44,5
sem VETH 2060 + CMSE Aj.	41%	82%	439,13	33%	16%	5%	2%	46,7

Frequência é o número de vezes que a série tem uma variação maior que o limite:

$$Frequência = abs(R_t - R_{t-1}) \cdot 100/R_t$$

Backtest de janeiro/2012 a dezembro/2015 - PLD



Deplecionamento indevido no Nordeste?
R: V_{minOp}^* no DECOMP não representado explicitamente.



*Importante ressaltar que o V_{MINOP} é uma funcionalidade existente no DECOMP desde 2009, sob forma de restrições RHE.

Conclusões

- O uso do modelo sem ENA como variável de estado exige a calibração dos parâmetros de **risco do CVaR para níveis bastante restritivos, por exemplo ($\alpha=10, \lambda=90$) para a simulação 2019-2020**, quando comparado aos utilizados atualmente ($\alpha=50, \lambda=35$).
- Caso **backtest (Jan/19 – Jun/20)** com metodologia **sem VETH**:
 - Com CVaR ($\alpha=10, \lambda=90$) obteve trajetórias menos voláteis de CMO/PLD, com menor frequência de grandes variações, associadas a decisões de energia armazenada semelhantes ao modelo vigente, contudo, este resultado somente foi alcançado considerando um alto peso na aversão a risco.
- Caso **backtest (Jan/12 – Dez/15)** com metodologia **sem VETH**:
 - Com CVaR ($\alpha=10, \lambda=70$) apresentou os melhores resultados em relação à volatilidade do PLD, porém deplecionou os níveis de armazenamento do SIN ao final do horizonte quando comparado ao caso Vigente.
 - Com CVaR ($\alpha=20, \lambda=35$) e curva ajustada do CMSE de VMinOP apresentou maior volatilidade quando comparado aos outros cenários sem VETH selecionados e ao modelo Vigente. **Respondeu de forma semelhante ao caso Vigente em termos de armazenamento final do SIN.**

Recomendações

“O GT-Metodologia **recomenda a não exclusão da ENA como variável de estado no modelo NEWAVE para uso oficial**. Deve-se dar **continuidade aos estudos que buscam uma melhor representação da condição hidrológica na cadeia de modelos e identificar os fatores que causem uma eventual volatilidade não natural do CMO/PLD.**”

Trabalhos Futuros:

Na CPAMP

- **Prosseguir a investigação de potenciais causadores de volatilidades não intrínsecas** presentes na modelagem ou processo de uso dos modelos computacionais de planejamento, operação e formação de preço.
- Identificar na literatura a existência de **metodologias que permitam diminuir o peso da ENA como variável de estado na FCF**. Caso se identifique alternativas promissoras, deve-se **avaliar sua implementação e consequentemente o impacto na redução da volatilidade do CMO/PLD**.

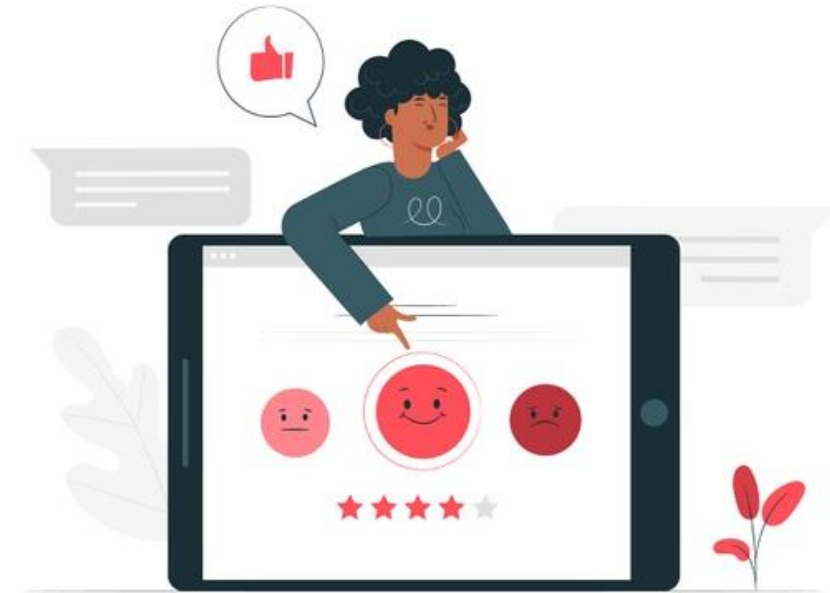
No CT PMO/PLD

- O uso do modelo **NEWAVE** com a atualização mais frequente da FCF (semanalmente).
- Inclusão de **abertura de cenários semanais** no DECOMP.
- Uso do **SMAP** para todo o horizonte do **primeiro mês operativo**.

Qual a opinião do mercado sobre a volatilidade do PLD

VOC CCEE - Pesquisa de percepção sobre a volatilidade do PLD

- Questionário disponível no link:
<https://pt.surveymonkey.com/r/VolPLD>
- A CCEE disponibilizou o questionário aos agentes em 14/12/2020
- Prazo para contribuições até sexta-feira 18/12/2020 às 18h.
Os agentes que já responderam a pesquisa não há a necessidade de respondê-la novamente.



Relatório Técnico

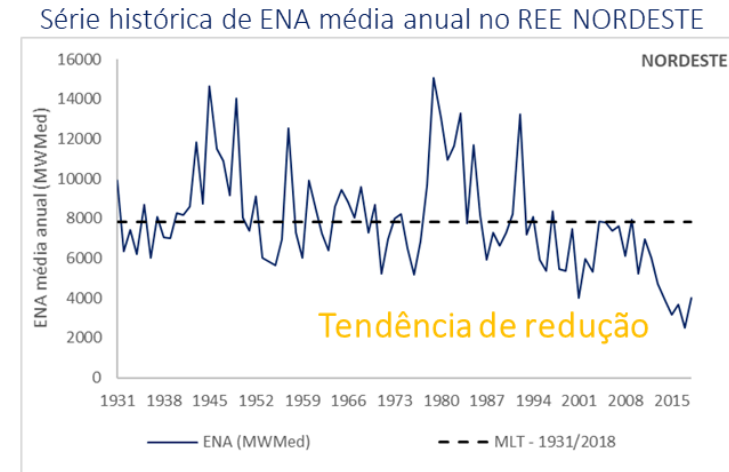
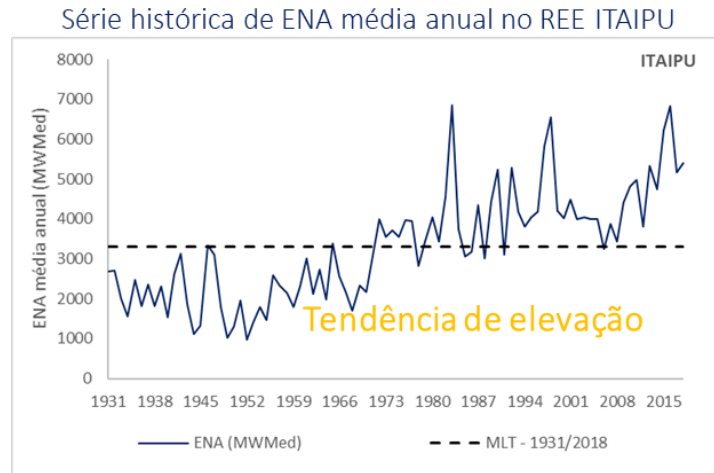
Representação Hidrológica: geração de cenários

Assessoria Técnica:



Motivação

- Alterações no comportamento hidrológico nos anos mais recentes
- Necessidade de melhor representar a hidrologia nos modelos computacionais



Proposta: Modelo PAR(p)-A

Consideração de uma parcela anual na construção de cenários hidrológicos além da tendência hidrológica dos p meses mais recentes já consideradas pelo modelo PAR(p)

Altera a geração de cenários no GEVAZP

$$\phi^m(B) \left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) + \psi^m \left(\frac{A_{t-1} - \mu_{m-1}^A}{\sigma_{m-1}^A} \right) + a_t$$

$$\phi^m(B) = (1 - \phi_1^m B - \dots - \phi_p^m B^p);$$

B é o operador defasagem no estágio t . $B Z_t = Z_{t-1}$;

Z_t é a variável aleatória do processo estocástico no estágio t ;

μ_m é a média do processo estocástico do período m correspondente ao estágio t ;

σ_m é o desvio-padrão do processo estocástico do período m correspondente ao estágio t ;

A série a_t não correlacionada temporalmente é independente de Z_t , possui média zero e variância $\sigma_a^{2(m)}$.

$$A_{t-1} = \sum_{\tau=1}^{12} \frac{Z_{t-\tau}}{12}$$

Contextualização do Modelo PAR(p) com variável explicativa “média anual” – $PAR(p)$ -A

- Desde 2013, a região Nordeste e parte da região Sudeste do Brasil estão passando por um longo período mais seco, com vazões mensais na grande maioria inferiores às médias de longo termo, enquanto parte da região Sul está passando por um período mais úmido prolongado, com vazões mensais na grande maioria superiores às médias de longo termo.
- Durante esse período, a média dos cenários sintéticos de afluições mensais gerados pelo modelo PAR(p) apresenta o prognóstico usual de retorno à média histórica em aproximadamente alguns meses, embora o regime incomum de afluições persista
- O CEPEL propôs uma extensão ao modelo estocástico PAR(p) utilizado na geração de cenários sintéticos de afluições aos modelos NEWAVE e DECOMP, por meio da inclusão de um novo termo na equação de auto-regressão de cada período sazonal, denominado de PAR(p)-A
- Os resultados obtidos mostraram que o novo modelo possibilitou representar melhor a persistência de uma tendência hidrológica incomum
- A utilização explícita das séries sintéticas de afluições aos aproveitamentos hidroelétricos, geradas pelo modelo PAR(p)-A no modelo NEWAVE implica em estender a derivação dos cortes de Benders do algoritmo de PDDE, assim como a incorporação da extensão dos cortes de Benders que compõem a função de custo futuro no modelo DECOMP

Modelo PAR(p) com variável explicativa “média anual” – PAR(p)-A

- Modelo PAR(p)

$$\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \phi_1^m \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \phi_2^m \left(\frac{Z_{t-2} - \mu_{m-2}}{\sigma_{m-2}}\right) + \dots + \phi_{\rho_m}^m \left(\frac{Z_{t-\rho_m} - \mu_{m-\rho_m}}{\sigma_{m-\rho_m}}\right) + a_t$$

- Nova variável explicativa introduzida no modelo: afluência média dos últimos 12 meses, A_{t-1}

$$A_{t-1} = \sum_{\tau=1}^{12} \frac{Z_{t-\tau}}{12}$$

- Modelo PAR(p)-A12

$$\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \phi_1^m \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \phi_2^m \left(\frac{Z_{t-2} - \mu_{m-2}}{\sigma_{m-2}}\right) + \dots + \phi_{\rho_m}^m \left(\frac{Z_{t-\rho_m} - \mu_{m-\rho_m}}{\sigma_{m-\rho_m}}\right) + \psi^m \left(\frac{A_{t-1} - \mu_{m-1}^A}{\sigma_{m-1}^A}\right) + a_t$$

Modelo PAR(p) com variável explicativa “média anual” – PAR(p)-A

- Seleção da ordem do modelo em cada mês do horizonte de planejamento

- ✓ Processo atual: análise da função de auto-correlação parcial (FACP)

$$FACP = E \left[\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) \left(\frac{Z_{t-k} - \mu_{m-k}}{\sigma_{m-k}} \right) \mid Z_{t-1}, \dots, Z_{t-k+1} \right]$$

- ✓ Processo para o modelo PAR(p)-A: a FACP foi derivada a fim de incorporar a nova parcela A_{t-1}

$$FACP = E \left[\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) \left(\frac{Z_{t-k} - \mu_{m-k}}{\sigma_{m-k}} \right) \mid Z_{t-1}, \dots, Z_{t-k+1}, A_{t-1} \right]$$

- Estimação dos parâmetros

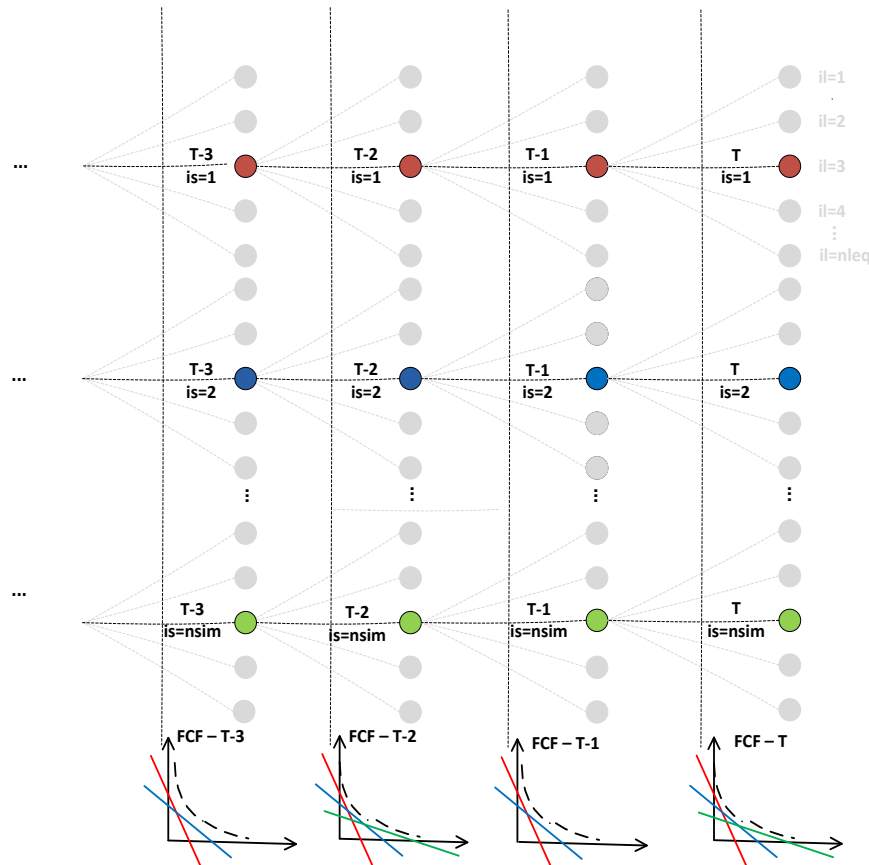
- ✓ Processo atual: sistema de equações de Yule-Walker em cada período do horizonte de planejamento (FAC)

✓ PAR(p)-A: a FAC foi estendida a fim de se obter o parâmetro ψ^m

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho^{m-1}(1) & \rho^{m-1}(2) & \dots & \rho^{m-1}(p_m - 1) & \rho_{Z,A}^{m-1}(0) \\ \rho^{m-1}(1) & 1 & \rho^{m-2}(1) & \dots & \rho^{m-2}(p_m - 2) & \rho_{Z,A}^{m-1}(1) \\ \rho^{m-1}(2) & \rho^{m-2}(1) & 1 & \dots & \rho^{m-3}(p_m - 3) & \rho_{Z,A}^{m-1}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho^{m-1}(p_m - 1) & \rho^{m-2}(p_m - 2) & \rho^{m-3}(p_m - 3) & \dots & 1 & \rho_{Z,A}^{m-1}(p - 1) \\ \rho_{Z,A}^{m-1}(0) & \rho_{Z,A}^{m-1}(1) & \rho_{Z,A}^{m-1}(2) & \dots & \rho_{Z,A}^{m-1}(p - 1) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_1^m \\ \phi_2^m \\ \phi_3^m \\ \vdots \\ \phi_p^m \\ \psi^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho^m(1) \\ \rho^m(2) \\ \rho^m(3) \\ \vdots \\ \rho^m(p) \\ \rho_{Z,A}^{m-1}(-1) \end{bmatrix}$$

Estratégia de Solução do problema Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos modelo NEWAVE

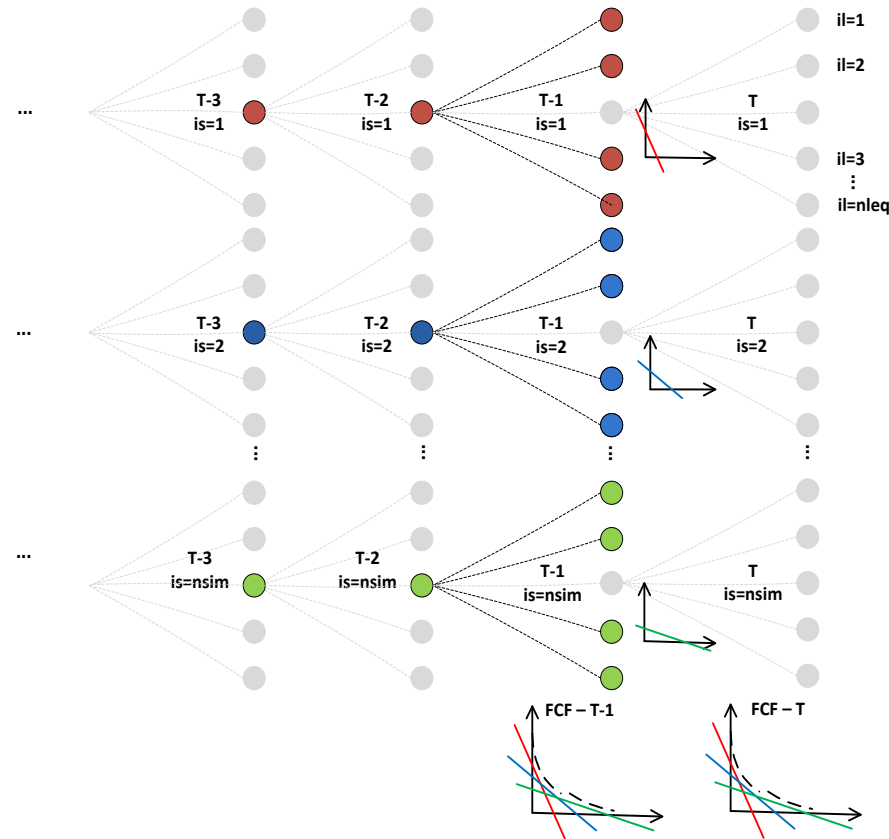
- Dado que não é possível percorrer a árvore completa de cenários de afluições, o algoritmo de PDDE é aplicado para resolver o problema
- A estratégia de solução consiste em percorrer uma sub-árvore de cenários de afluições, que é escolhida da distribuição original da variável aleatória, iterativamente através de:



- ✓ Simulação *forward*, do estágio $t=1$ até $t=T$ percorrendo toda a sub-árvore (totalizando $nsim$ cenários), com a finalidade de gerar novos estados da variável de estado armazenamento, para os quais a função de custo futuro será avaliada e novos cortes de Benders construídos na próxima recursão *backward*.

