

A importância da Acurácia na Representação do Sistema e Restrições Operativas na Etapa de Planejamento

Painel GOP - SNPTEE 2017 - Curitiba

Apresentador: Alexandre Streert

Professor Associado - Departamento de Engenharia Elétrica

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Coordenador do grupo de energia elétrica do LAMPS

Contato: street@ele.puc-rio.br

Website: www.puc-rio.br/lamps

AGENDA

- **Motivação**
- Políticas de planejamento
- Custo da Inacurácia
- Considerações e Reflexões



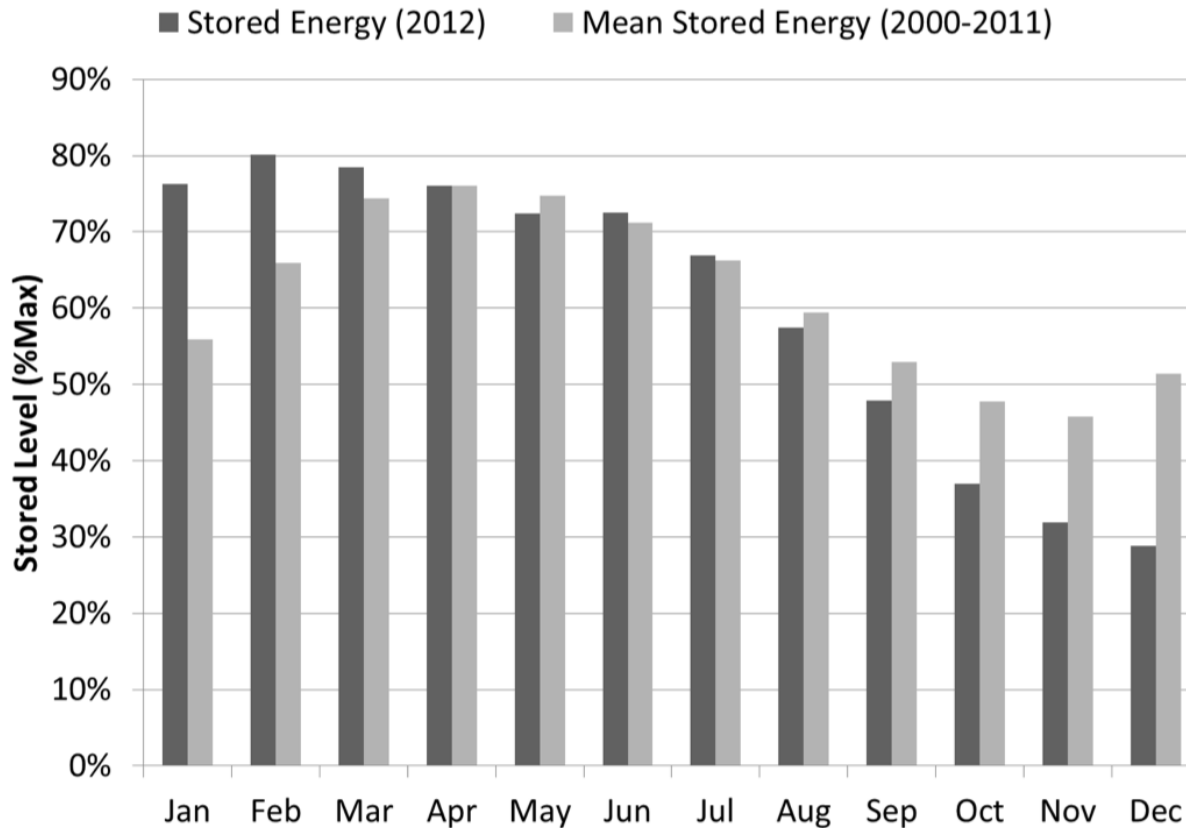
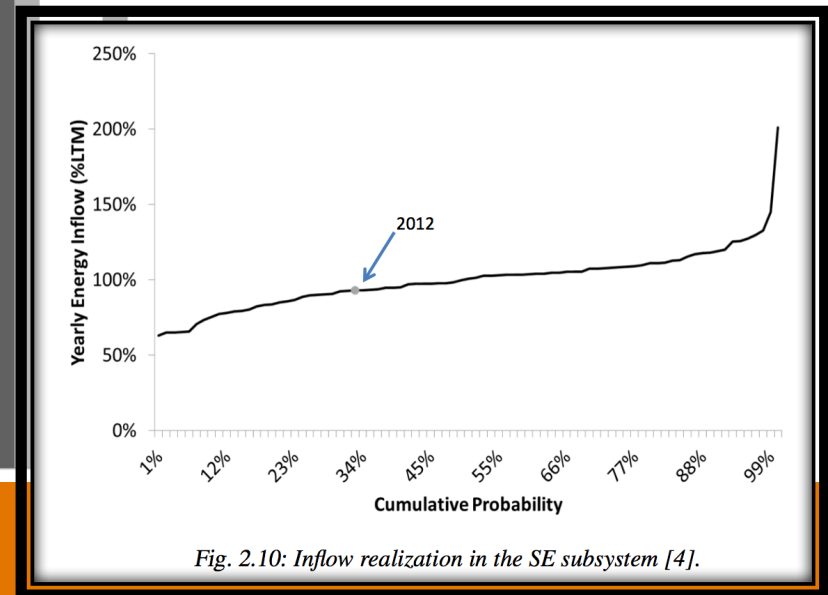
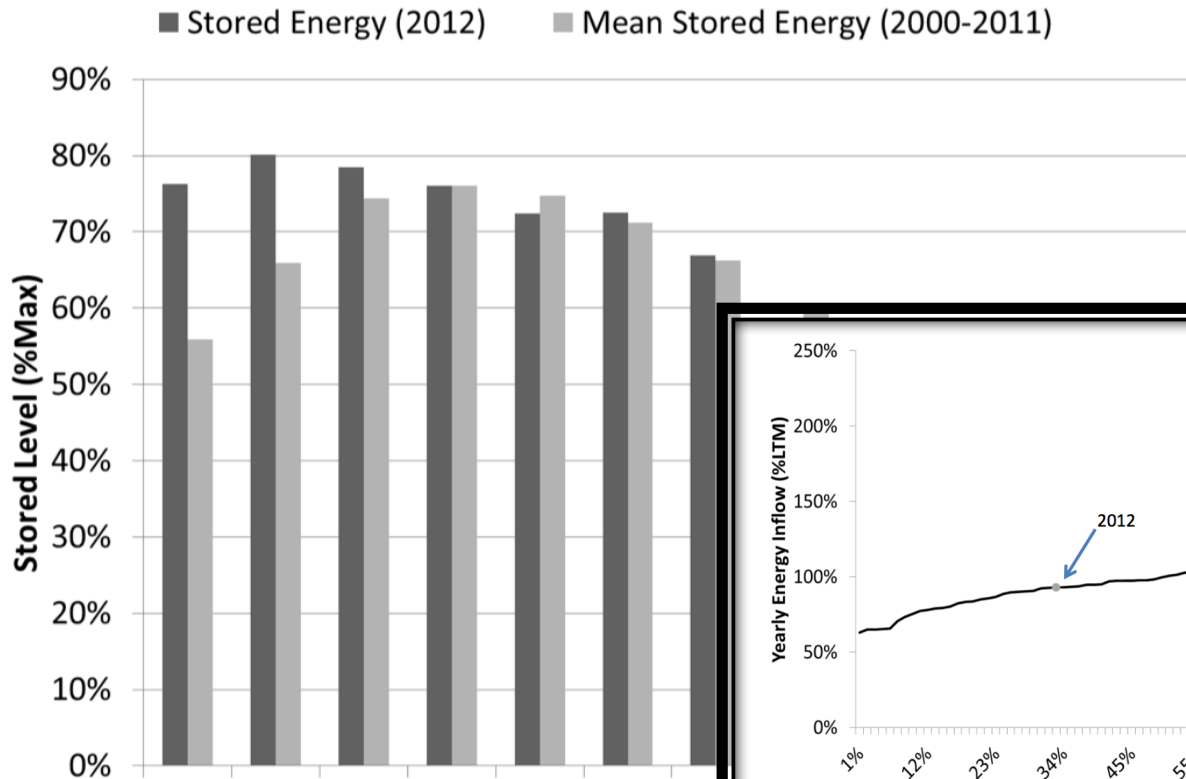