Estratégia de Solução do problema Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos modelo NEWAVE

- ✓ Recursão *backward*, do estágio $t=T$ até $t=1$, os cortes de Benders que compõem a função de custo futuro são construídos para todos os nós da sub-árvore resultantes da última simulação *forward*.
- nleq problemas relacionados a possíveis realizações da variável aleatória do estágio t são resolvidos para cada um dos nós da sub-árvore.



Estratégia de Solução do problema Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos modelo NEWAVE

✓ Recursão *backward*

- ✓ As variáveis duais associadas a esses subproblemas de programação linear são utilizadas para construir um corte de Benders (conjunto de restrições lineares multivariadas que representam a função de custo futuro), produzindo um limite inferior do custo total esperado de operação em todo o horizonte de estudo (ZINF) no valor do estado associado ao nó da sub-árvore em questão
- ✓ Os cortes de Benders são funções das variáveis de estado: nível de armazenamento, afluências mensais passadas
- ✓ Modelo PAR(p)-A: a média das 12 últimas afluências passa a ser variável de estado e, conseqüentemente, os cortes de Benders passam também a ser função da nova variável

Com os multiplicadores de Lagrange associados as restrições do problema foram calculadas a derivada da função objetivo em relação a nova variável explicativa

Principais abordagens do Relatório Técnico

1ª Consulta Pública:

- Nova metodologia de geração de cenários: PAR(p)-A (Modelo Auto-Regressivo Periódico Anual)
 - Relatório Técnico CEPEL 1416/2020
 - Relatório Técnico CEPEL 2002/2020
- Modelo ajustado: PAR(p) e PAR(p)-A
 - Autocorrelações parciais
 - Ordem (p)
 - Coeficientes ϕ e ψ : magnitudes, sinais e possíveis impactos
- Cenários de vazões e ENAs: casos de PMO/PLD e PDE/GF
- Política operativa e principais efeitos no planejamento, operação e cálculo do PLD

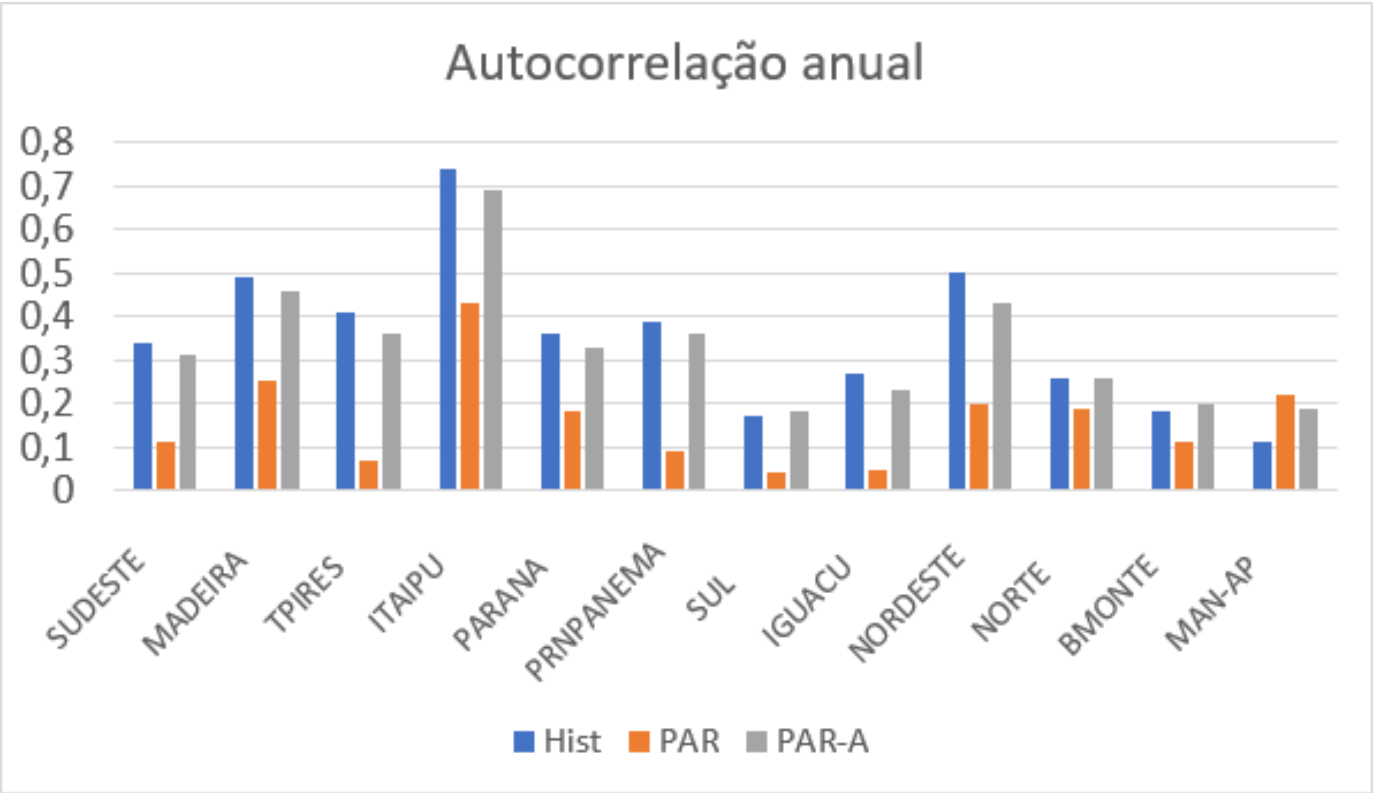
2ª Consulta Pública:

- *Backtests* de janeiro/2012 a dezembro/2015

Geração de cenários de vazões e ENA

- A autocorrelação anual com o PAR(p)-A se aproxima mais do histórico do que o modelo vigente PAR(p)

PMO Maio/2019



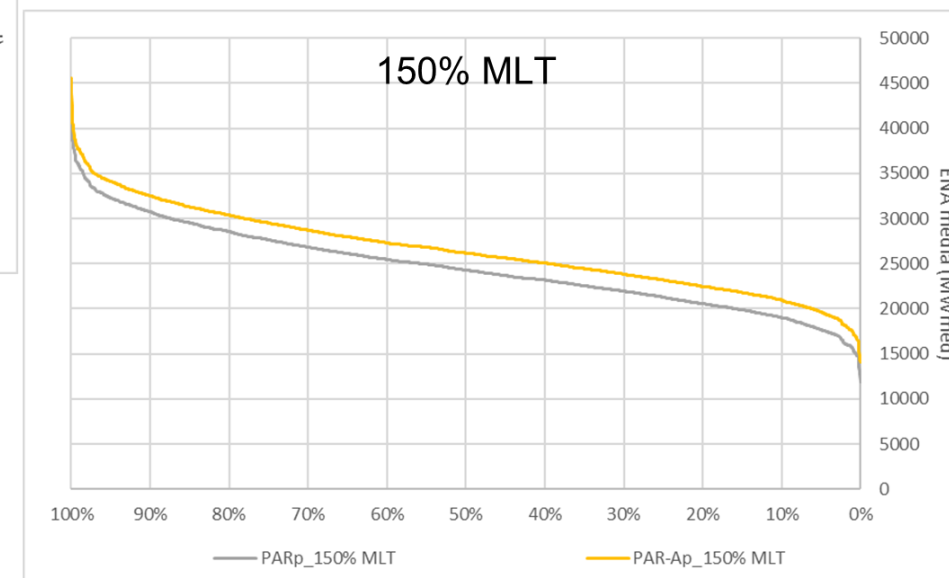
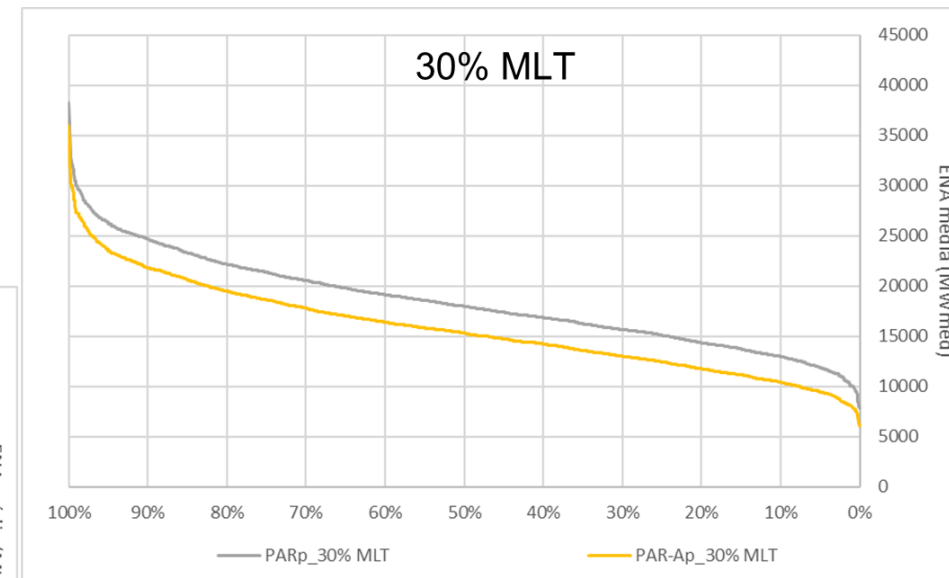
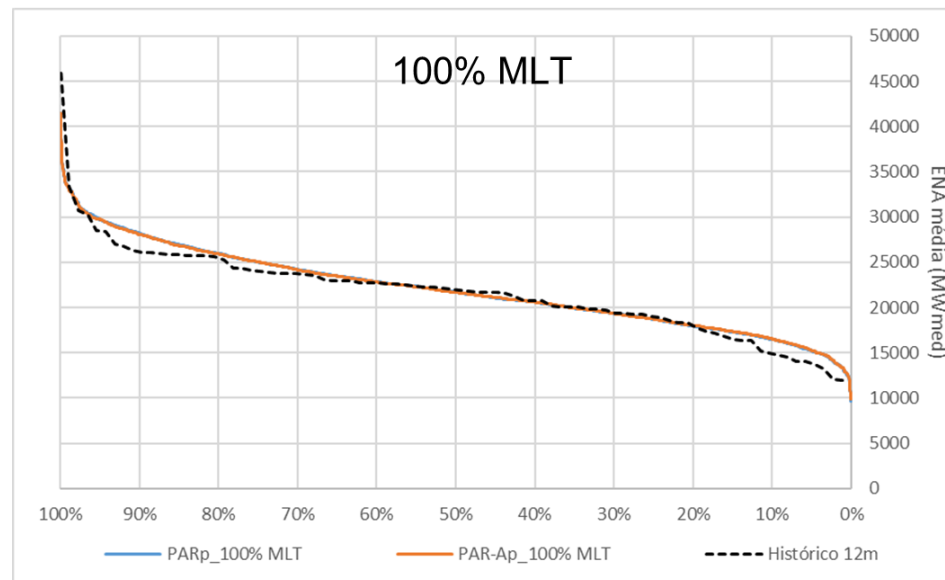
A metodologia **PAR(p)-A** permite a geração de cenários de afluências que melhor representam a hidrologia recente

Geração de cenários de vazões e ENA

REE Paraná:

- Média dos 12 primeiros meses – sensibilidade na tendência hidrológica recente
 - 100% MLT em todos os REEs
 - 30% MLT em todos os REEs
 - 150% MLT em todos os REEs

PMO Dezembro/2019

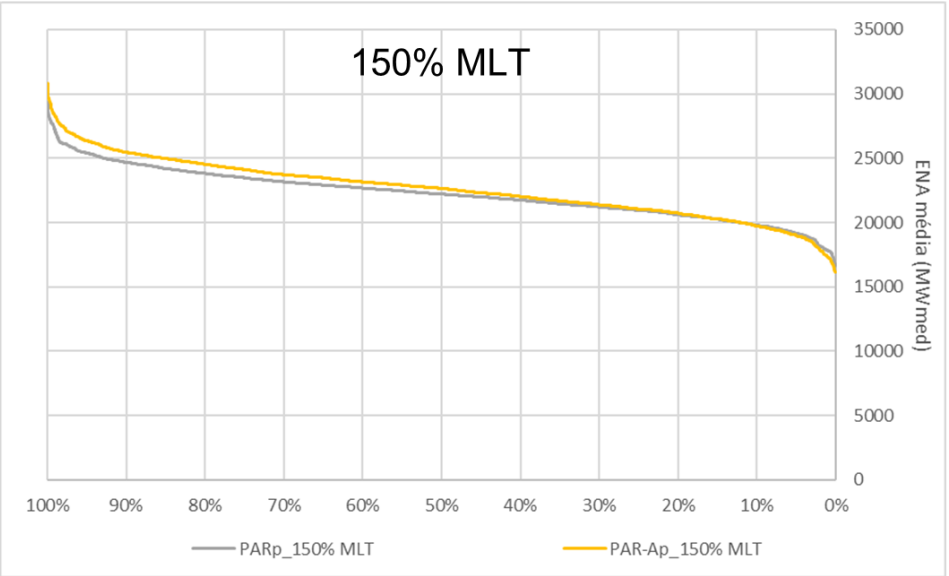
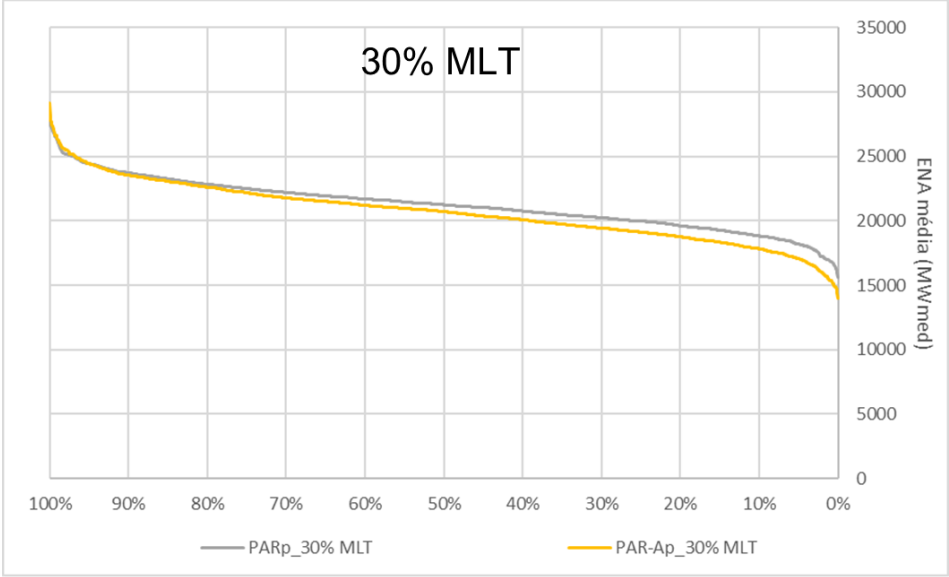
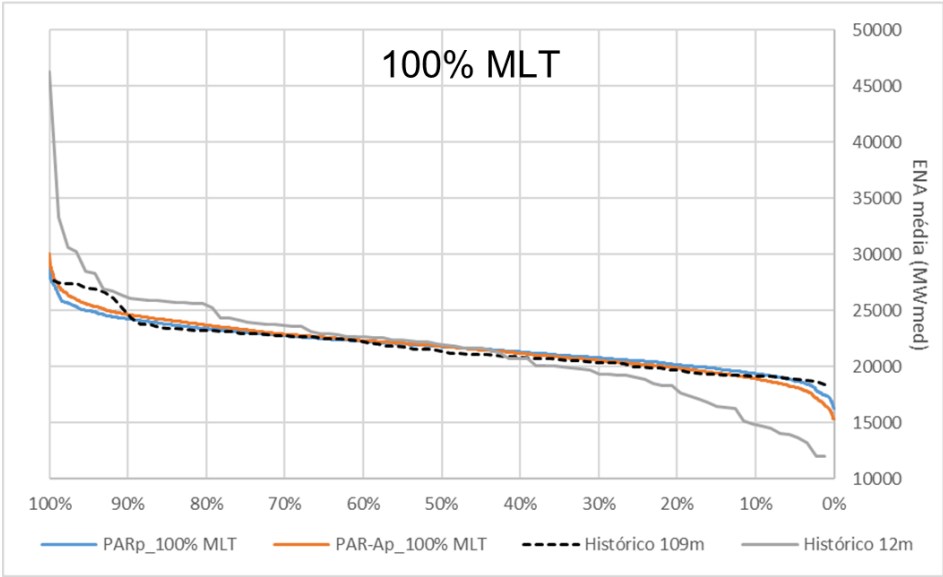


Geração de cenários de vazões e ENA

REE Paraná:

- Média dos 109 meses – sensibilidade na tendência hidrológica recente
 - 100% MLT em todos os REEs
 - 30% MLT em todos os REEs
 - 150% MLT em todos os REEs

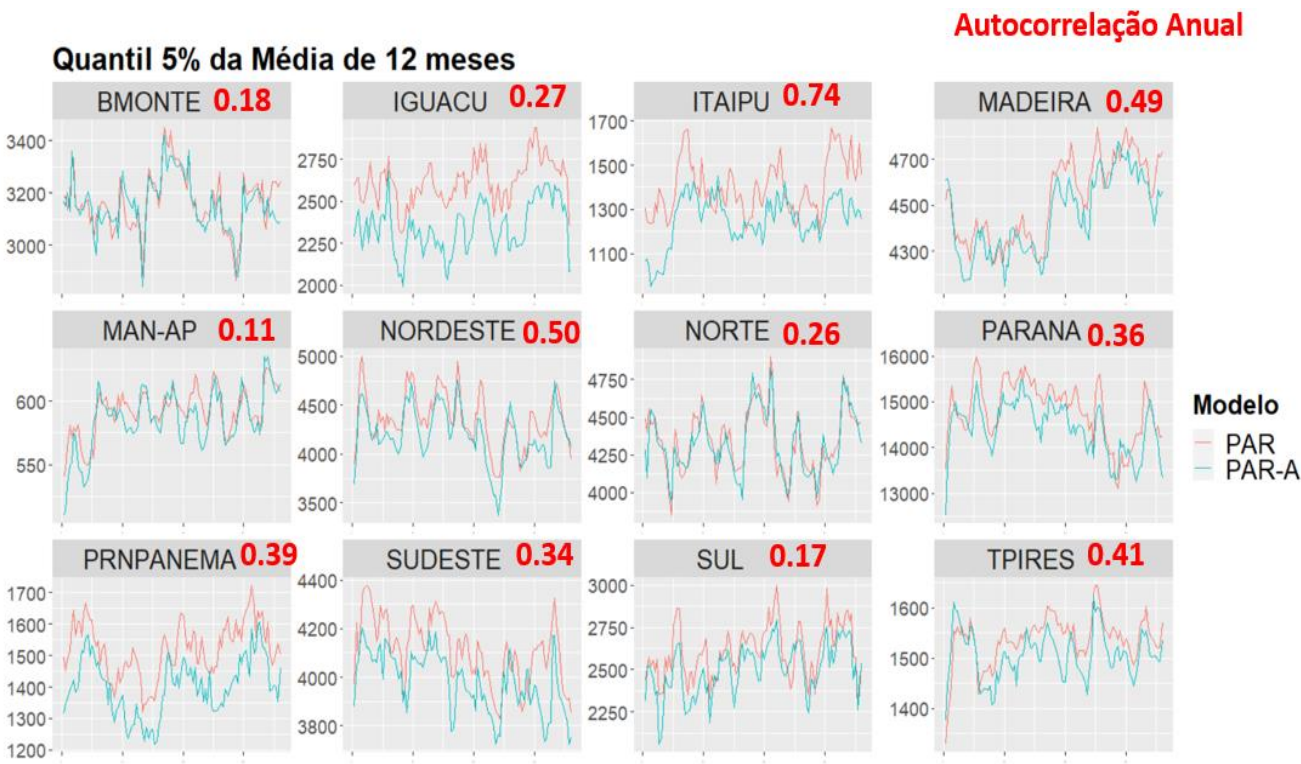
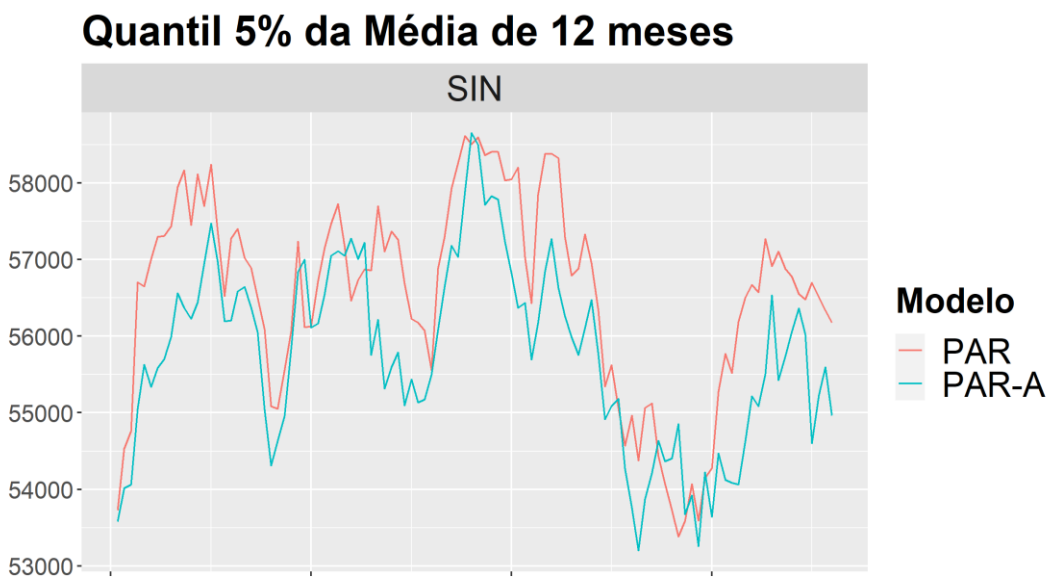
PMO Dezembro/2019



Geração de cenários de vazões e ENA

- Análise das sequências negativas

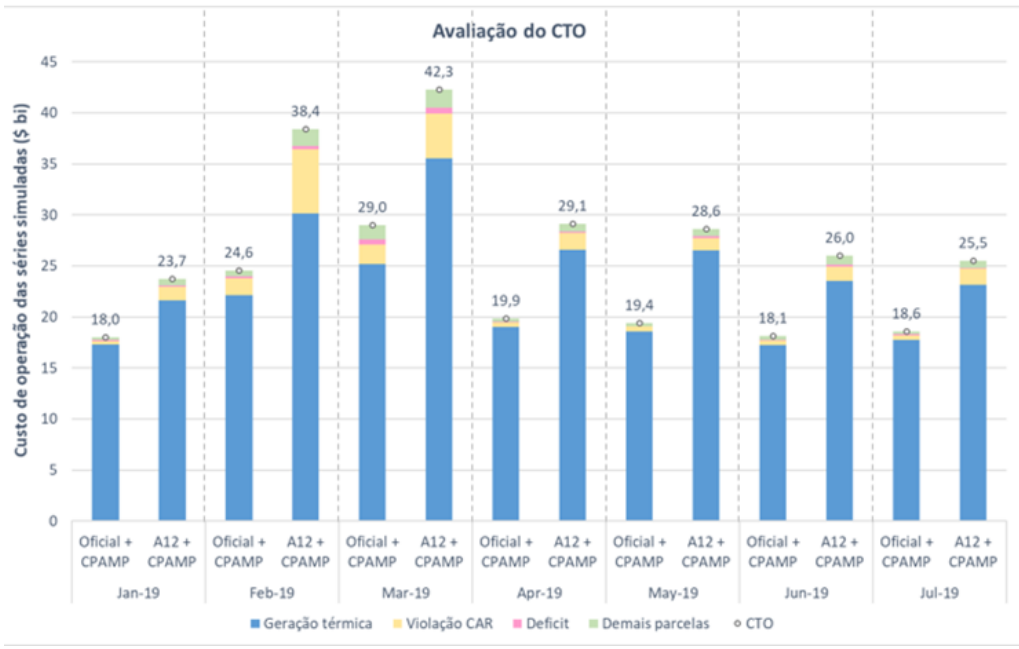
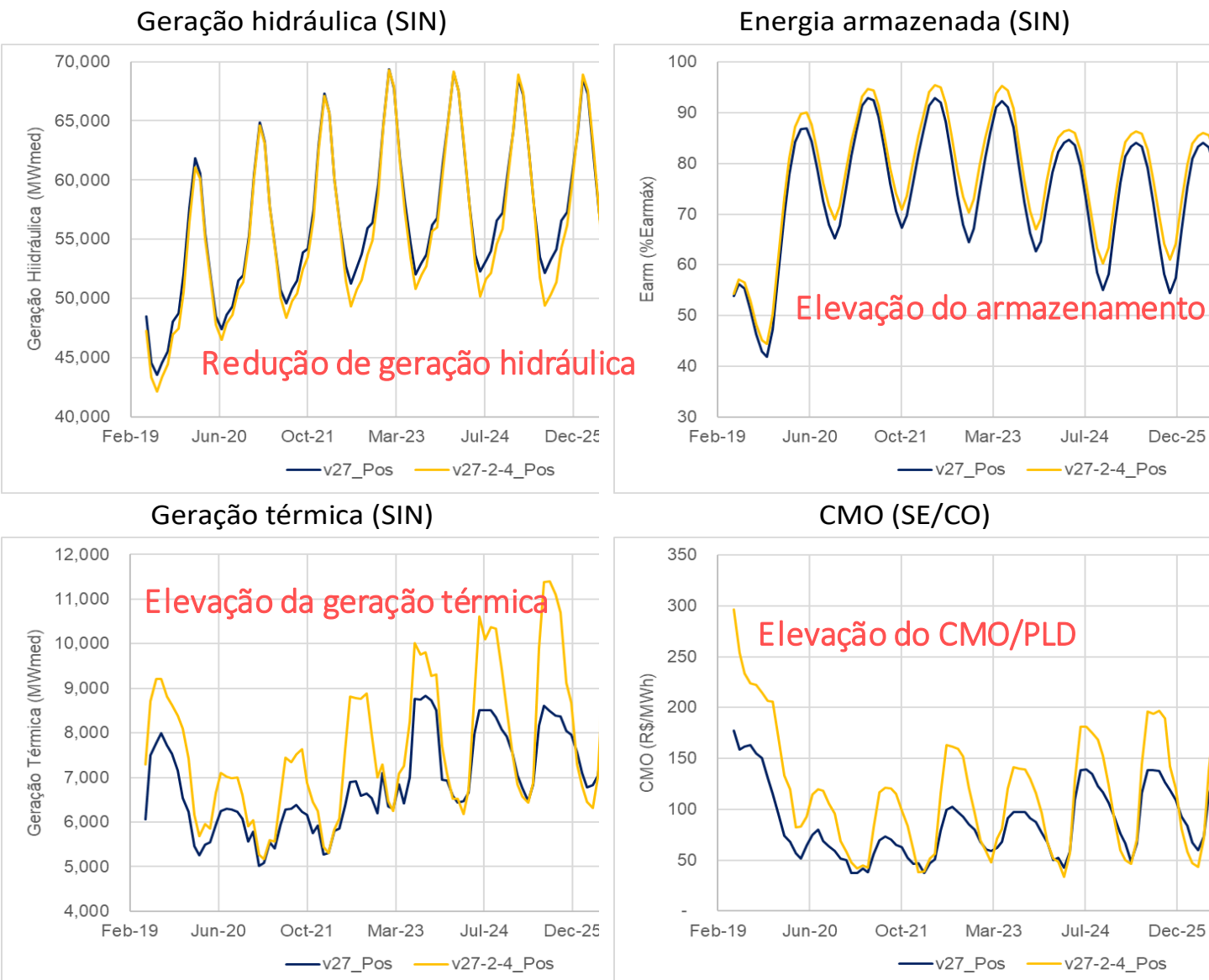
PMO Maio/2019



Política operativa e principais efeitos nas variáveis de mercado

PMO Maio/2019

PMO Janeiro a Julho/2019



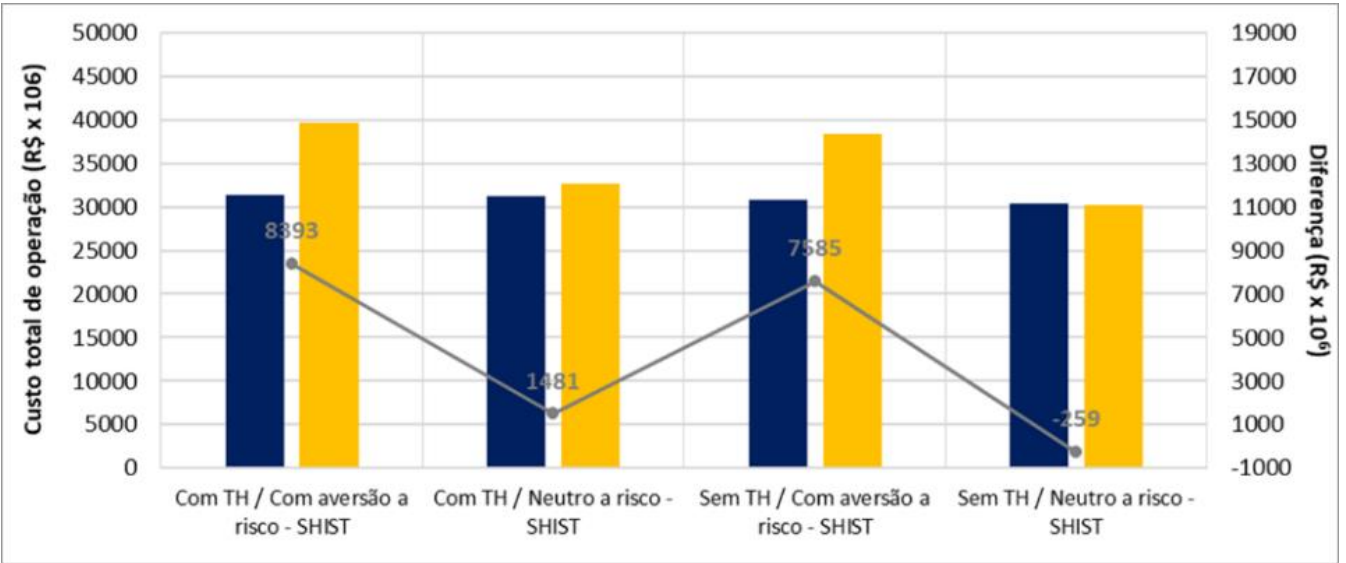
Custos de operação mais elevados ao se empregar o PAR(p)-A

Política operativa e principais efeitos nas variáveis de mercado

Sensibilidades na política operativa e simulação final

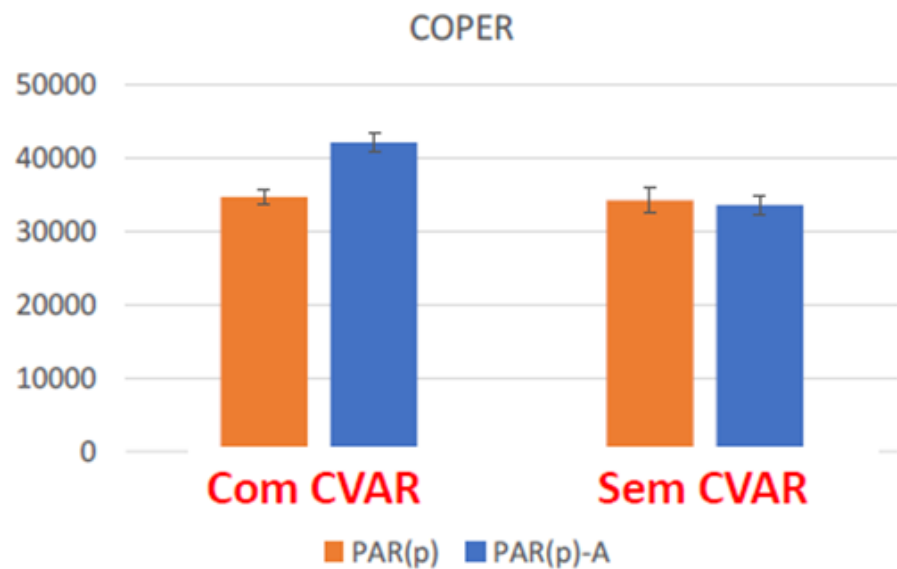
- Simulação final com série histórica:

PMO Dezembro/2019



- Política operativa sem tendência hidrológica + simulação final com série histórica:

PMO Maio/2019

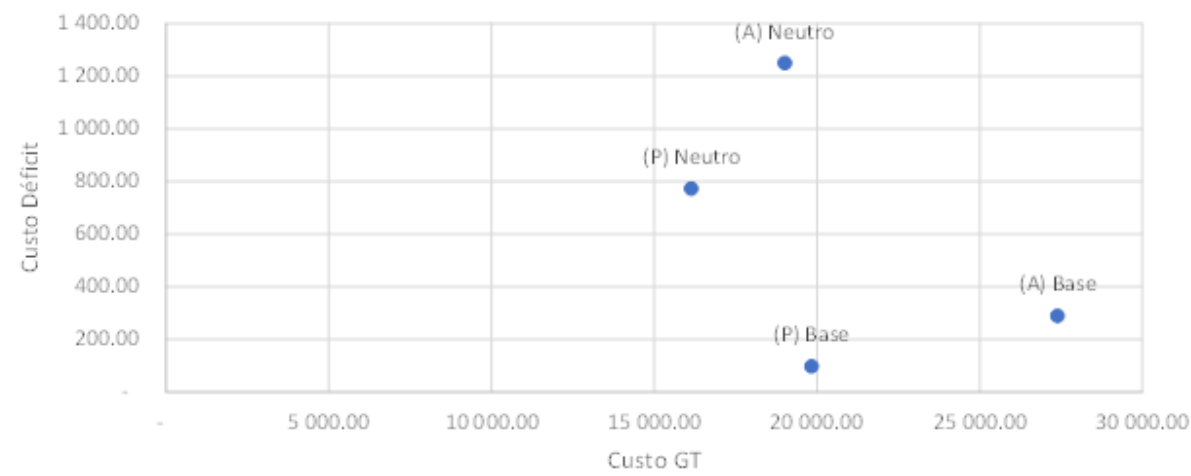


Política operativa e principais efeitos nas variáveis de mercado

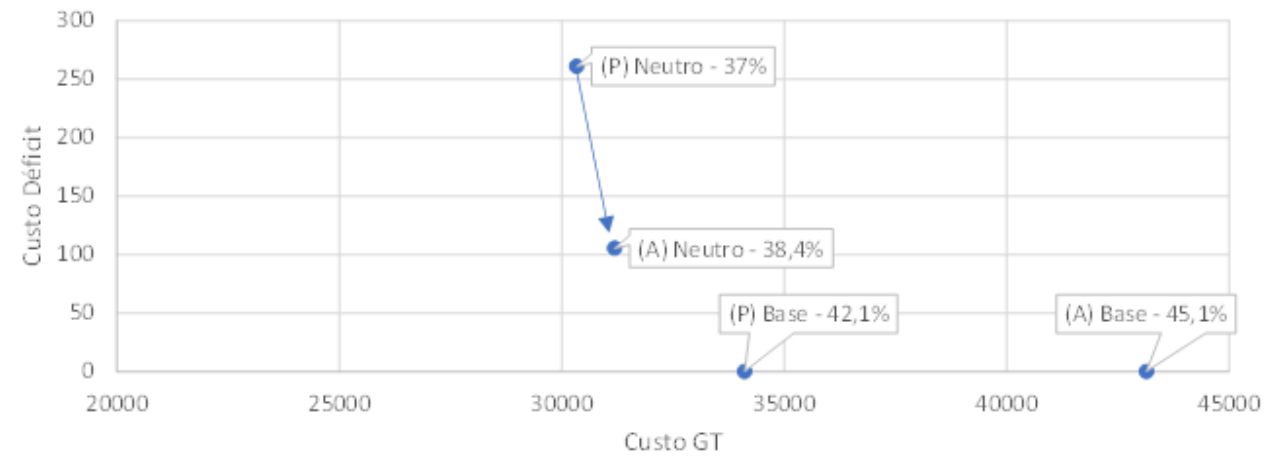
Sensibilidades na política operativa e simulação final

PMO Maio/2019

CDEF x CTERM (SSINT)
PMO Maio/2019 - Par(p)-A x Par(p)



CDEF x CTERM (SHIST)
PMO Maio/2019 - Par(p)-A x Par(p)