Fig. 2.9: Reservoirs levels in the SE subsystem in 2012 and mean Reservoirs levels between the years of 2000 and 2011. [4]

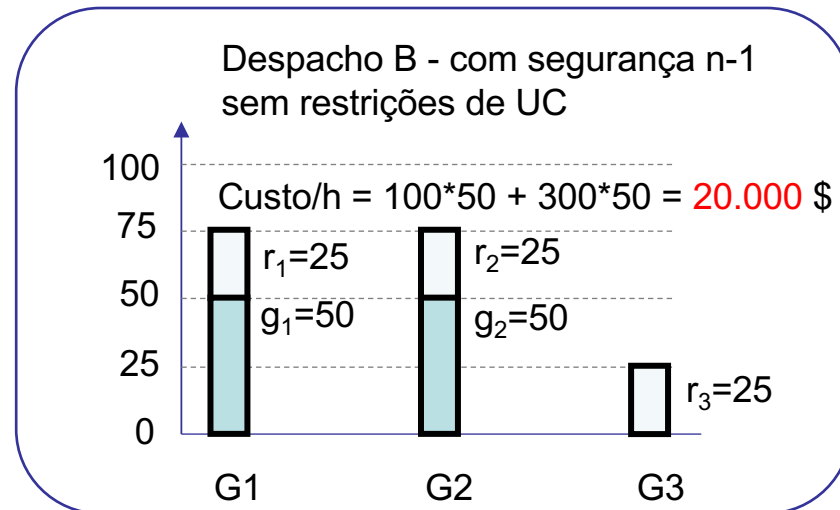
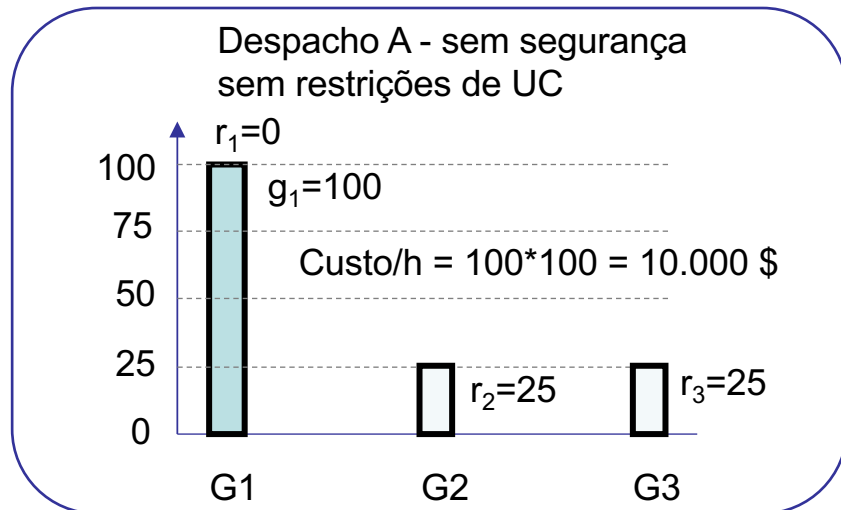


O que aconteceu?

- Reserva girante inferior a 1%?
- Critério de segurança n-2 e sendo elevado a n-3?
- Chuvas em regiões diferentes do padrão?
- Coeficientes de produtividade das hídros?