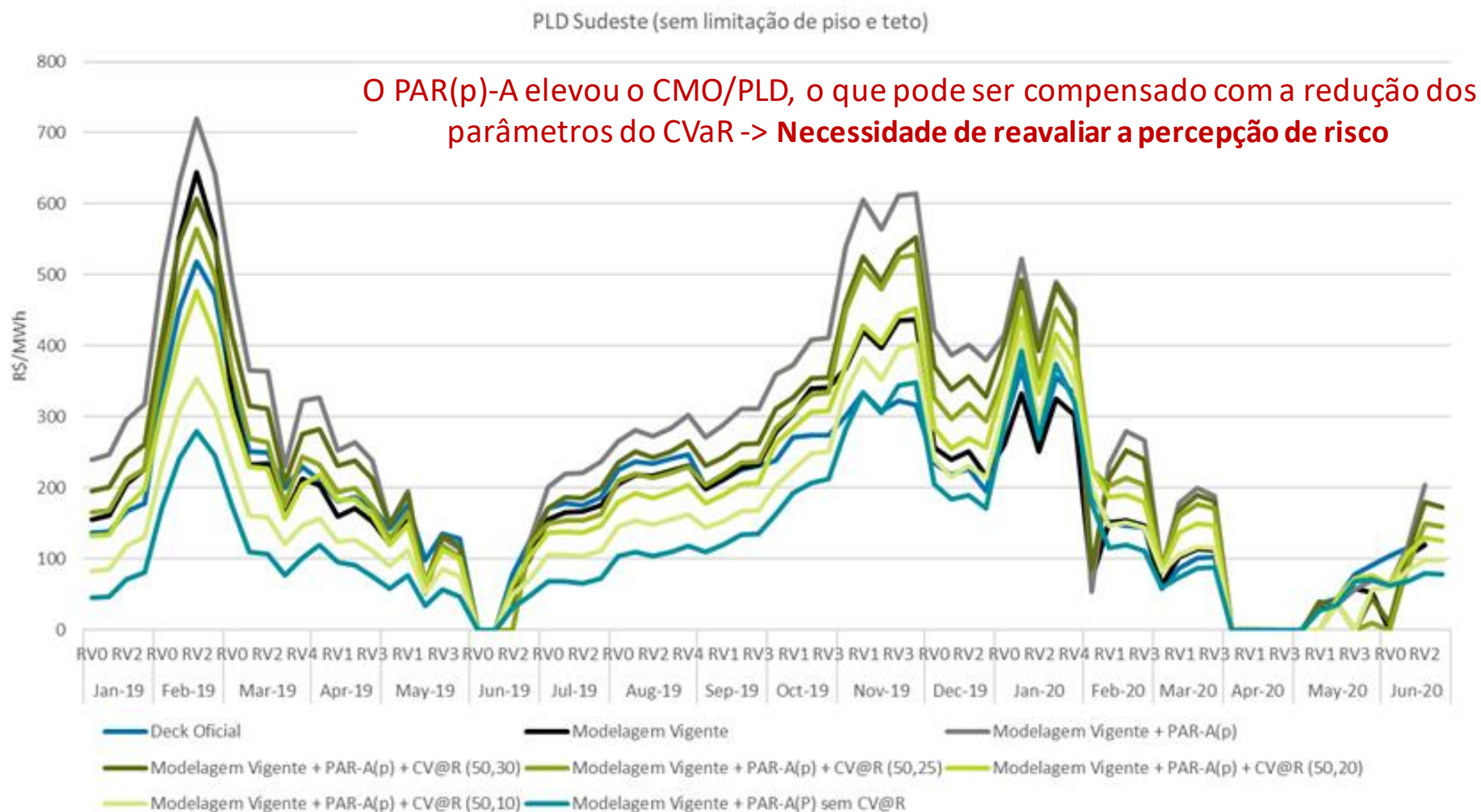


Ao lado do nome do caso encontra-se o percentual de energia armazenada do SIN em novembro de 2019

Backtest preliminar

Encadeamento de NEWAVE-DECOMP

- Janeiro/2019 a Junho/2020



Conclusões

Conclusões
A metodologia PAR(p)-A permite a geração de cenários de afluências que melhor representam a hidrologia recente .
O modelo PAR(p)-A gera cenários sintéticos mais severos que o PAR(p).
Devido à maior persistência de cenários críticos , os custos totais de operação com o PAR(p)-A tendem a se eleva r em relação aos do PAR(p).
No geral, a média dos cenários de CMO empregando-se o PAR(p)-A tende a apresentar maior amplitude (sazonalidade mais evidente) que o modelo PAR(p).
No <i>backtest</i> apresentado para o período de janeiro/2019 a junho/2020 demonstra-se maior geração térmica com o PAR(p)-A do que na metodologia vigente e, consequentemente, maiores valores de CMO/PLD em todo o horizonte.
Deverá ser realizada uma reavaliação dos parâmetros do CVaR, em conjunto com a adoção das demais metodologias estudadas neste ciclo de trabalho.

Recomendações

“O GT Metodologia recomenda a continuidade do estudo de se implementar a metodologia PAR(p)-A na geração de cenários e construção da FCF nos modelos computacionais. Os resultados ora apresentados são promissores e deverão compor importante parcela dos resultados a serem consolidados para a 2ª Consulta Pública.”

Desenvolvimentos futuros
Incluir nos relatórios e/ou manuais de metodologia como é considerada a mudança de configuração durante o ajuste do modelo ao se considerar o PAR(p)-A.
Incluir nos relatórios e/ou metodologia de usuário como é realizada a redução automática da ordem ao se considerar o PAR(p)-A.
Definir um critério de significância do coeficiente psi (ψ) para consideração da parcela anual na geração de cenários pelo modelo PAR(p)-A.
Aplicar o mesmo processo de derivação da FACP do PAR(p)-A à FACP do modelo PAR(p).
Analisar outros aprimoramentos no modelo , uma vez que em determinados casos não houve sequências de ENAs acumuladas piores do que as sequências observadas no histórico.

Relatório Técnico

Produtibilidade:

Aprimoramento na representação da produtividade hidroelétrica e perdas hidráulicas no DECOMP

Assessoria Técnica:



Sumário do Relatório

Comissão Permanente para Análise
de Metodologias e Programas
Computacionais do Setor Elétrico

GT Metodologia

APRIMORAMENTO NA REPRESENTAÇÃO
DA PRODUTIBILIDADE HIDROELÉTRICA E
PERDAS HIDRÁULICAS NO PLANEJAMENTO
DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DE CURTO
PRAZO

Relatório Técnico da GT Metodologia da CPAMP – nº 3333-2020 de 30 de outubro de 2020

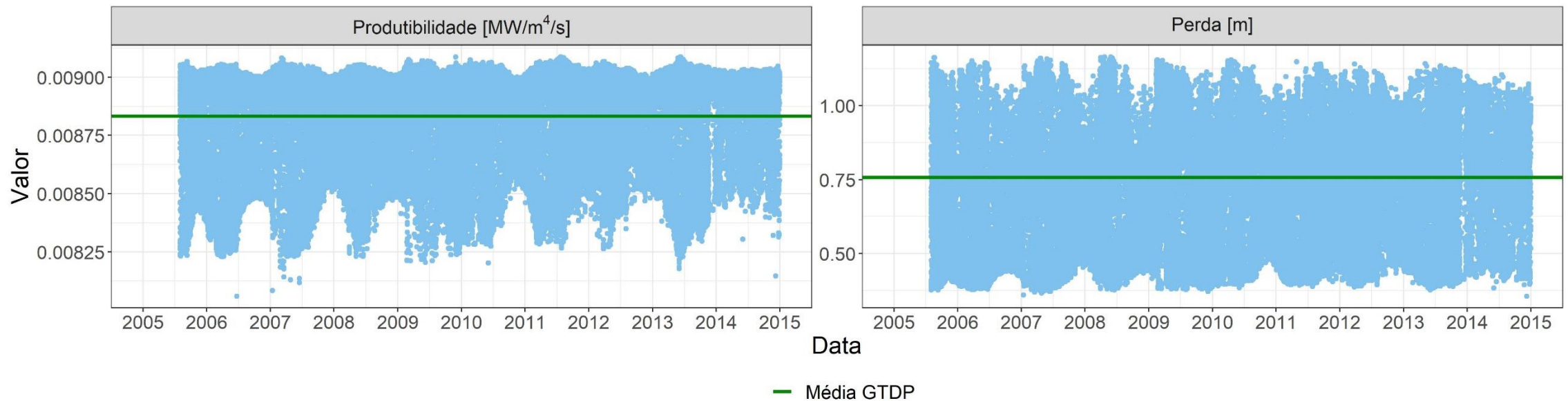
Apoio técnico



1. Apresentação
2. Introdução
3. Dados Utilizados
4. Metodologia de Representação Variável
 - I. Modelos Aditivos Generalizados
 - II. Determinação das grades
5. Incorporação das produtibilidades e perdas variáveis no cálculo da função de produção exata
6. Avaliação preliminar da operação de curto prazo
7. Conclusões

Resultados do GTDP

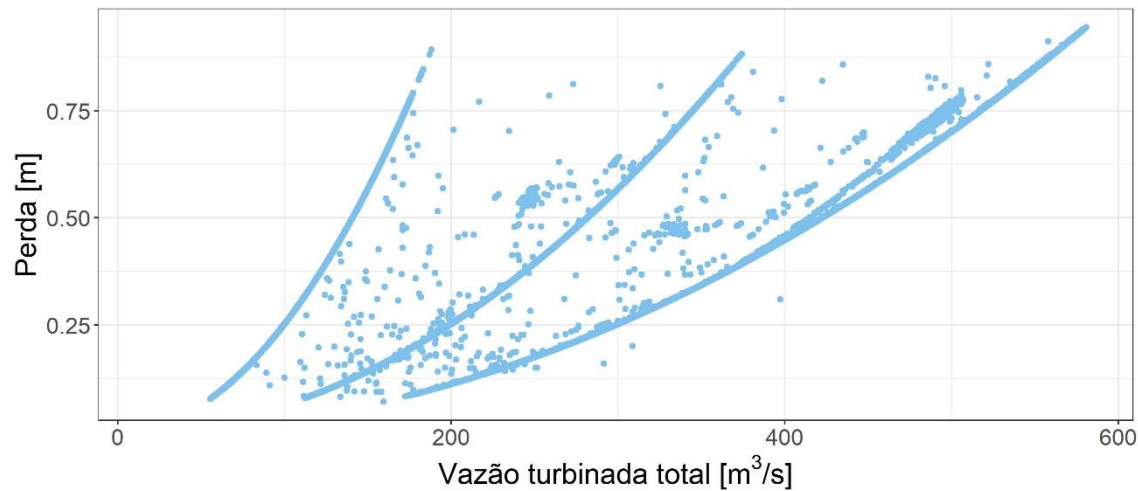
- Em 2019 foi concluído o primeiro ciclo do GTDP, um grupo de trabalho destinado a recalcular perdas e produtibilidades médias das hidrelétricas com base em dados operativos históricos e características construtivas das mesma
- O primeiro ciclo contemplou históricos em base horária por máquina de 2005 a 2014 de 95 usinas do SIN
- Os valores de perdas hidráulicas e produtividade são calculados por máquina em base horária e então agregados, via média ponderada pela energia gerada por cada máquina, em valores equivalentes da usina ao longo do histórico completo



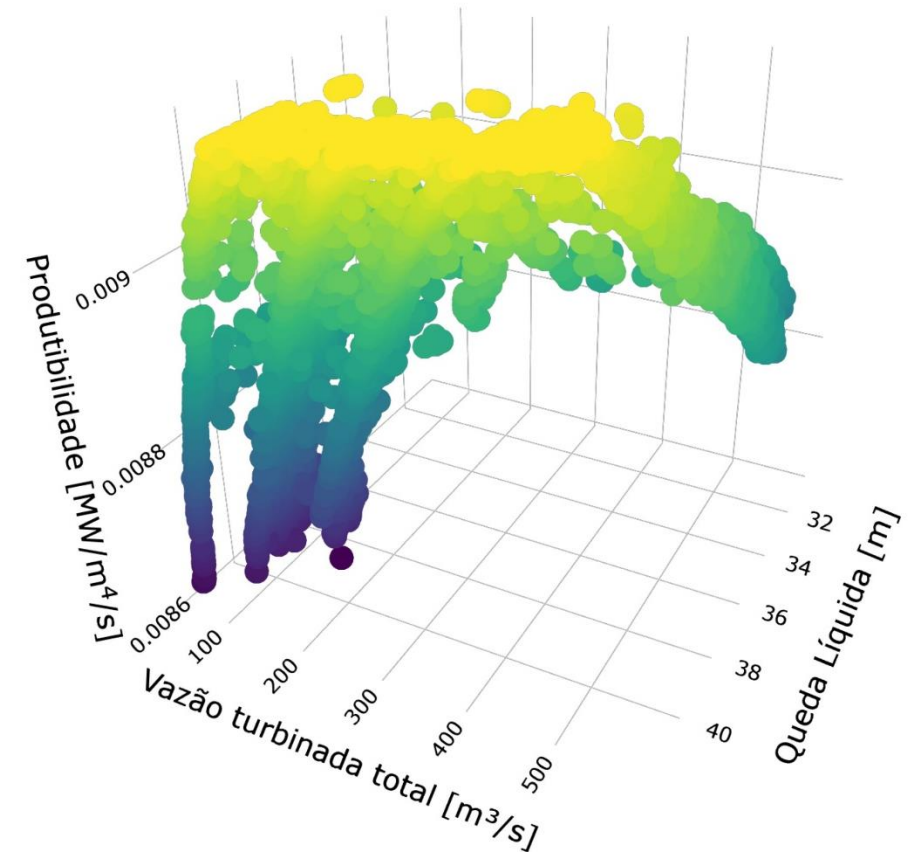
Comportamento por máquina e por usina

- A altura de perda hidráulica observada por máquina é proporcional ao quadrado de sua vazão turbinada, segundo a equação

$$H_{perda} = k \times Q^2$$

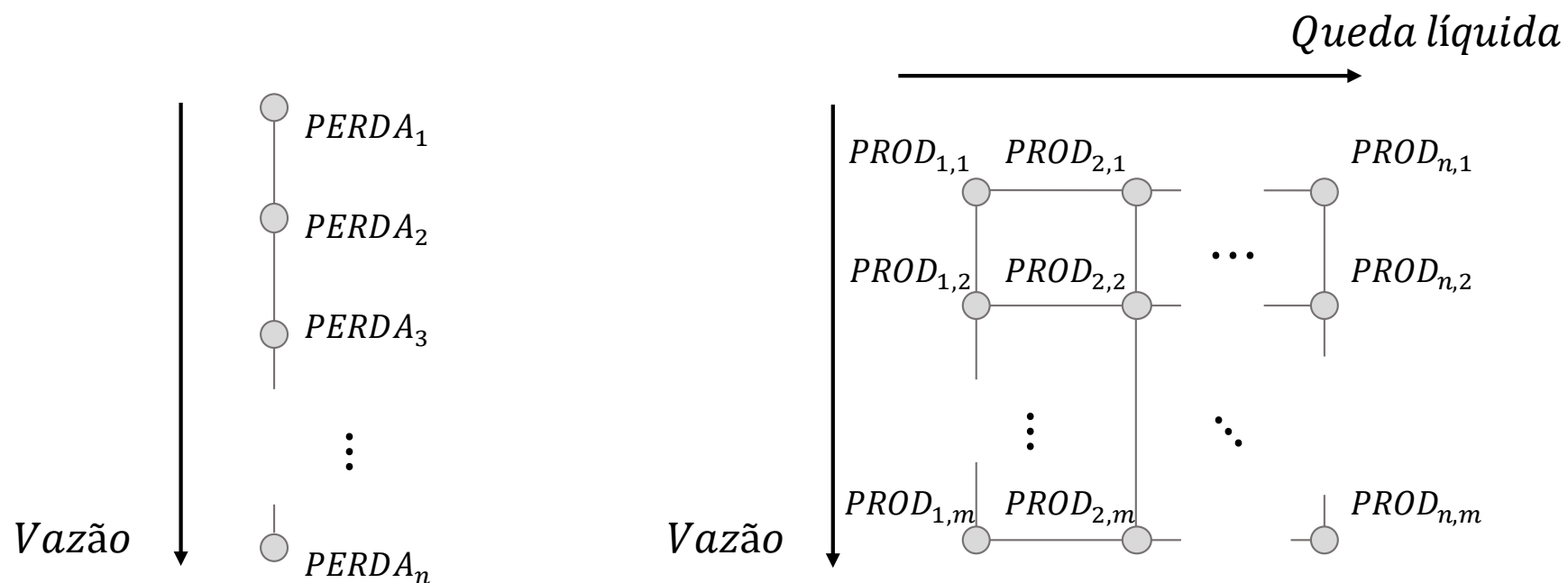


- Ao contrário das perdas, a produtividade é predominantemente determinada por dois fatores:
 - Vazão turbinada
 - Queda líquida



Representação através de grades

- A observação das dispersões deixa evidente a impossibilidade de representar estas grandezas através dos dados de cadastro
- A abordagem adotada consiste na representação destes valores através de grades



Médias semanais

- O resultado do DECOMP corresponde a valores médios semanais, por patamar de carga
- Apesar da “tentação” em ajustar um modelo para os dados horários (curva instantânea), pela forma mais definida da curva e a maior quantidade de pontos, seu “fitting” para os dados médios semanais não é tão adequado quanto o ajuste da curva média
 - ✓ As curvas instantâneas de funções convexas irão sempre subestimar os valores médios
 - ✓ As curvas instantâneas de funções côncavas irão sempre sobrestimar os valores médios
- Como há menos pontos referentes a dados semanais para o ajustes, regiões “faltantes” podem ser preenchidas com dados horários
- Esta distinção entre ajustes por dados horários ou dados médios também é aplicada em outros contextos, como as previsões de cargas semanais (PrevCargaPMO) e as previsões de cargas horários (PrevCargaDESSEM)
- O ajuste por dados médios tenderia a reduzir o “descolamento” entre os modelos DECOMP e DESSEM, pois a modelagem do DECOMP estaria vendo, de forma indireta, a variabilidade horária
- O ajuste por dados horários (curva instantânea) torna-se mais adequado para o DESSEM
- Exemplo de trabalho que considera valores médios semanais na modelagem dos dados da função de produção:

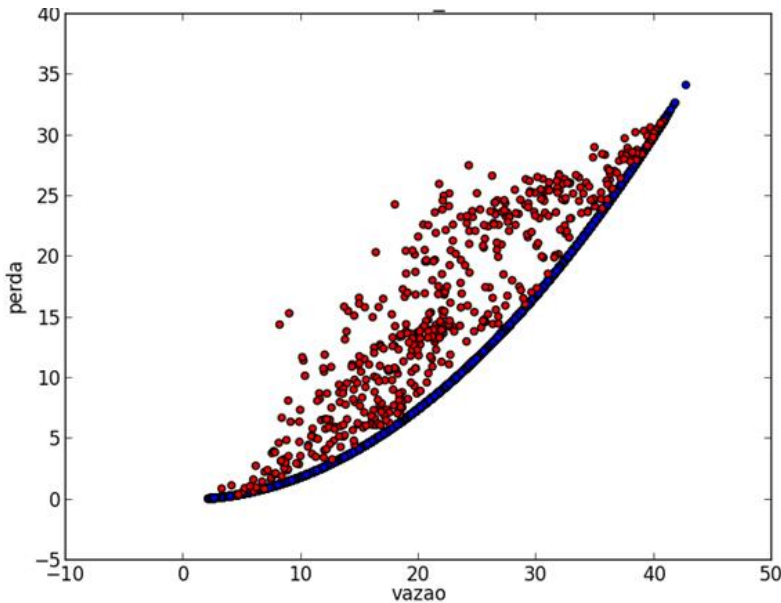
Lílian Yocogawa, Lílian Brandão, André Diniz, “Modelagem da Função de Produção das Usinas Hidroelétricas Considerando as Características Operativas das Unidades Geradoras”, XXV SNPTEE, Belo Horizonte, Nov. 2019