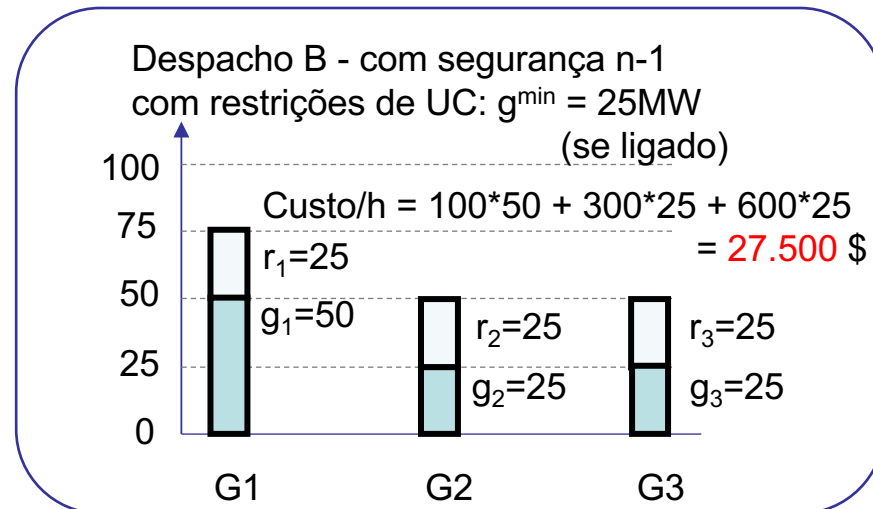
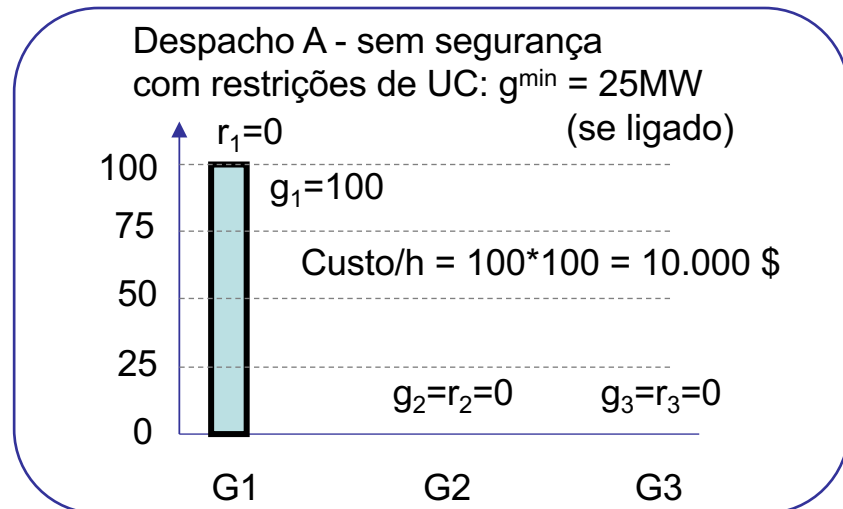
O planejamento deve ou não considerar o critério de segurança?

- Sistema com carga = 100 MW e 3 geradores:
 - Potência de cada gerador = 100 MW
 - Máxima rampa de reserva = 25 MW
 - Custo variável unitário = 100, 300, 600



O planejamento deve ou não considerar o critério de segurança?

- Se implementamos restrições de unit commitment
 - O gerador tem geração mínima de 25 MW, se conectado
 - Para fornecer reserva girante, é necessário estar conectado
 - Como precisamos da reserva de G3, precisamos ligá-lo no mínimo



Hazard-decision

- Permite decomposição entre cenários
- Decisão tomada sob informação perfeita (irreal)



Na operação: despacho antecipado

Decisão energética



Inconsistência temporal

Hazard-Decision vs Decision-Hazard

Assumimos que conhecemos a vazão e todos os parâmetros do problema na etapa de planejamento da decisão que será implementada ao longo de cada período

Decisão sob Informação perfeita de t



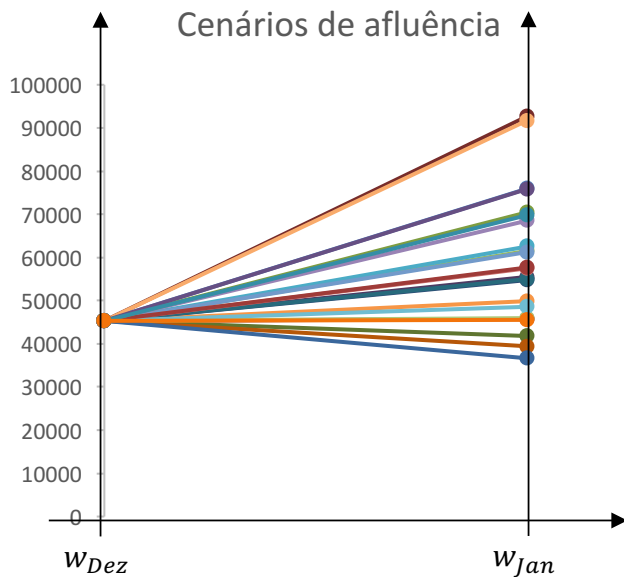
Externalidade de t -----> Decisão de t



Hazard-decision

Qual a ordem de grandeza dessa incerteza?

- Ex: Janeiro – Subsistema SE



$$c_v(t|t-1) = \frac{\sigma(w_t|w_{t-1})}{E(w_t|w_{t-1})} \approx 25\%$$

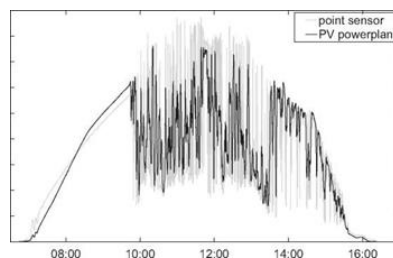
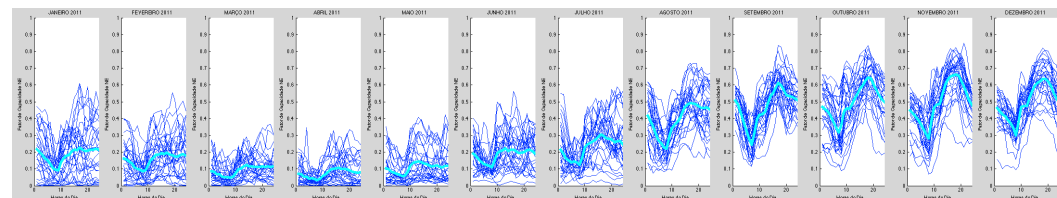
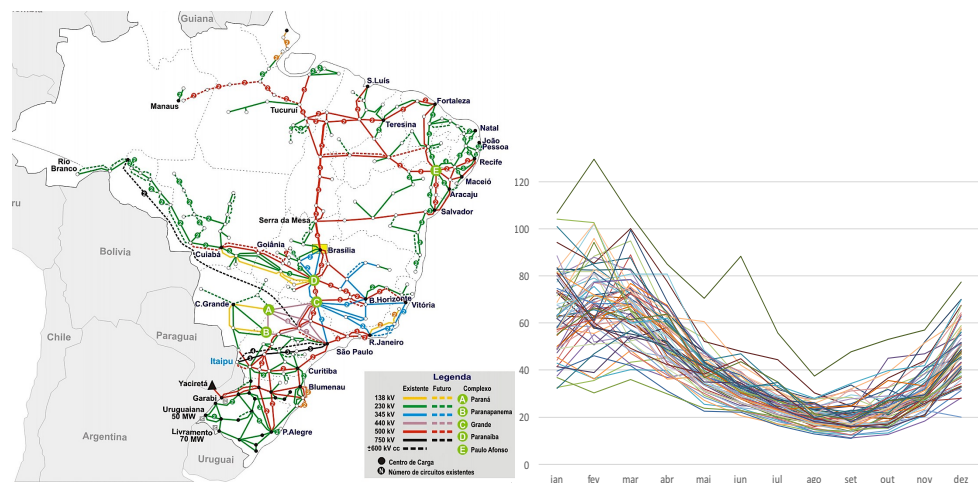
$$\frac{\sigma(w_t|w_{t-1})}{Demanda_t} = 37\%$$

- Volume armazenado em Jan/15:

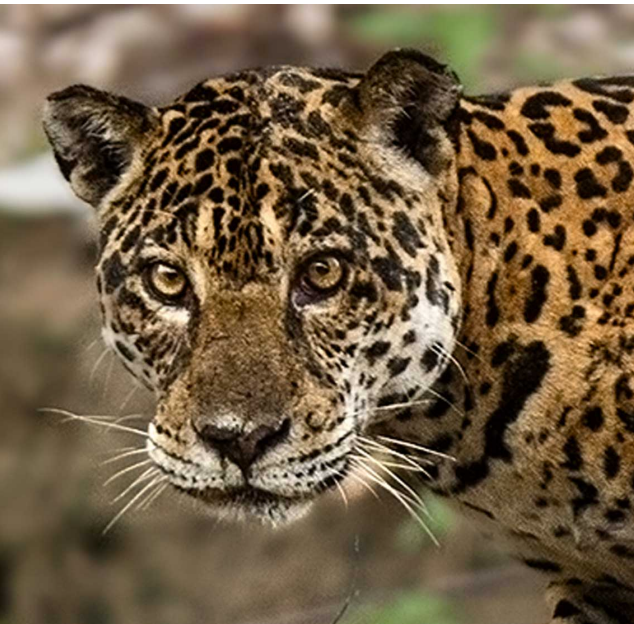
$$\frac{\sigma(w_t|w_{t-1})}{Volume_t} = 43\%$$

Operar um sistema com muita variabilidade

- Alta variabilidade de hidros sem reservatório
- Alta variabilidade das eólicas
- Contingências
- Restrições elétricas e capacidade de transmissão
- Relação armazenamento/carga diminuindo
- Critério de aversão a risco míope a esses desafios
- Expansão que não enxerga esse desafio



O fim dos grandes reservatórios chegou



O sistema passa a ser demandado em muitas dimensões

- Transmissão operando em diversos modos, não só para transferir grandes blocos de energia como anteriormente
- Reservas hídrica e térmica vs. transmissão e reservatórios
- Multiplicidade de pontos operativos



O sistema passa a ser demandado em muitas dimensões

- Transmissão operando em diversos modos, não só para transferir grandes blocos de energia como anteriormente
- Reservas hídrica e térmica vs. transmissão e reservatórios
- **Multiplicidade de pontos operativos passa a revelar mais as discrepâncias entre planejamento e operação**



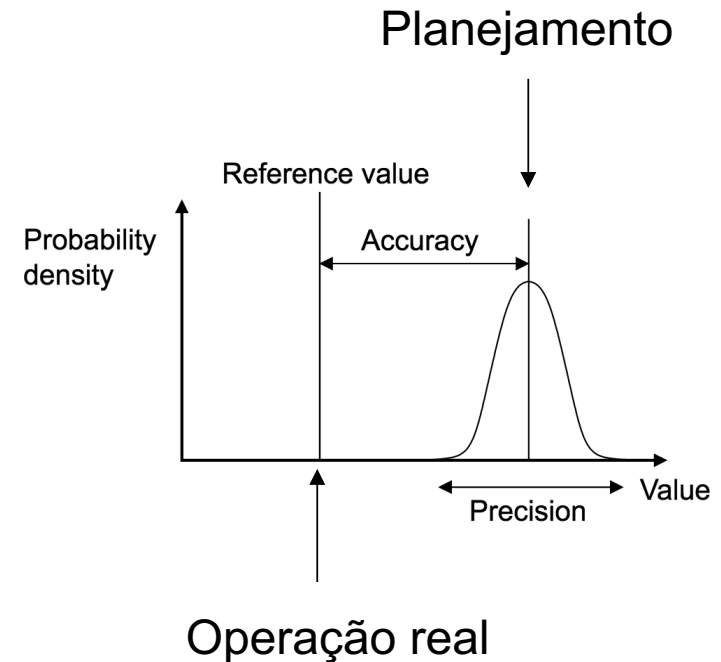
WWW.JESPERDELEURAN.DK

AGENDA

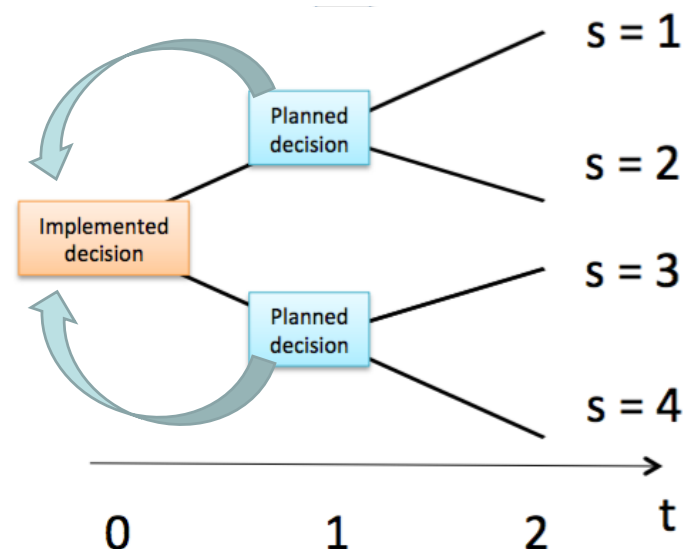
- Motivação
- Políticas de planejamento
- Custo da Inacurácia
- Considerações e Reflexões



“Our preference over feasible policies goes far beyond what we can express in a single objective function...”