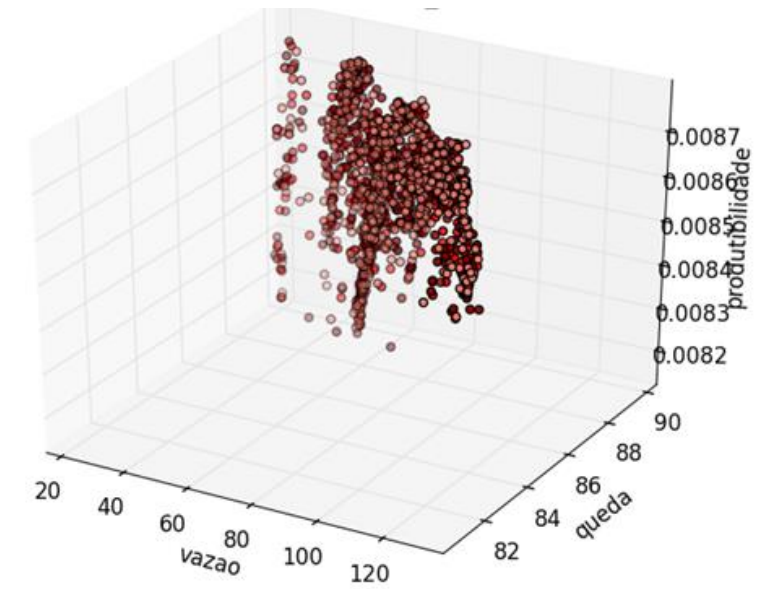
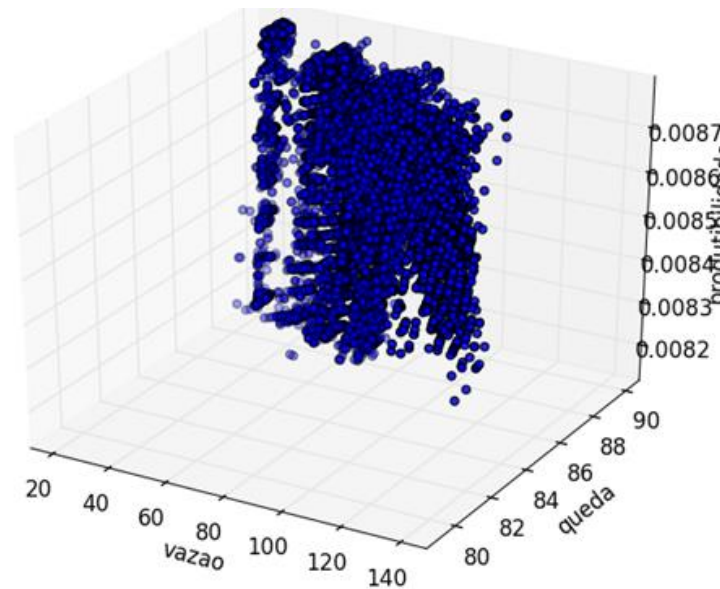
Médias semanais

- Aplicação aos dados do estudo

Perdas nos condutos
em função da vazão



Produtibilidade específica das turbinas variável
com a altura de queda e vazão

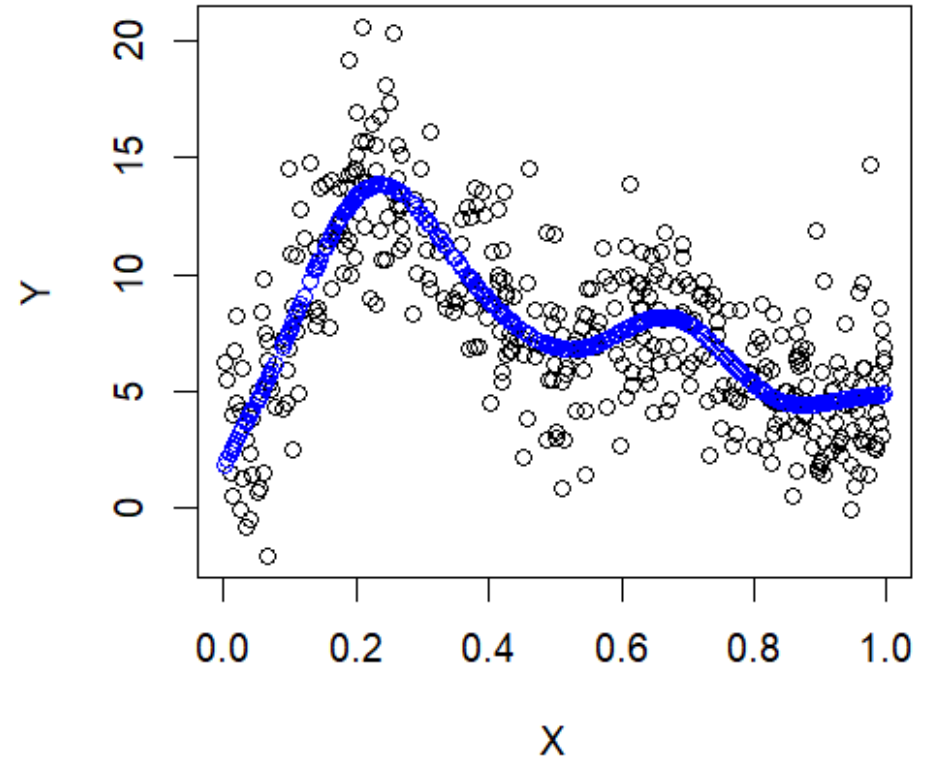


Pontos em Azul: valores horários

Pontos em Vermelho: médias semanais

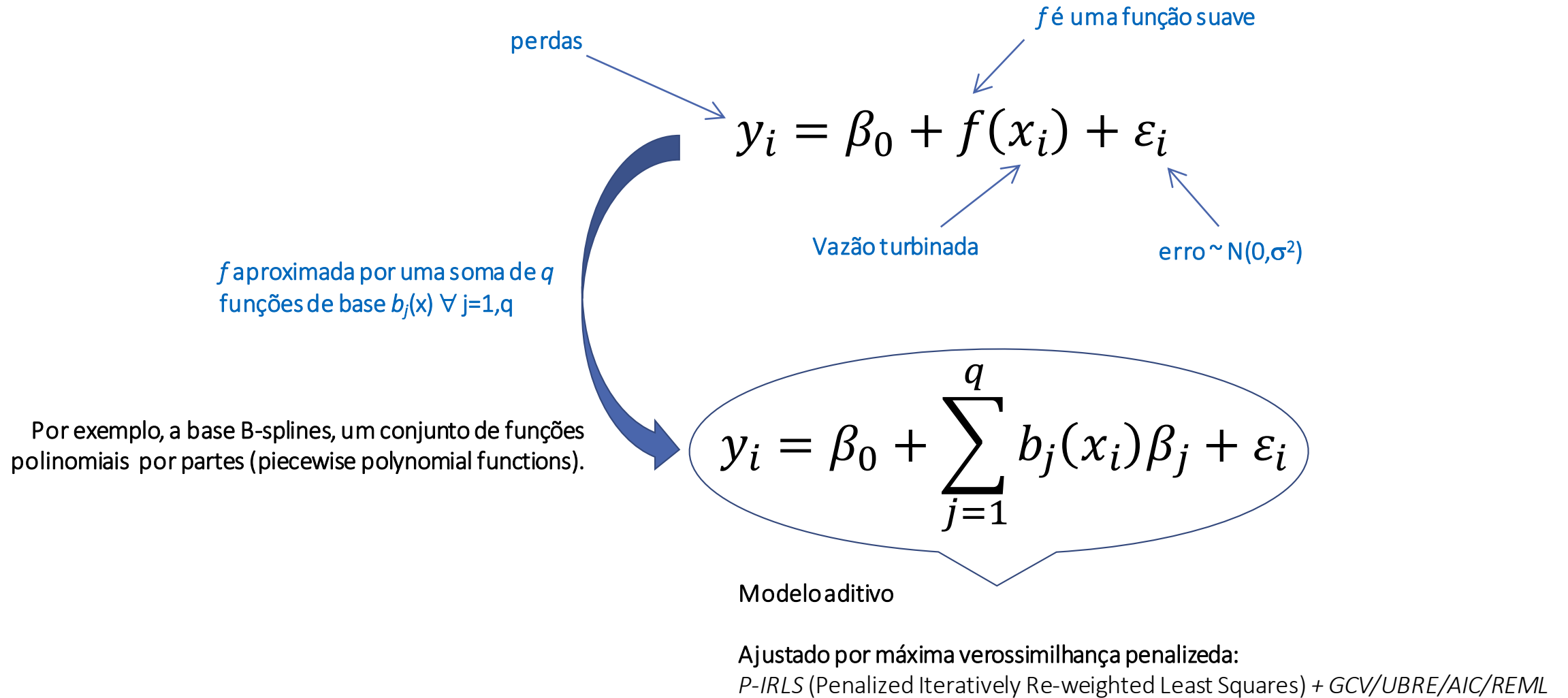
Modelos Aditivos Generalizados

- Considere as variáveis X e Y, cuja relação entre elas é estocástica e não linear
- Queremos uma equação que represente a relação entre Y e X
- Matematicamente queremos obter uma função f tal que $E(Y|X) = f(X)$
- Uma abordagem possível é ajustar um modelo aditivo, um modelo de regressão da família dos modelos aditivos generalizados (GAM – Generalized Additive Models) ou Spline Regression



$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^q b_j(x_i)\beta_j + \varepsilon_i$$

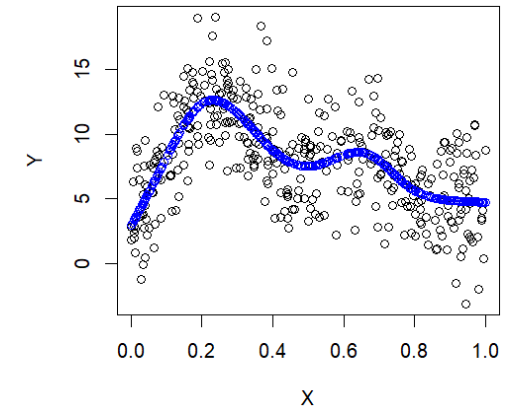
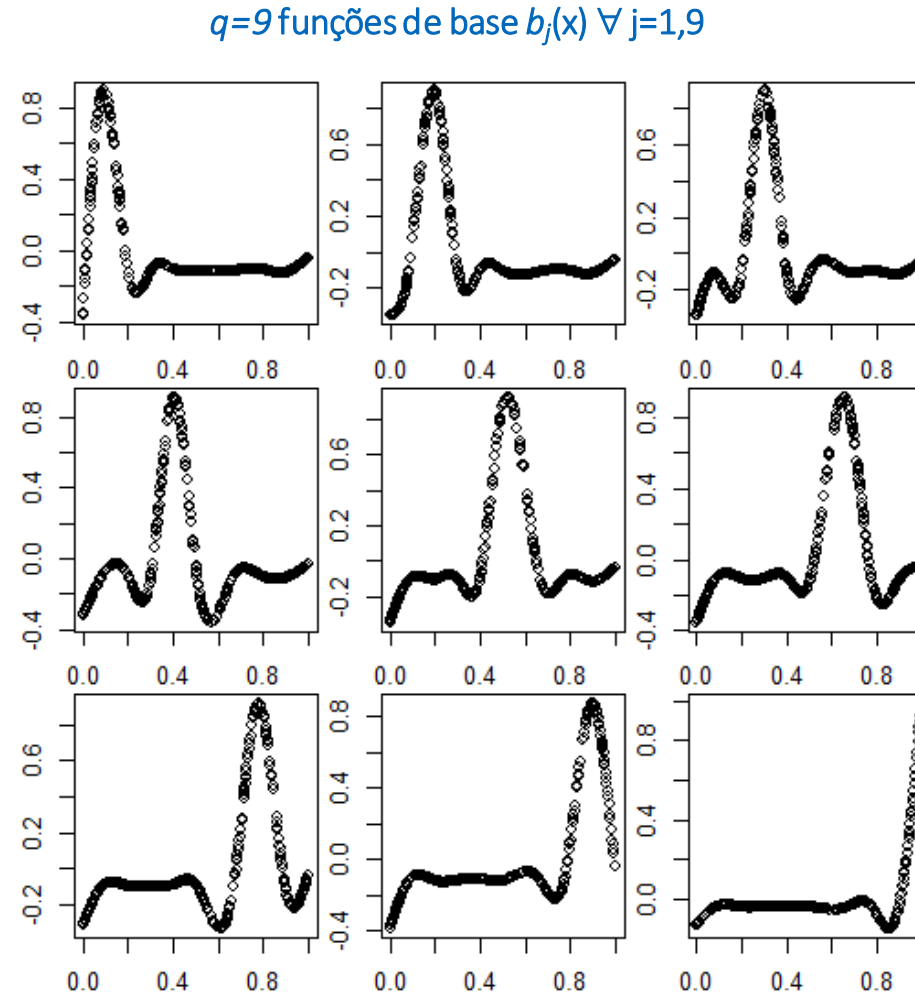
Modelos Aditivos Generalizados



Modelos Aditivos Generalizados

Uma função polinomial $f(x)$ por partes é obtida dividindo o domínio de x em intervalos contíguos e representando a função $f(x)$ separadamente em cada parte por uma função suave.

Cubic splines



$$\hat{y}_i = 7,9 + 1b_1(x_i) + 6b_2(x_i) + 5,1b_3(x_i) + 2,2b_4(x_i) + 1,1b_5(x_i) + 2,1b_6(x_i) - 0,5b_7(x_i) - 1,3b_8(x_i) - 2,6b_9(x_i)$$

Modelos Aditivos Generalizados

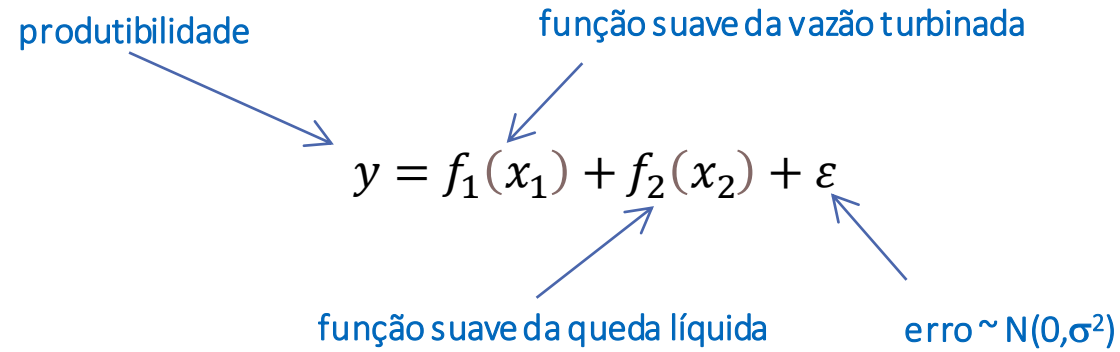
produtibilidade

função suave da vazão turbinada

$$y = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \varepsilon$$

função suave da queda líquida

erro $\sim N(0, \sigma^2)$



$$f_1(x_1) = \delta_0 + \sum_{j=1}^{q_1-2} \delta_j b_j(x_1)$$

$$f_2(x_2) = \theta_0 + \sum_{j=1}^{q_2-2} \theta_j b_j(x_2)$$



para evitar o problema de identificação dos parâmetros deve-se fazer $\theta_0=0$.

Modelos Aditivos Generalizados

$$y = \sum_{j=0}^q \beta_j b_j^m(x, x^*) + \varepsilon$$

Uma função polinomial $f(x)$ por partes é obtida dividindo o domínio de x em intervalos contíguos e representando a função $f(x)$ separadamente em cada parte por uma função suave, cujo conjunto forma uma base de funções $b^m(x, x^*)$.

Os pontos x^* que delimitam os intervalos são denominados nós.

$$b_j^m(x) = \frac{(x-x_j^*)}{(x_{j+m+1}^*-x_j^*)} b_j^{m-1}(x) + \frac{(x_{j+m+2}^*-x)}{(x_{j+m+2}^*-x_{j+1}^*)} b_{j+1}^{m-1}(x) \quad \forall j=1, \dots, q$$

Base *B-spline* de ordem $m=3$ ou *cubic B-Splines*

$$m=0, b_j^0(x) = 1 \text{ se } x_j^* \leq x \leq x_{j+1}^*, \text{ caso contrário } b_j^0(x) = 0$$

β_j estimador por mínimos quadrados penalizados β_j para um dado parâmetro de suavização λ

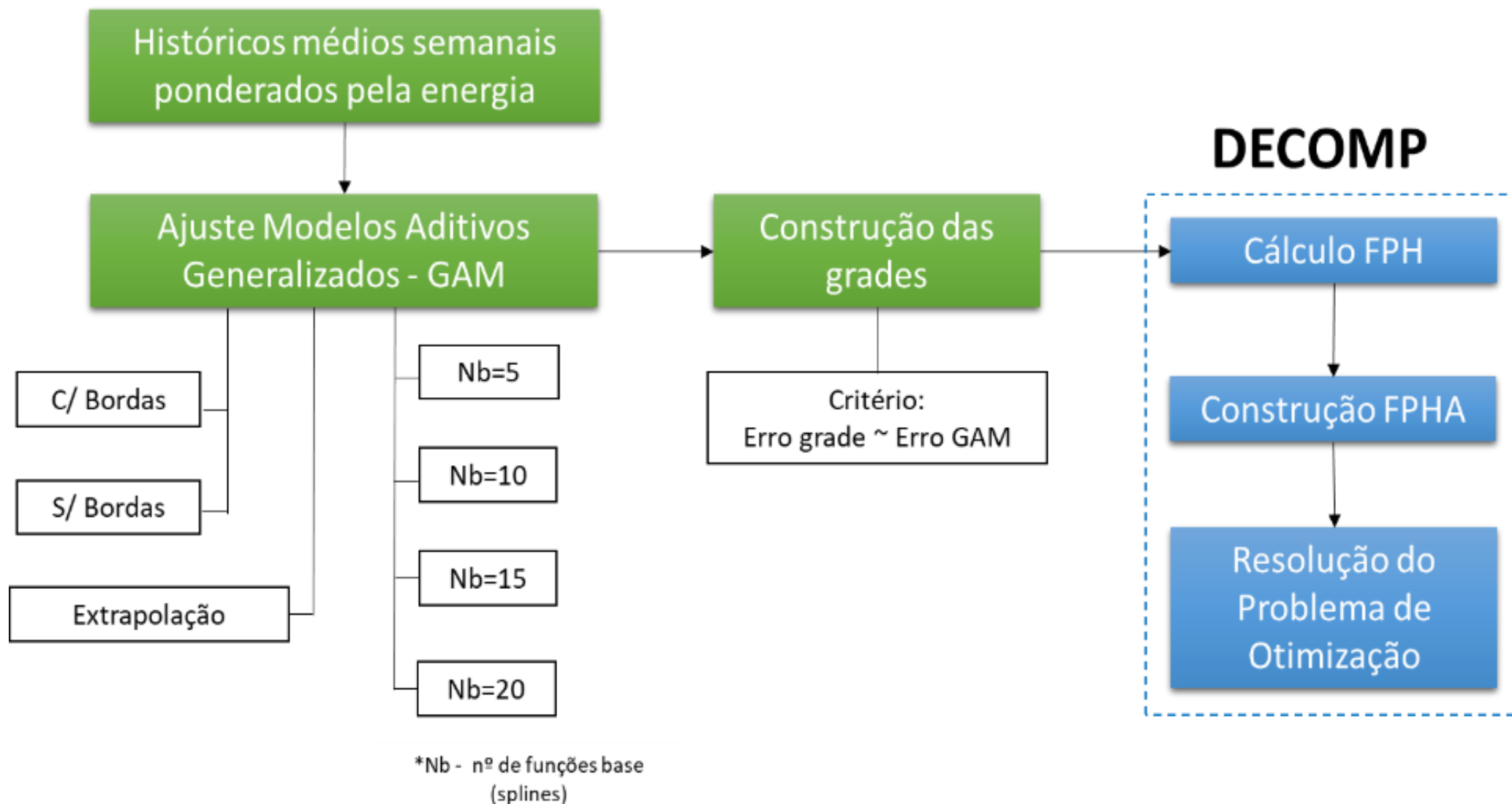
Parâmetro de suavização λ pode ser encontrado por minimização dos critérios GCV, UBRE e AIC ou maximização da verossimilhança restrita (REML)

$$\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 + \lambda_j \int f''(x)^2 dx$$

$$GCV(\lambda) = \frac{n \sum_{i=1}^n [y_i - \sum_{j=1}^p f_j(x_{i,j})]^2}{[\text{traço}(I - A)]^2}$$