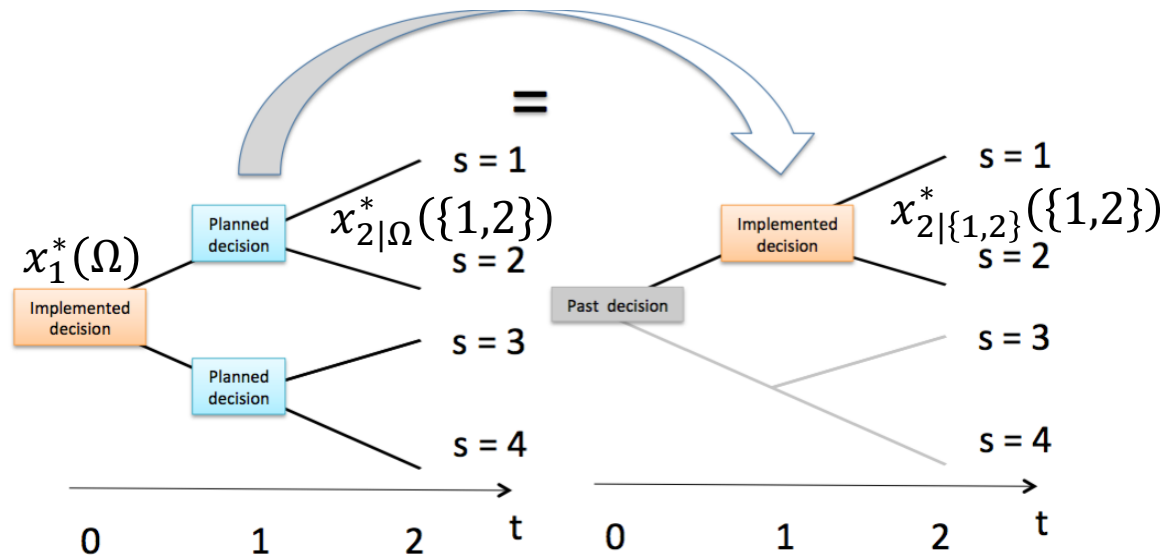


- Objetivam incorporar nas decisões de primeiro estágio (decisões implementadas) as flexibilidade e restrições que a dinâmica das decisões futuras apresentam respeitada a estrutura de revelação das incertezas
- Fazemos isso porque sabemos que não planejar o uso dos recursos gera um custo muito alto
 - Decisões implementadas: decisões de primeiro estágio condicionais obtidas pelo problema de controle em um dado estado
 - Decisões planejadas: aquelas utilizadas para modelar o custo e restrições da dinâmica com que as decisões serão implementadas no futuro



- As decisões planejadas são iguais ao que se implementa
 - $\{(x_t^*: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n)\}_{t=1}^T$, obtida em, por exemplo, $t=1$, é consistente se e somente se as decisões planejadas forem ótimas para o modelo de implementação futuro:

$$\{x_t^*\}_{t=\tau}^T \in \arg \min_{x_{\tau+1}, \dots, x_T} \left\{ \rho_{\tau, T} [f(x_{\tau}, \xi_{\tau}), \dots, f_T(x_T, \xi_T)] \mid x_t \in \mathcal{X}_t(x_{t-1}, \xi_t), t = \tau + 1, \dots, T \right\}$$



A. Shapiro, A. Pichler, "Time and Dynamic Consistency of Risk Averse Stochastic Programs". Optimization On-line, 2016.

- Assessing the Cost of Time-Inconsistent Operation Policies in Hydrothermal Power Systems

- <http://www.lamps.ind.puc-