Fluxograma Geral

- Processo para representação variável da produtividade específica e perda hidráulica

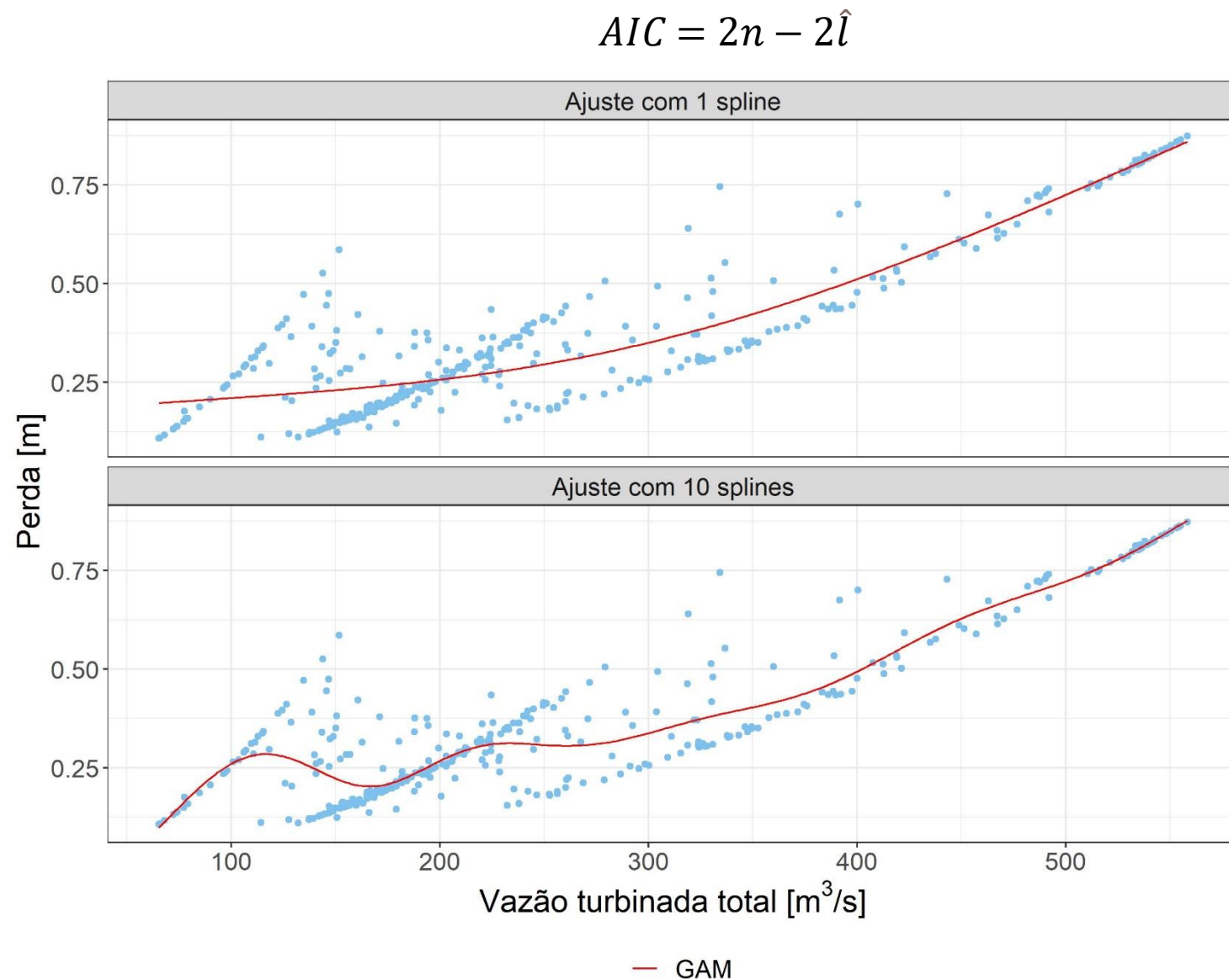


Determinação das grades

- Parametrização do ajuste do modelo GAM
- Complementação dos ajustes de perdas
- Uso de pontos da curva colina
- Parametrização das grades
- Ajuste de grades assimétricas

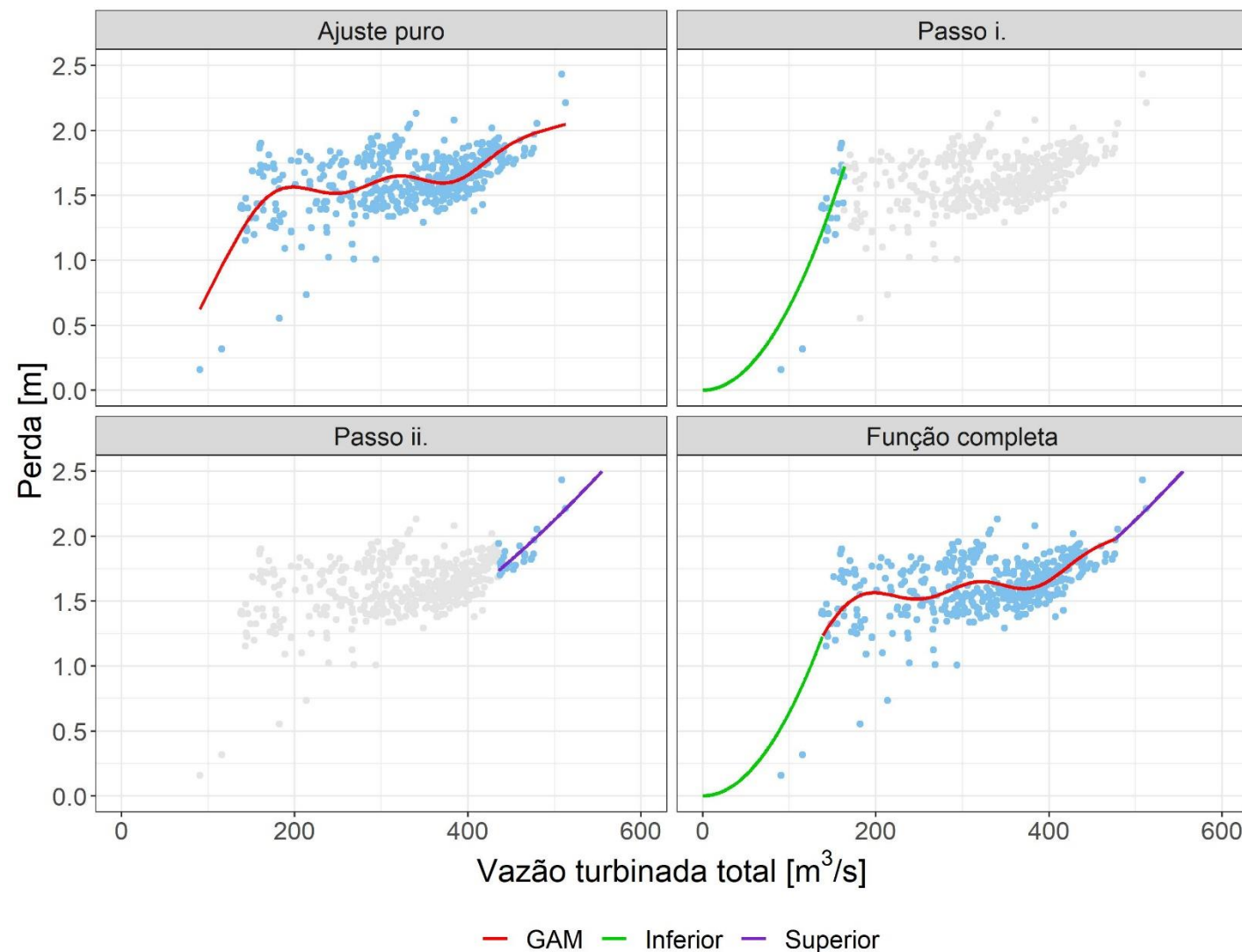
Determinação das grades

- Parametrização do ajuste do modelo GAM
- Complementação dos ajustes de perdas
- Uso de pontos da curva colina
- Parametrização das grades
- Ajuste de grades assimétricas



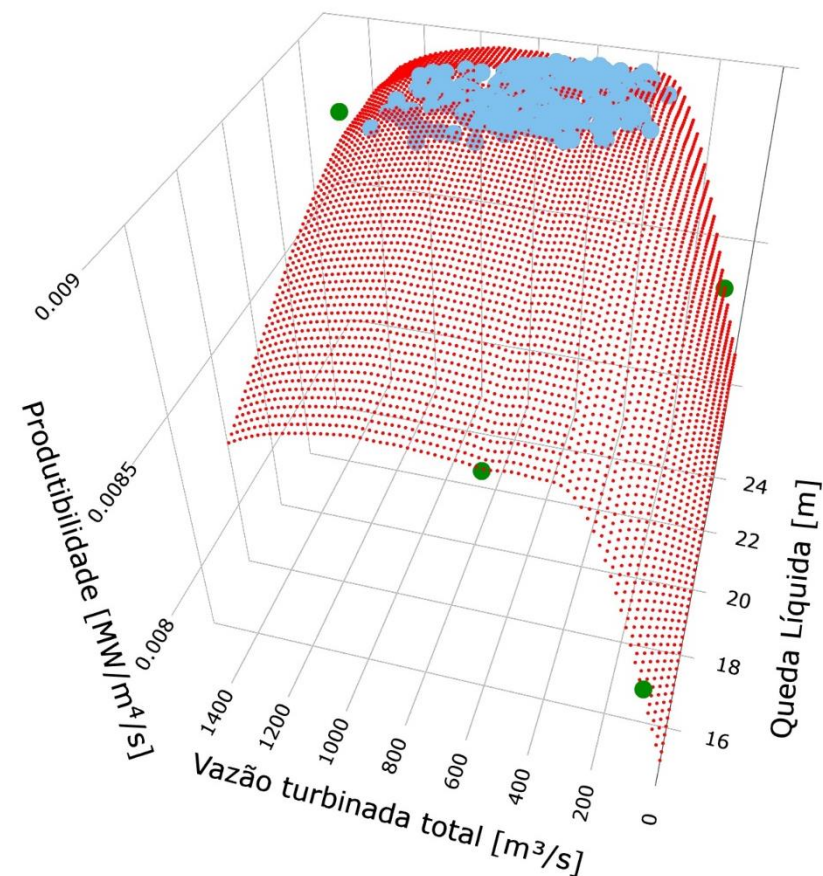
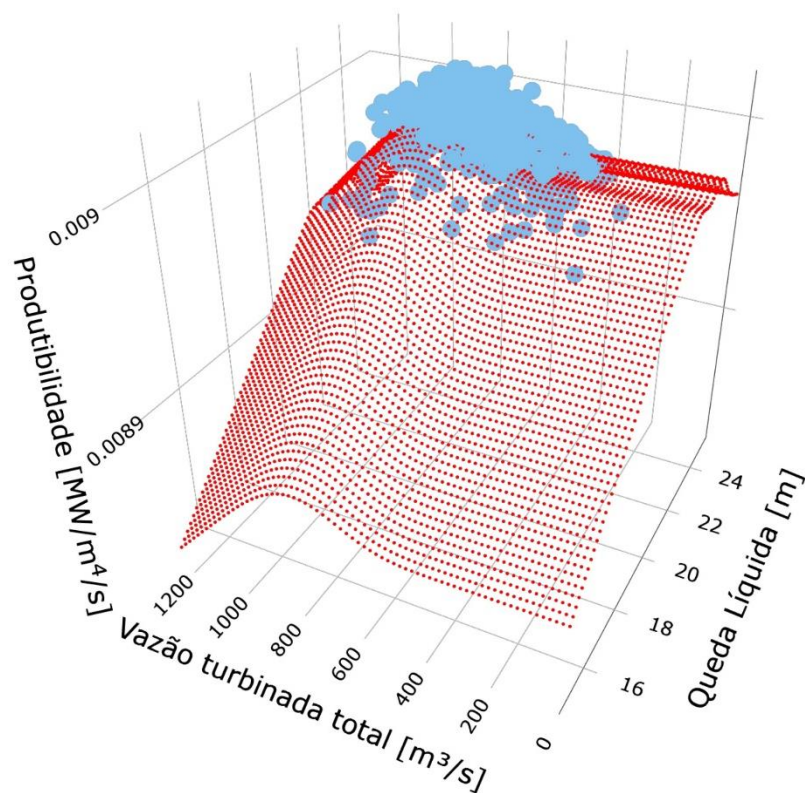
Determinação das grades

- Parametrização do ajuste do modelo GAM
- **Complementação dos ajustes de perdas**
- Uso de pontos da curva colina
- Parametrização das grades
- Ajuste de grades assimétricas



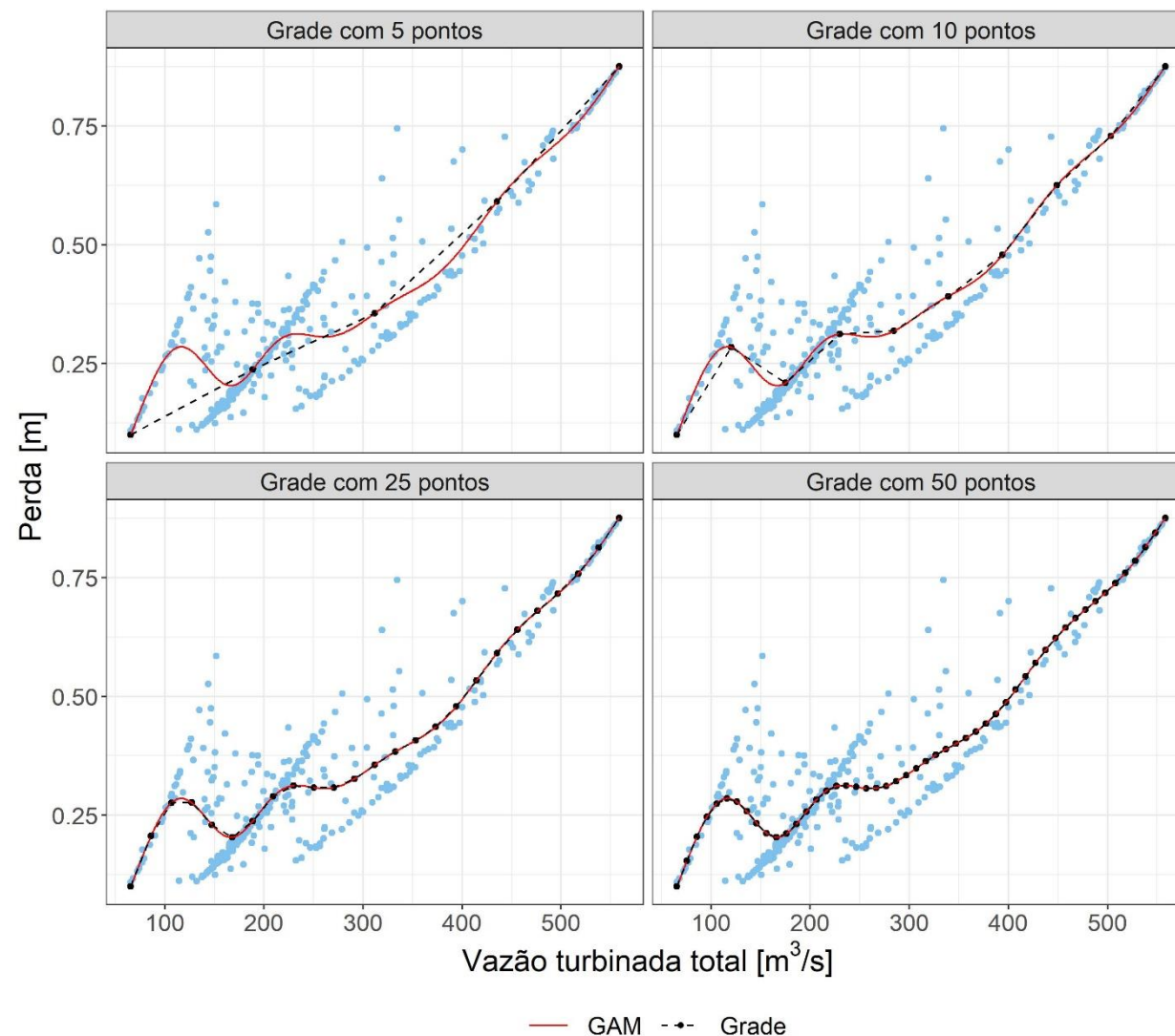
Determinação das grades

- Parametrização do ajuste do modelo GAM
- Complementação dos ajustes de perdas
- **Uso de pontos da curva colina**
- Parametrização das grades
- Ajuste de grades assimétrico



Determinação das grades

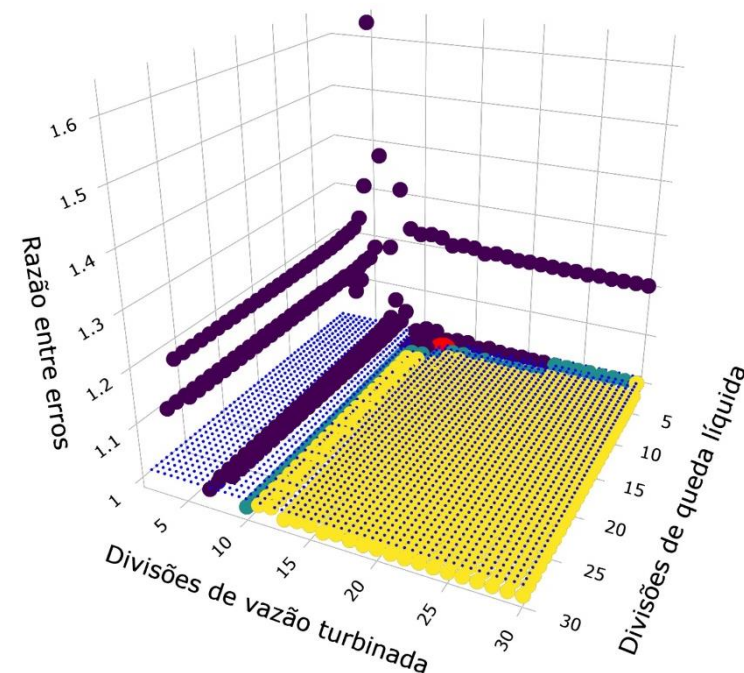
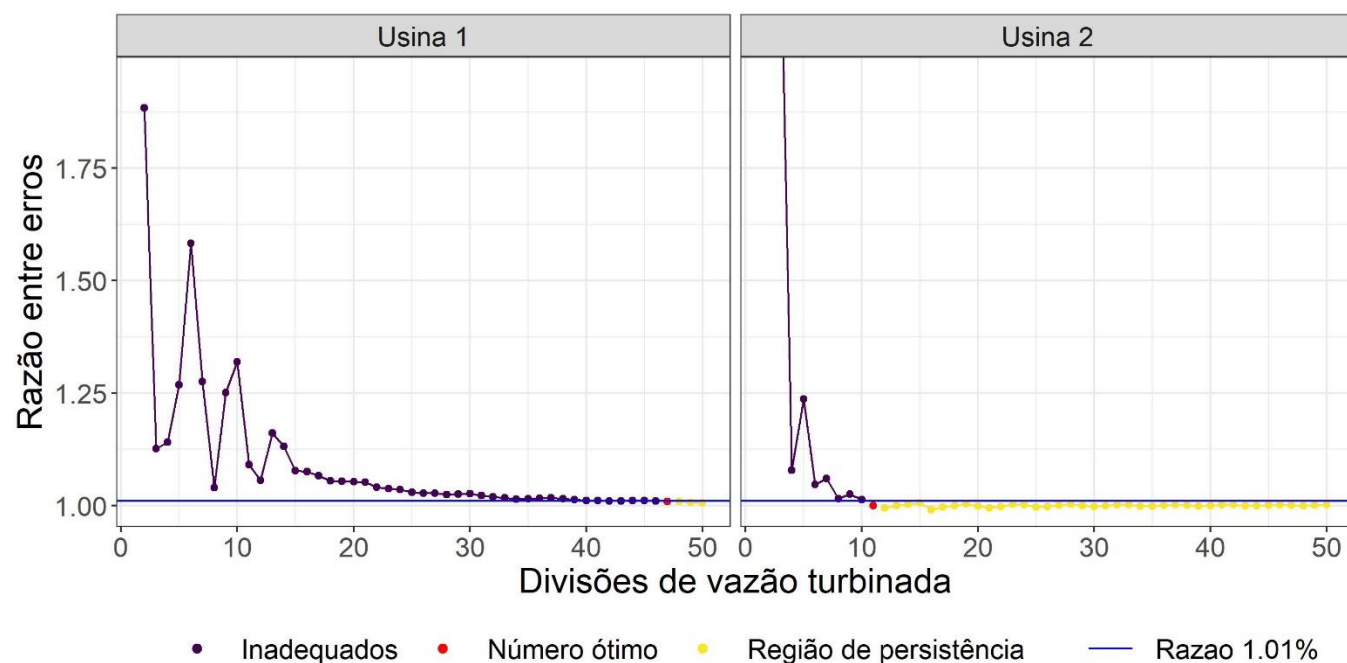
- Parametrização do ajuste do modelo GAM
- Complementação dos ajustes de perdas
- Uso de pontos da curva colina
- **Parametrização das grades**
- Ajuste de grades assimétricas



Determinação das grades

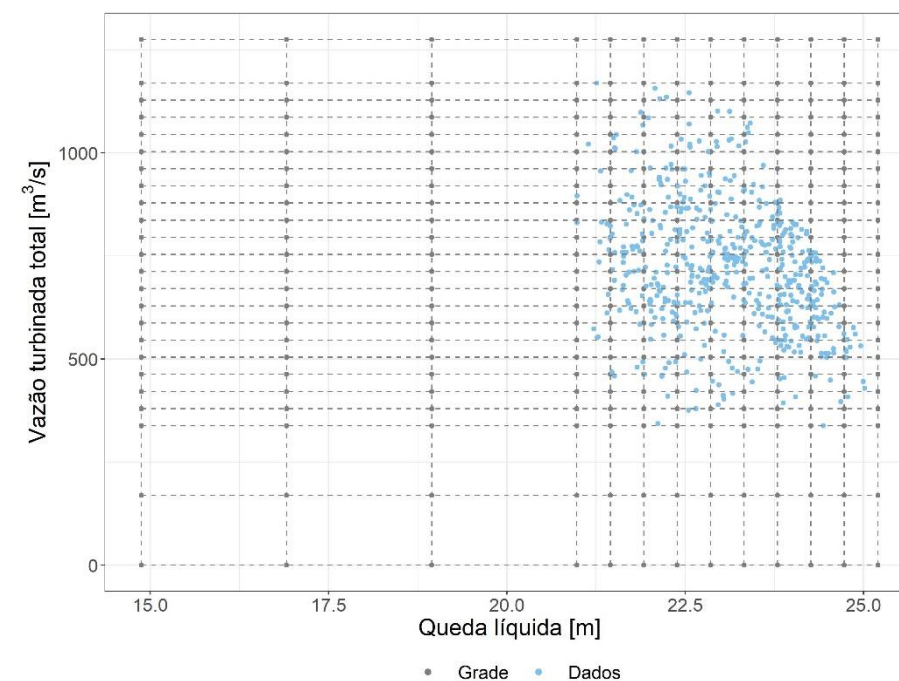
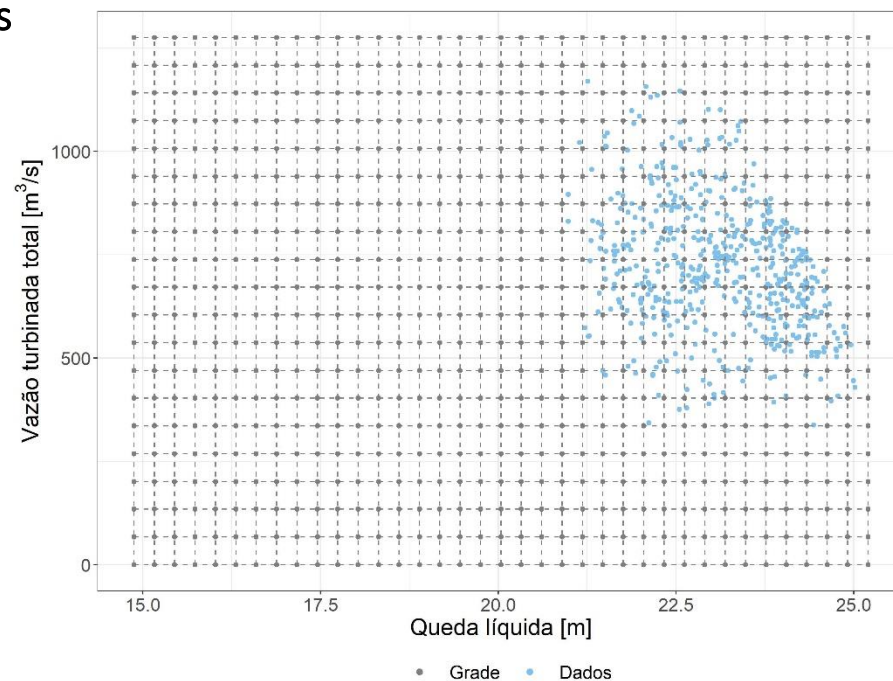
- Parametrização do ajuste do modelo GAM
- Complementação dos ajustes de perdas
- Uso de pontos da curva colina
- **Parametrização das grades**
- Ajuste de grades assimétricas

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{ERRO_{grid}}{ERRO_{GAM}} = 1$$



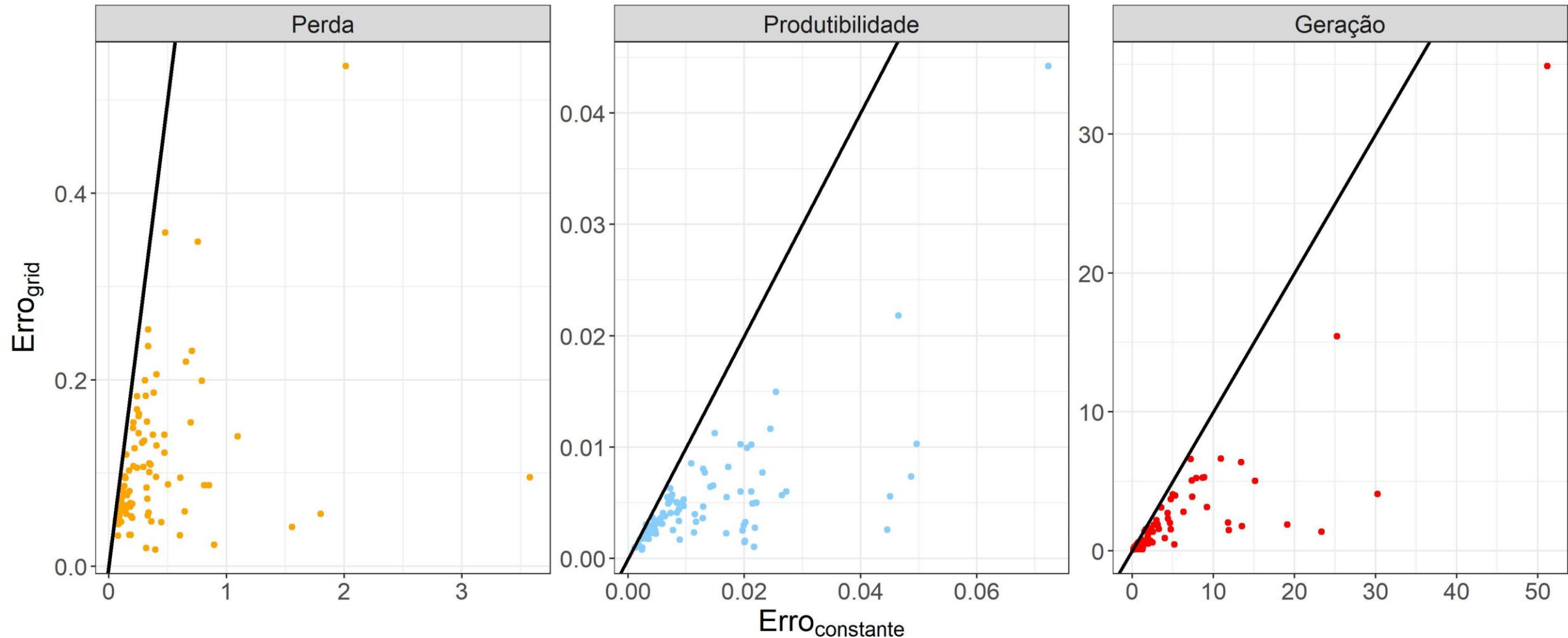
Determinação das grades

- Parametrização do ajuste do modelo GAM
- Complementação dos ajustes de perdas
- Uso de pontos da curva colina
- Parametrização das grades
- Ajuste de grades assimétricas



Avaliação dos ajustes

- Comparando os erros de aproximação do dado histórico pelas constantes e grades



Status atual da função de produção exata considerada pelo DECOMP

- Geração exata de uma usina hidroelétrica (FPH):

$$FPH_i(V, Q, S) = \rho_i Q \left[h_{mon_i}(V) - h_{jus_i}(Q, S) \right] k_{perdas_i}$$

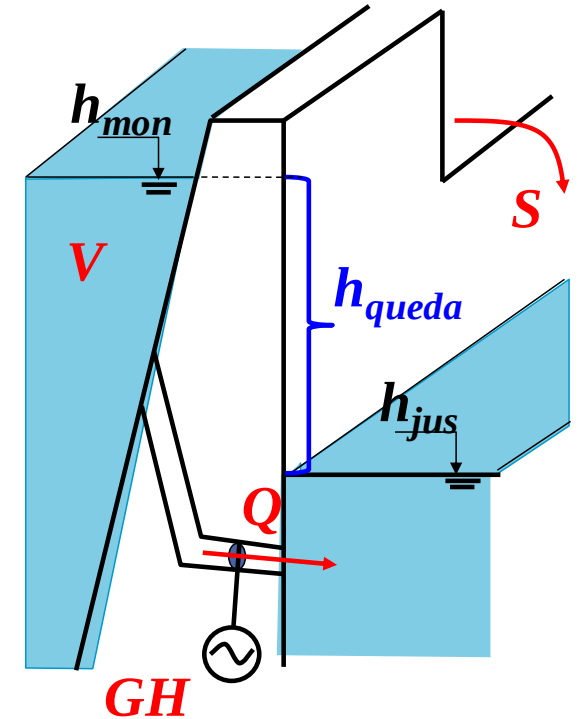
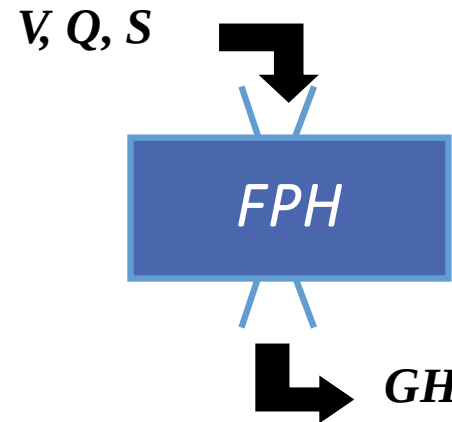
$$FPH_i(V, Q, S) = \rho_i Q \left[\underbrace{h_{mon_i}(V)}_{\text{Cota de montante em função de } V} - \underbrace{h_{jus_i}(Q, S)}_{\text{Cota de Jusante em função de } Q \text{ e } S} - \underbrace{k_{perdas_i}}_{\text{fator de perdas ou perdas em m}} \right]$$

Produtibilidade específica
(valor constante)

Cota de montante
em função
de V

Cota de Jusante
em função
de Q e S

fator de perdas
ou perdas em m



Fonte: CEPEL

Aprimoramento proposto na função de produção exata considerada no DECOMP

- Geração exata de uma usina hidroelétrica (FPH):

$$FPH_i(V, Q, S) = \rho_i Q \left[h_{mon_i}(V) - h_{jus_i}(Q, S) \right] k_{perdas_i}$$

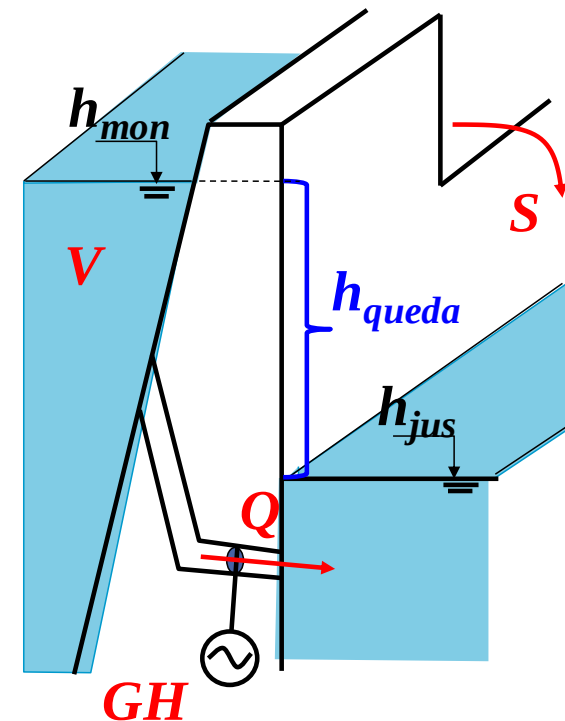
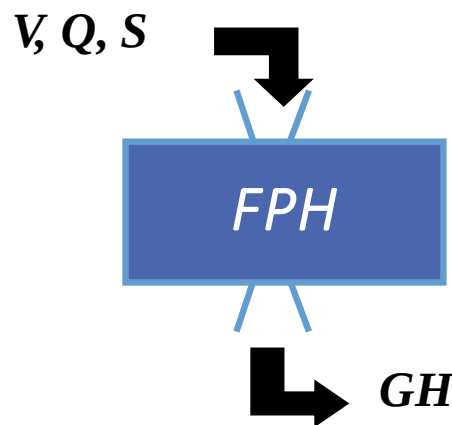
$$FPH_i(V, Q, S) = \rho_i \underbrace{(Q, h_{liq}(V, Q, S))}_{\text{Cota de montante em função de } V} \underbrace{\left[h_{mon_i}(V) - h_{jus_i}(Q, S) - k_{perdas_i}(Q) \right]}_{\text{Cota de Jusante em função de } Q \text{ e } S}$$

Produtibilidade específica
(valor constante)

Cota de montante
em função
de V

Cota de Jusante
em função
de Q e S

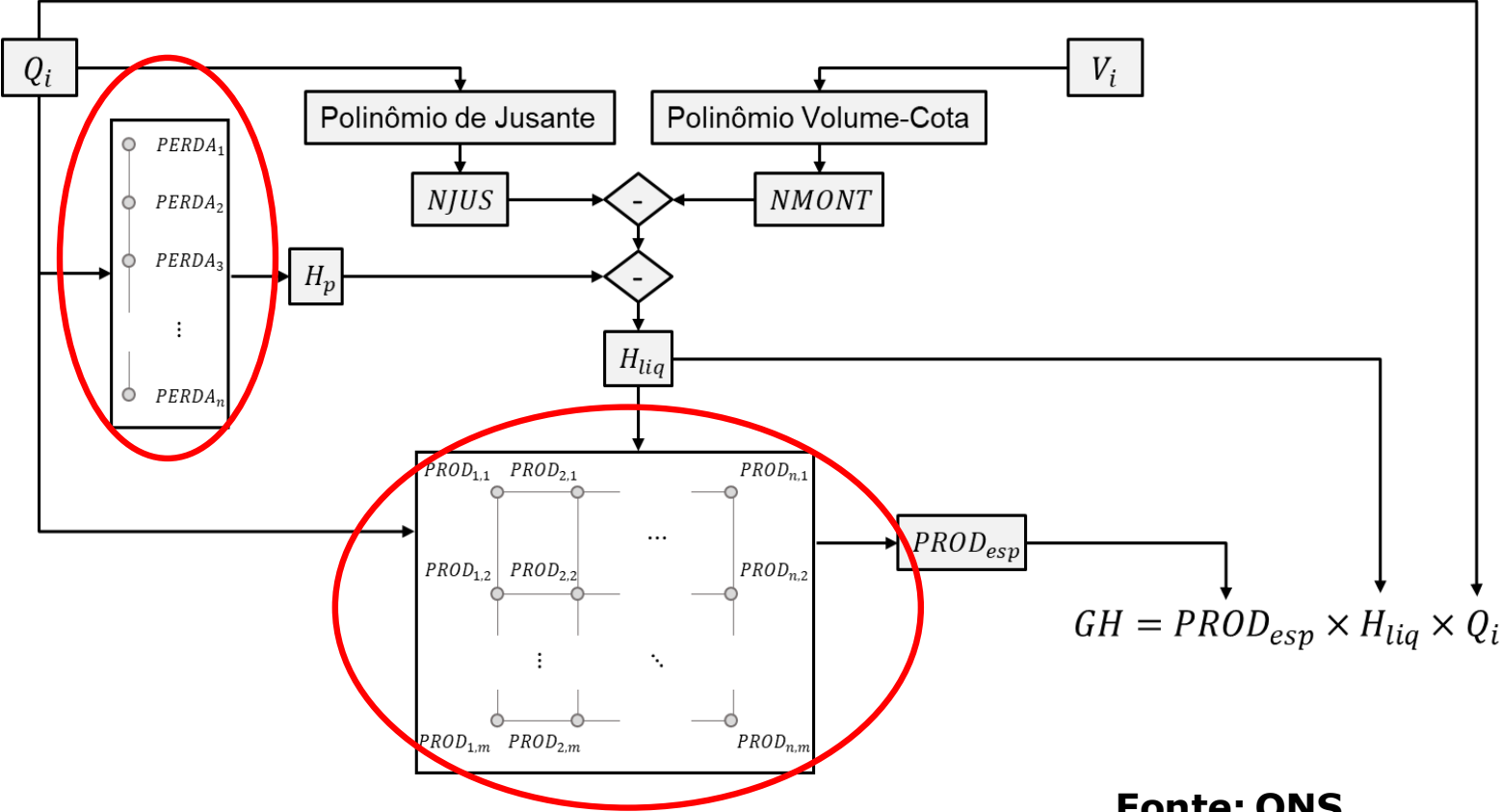
fator de perdas
ou perdas em m



Fonte: CEPEL

Aprimoramento proposto na função de produção exata considerada no DECOMP

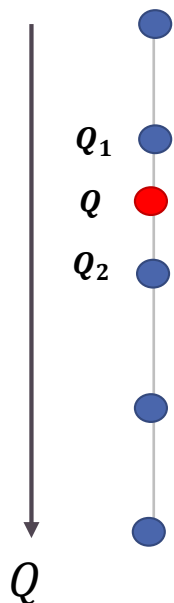
- Esquema de cálculo da FPH



Fonte: ONS

Interpolação proposta para obter os pontos no meio da grade

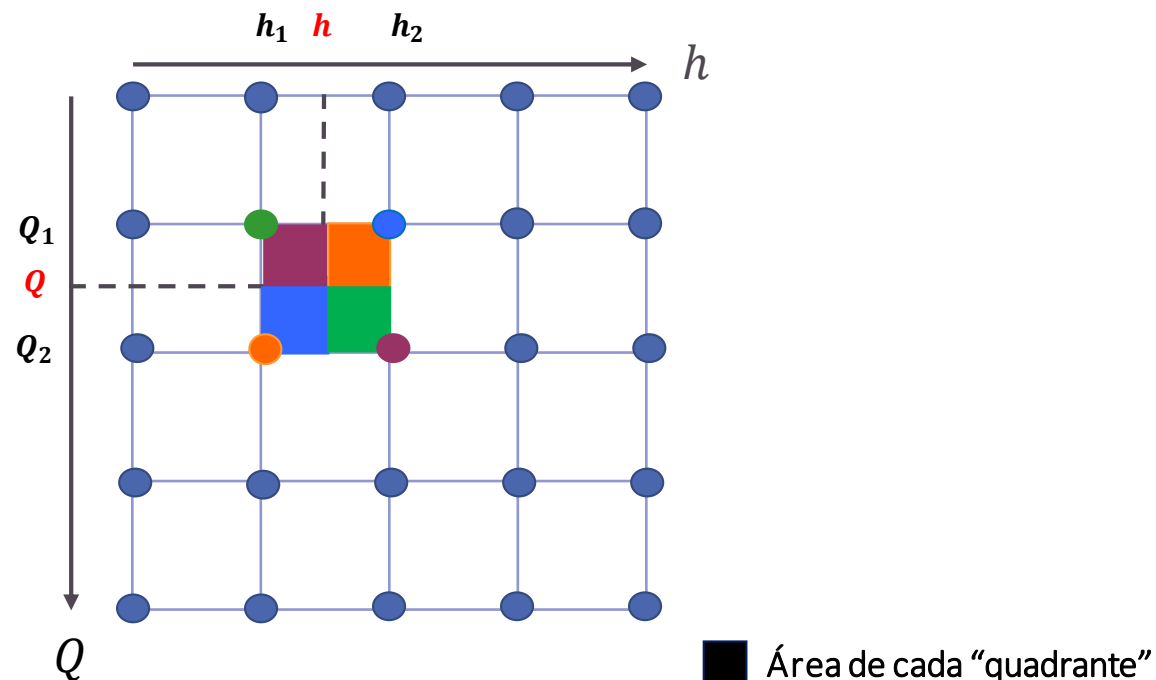
Grade de Perdas nos Condutos



Interpolação simples:

$$p = \frac{p(Q_1)(Q_2 - Q) + p(Q_2)(Q - Q_1)}{(Q_2 - Q_1)}$$

Grade de Produtibilidade Específica



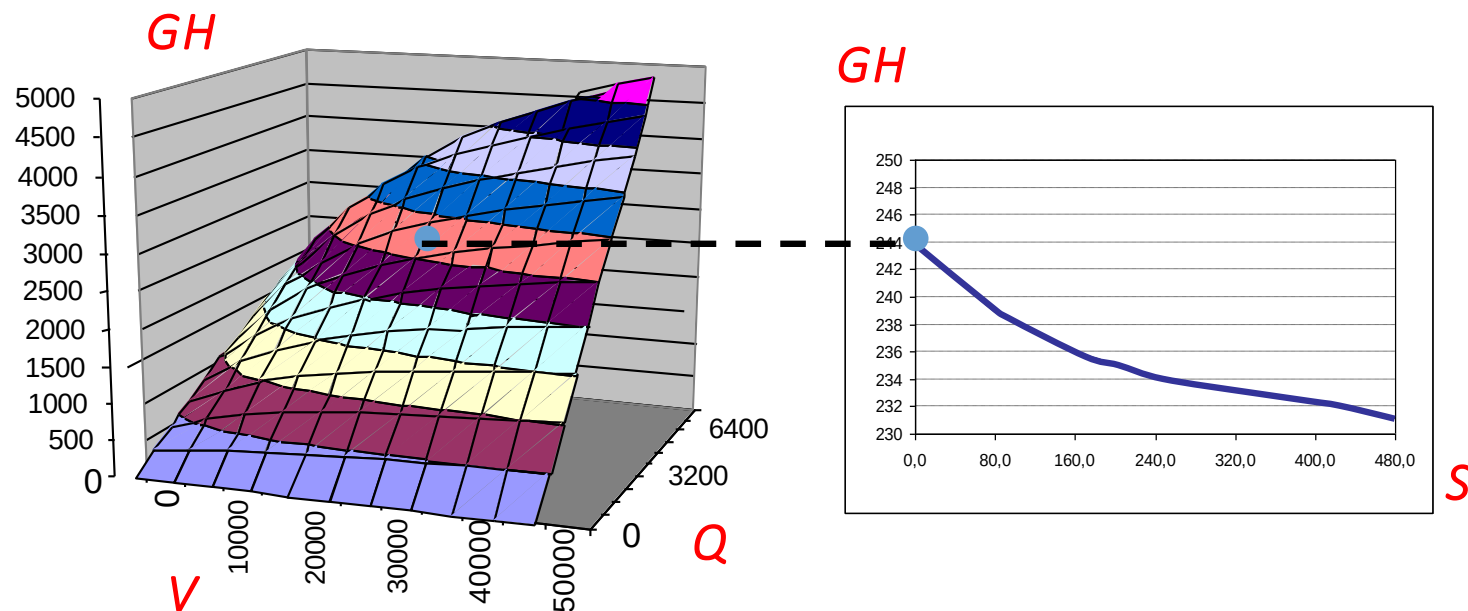
Interpolação bilinear:

$$p = \frac{\begin{aligned} &\overbrace{\rho(Q_1, h_1)(Q_2 - Q)(h_2 - h)} + \\ &\rho(Q_2, h_1)(Q - Q_1)(h_2 - h) + \\ &\rho(Q_1, h_2)(Q_2 - Q)(h - h_1) + \\ &\rho(Q_2, h_2)(Q - Q_1)(h - h_1) \end{aligned}}{\underbrace{(Q_2 - Q_1)((h_2 - h_1))}_{\text{Área total}}}$$

Modelagem da FPHA no DECOMP

- Comportamento da FPH

- ✓ Geração aumenta com a vazão turbinada Q (mais “combustível” na turbina)
- ✓ Produtividade aumenta com o volume armazenado V (maior queda líquida)
- ✓ Vertimento diminui a geração (menor queda líquida)



■ **Variação em V e Q
(para $S=0$)**

■ **Variação para S
(para V e Q fixos)**

Fonte: CEPEL

Modelagem da FPHA no DECOMP

- Modelagem linear por partes em V , Q e S

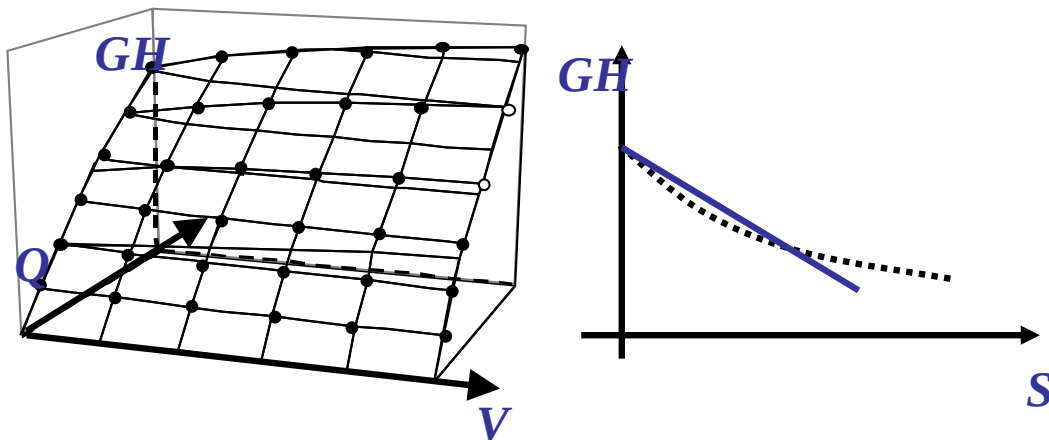
$$GH_i^{t,p,s} \leq \alpha(\gamma_0^{i,t,k} + \gamma_V^{i,t,k} V_i^{t,s} + \gamma_Q^{i,t,k} Q_i^{t,p,s}) + \gamma_S^{i,t,k} S_i^{t,p,s}, \quad k = 1, \dots, K_{it},$$

$$i = 1, \dots, NH,$$

$$t = 1, \dots, T,$$

$$s = 1, \dots, S$$

quantidade de
planos
(restrições)



- Limites mínimos e máximos para as variáveis

$$\underline{GH}_i \leq GH_i^{t,p,s} \leq \overline{GH}_i, \quad \underline{V}_i \leq V_i^{t,s} \leq \overline{V}_i,$$

$$\underline{Q}_i \leq Q_i^{t,p,s} \leq \overline{Q}_i, \quad \underline{S}_i \leq S_i^{t,p,s} \leq \overline{S}_i,$$

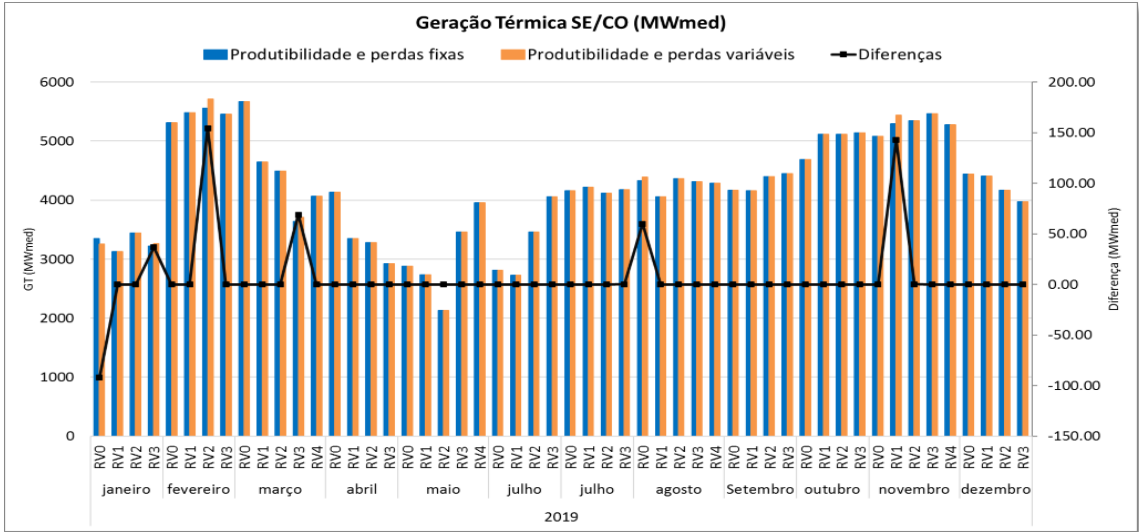
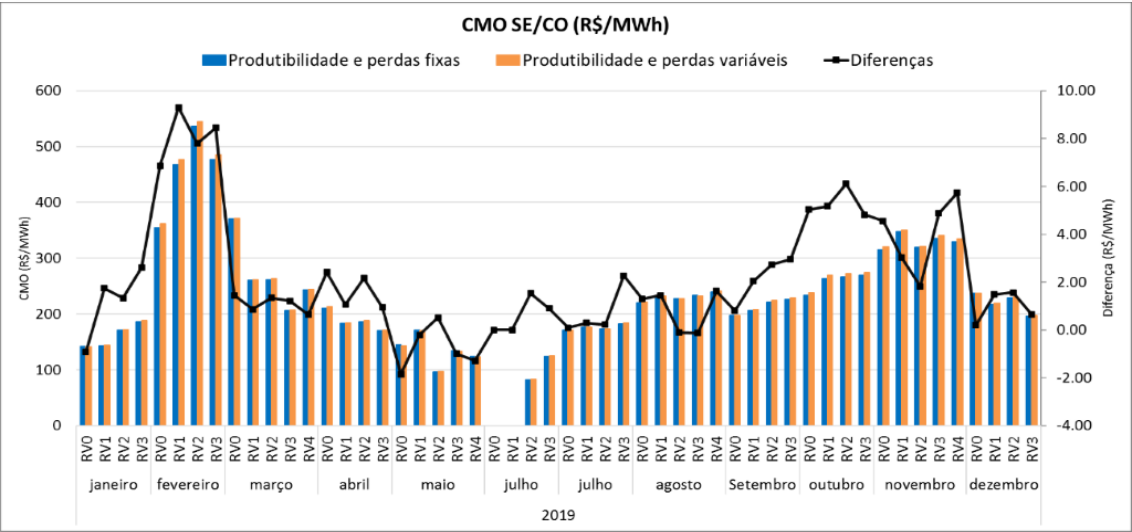
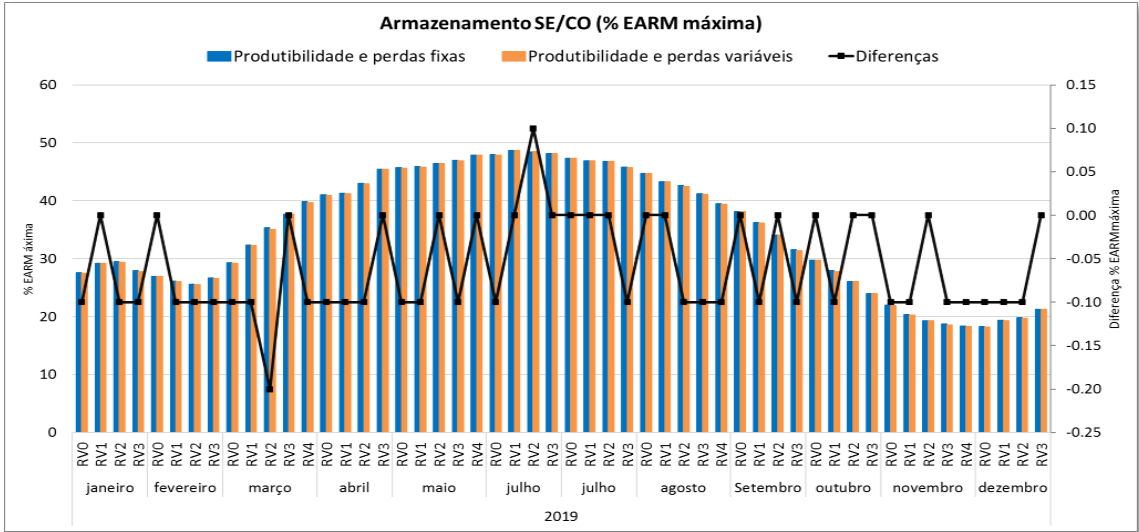
$$i = 1, \dots, NH, \quad t = 1, \dots, T$$

Fonte: CEPEL

A. L. Diniz, M.E.P. Maceira, "A four-dimensional Model of Hydro Generation for the Short Term Hydrothermal Dispatch Problem Considering Head and Spillage Effects", IEEE Transactions on Power Systems, v.23, n.3, pp. 1298-1308, 2008

Avaliação preliminar da operação de curto prazo

- As análises completas sobre a utilização das grades de produtividade e perda serão objeto do segundo relatório do subgrupo de Produtibilidade



Conclusões

- Frente aos resultados e análises expostos até o momento, o GT-MET concluiu que a metodologia utilizada para ajuste das grades de perdas e produtibilidades representa de maneira adequada a variabilidade destas grandezas frente às diferentes situações operativas observadas na janela analisada neste estudo.
- Dando continuidade às avaliações deste subgrupo, as grades serão aplicadas no modelo de planejamento de curto-prazo, DECOMP, e serão analisados os impactos na representação da função de produção das usinas e, conseqüentemente, na operação do sistema.

Obrigado!

Coordenação do GT Metodologia
gtmet.cpamp@ccee.org.br

Assessoria Técnica:

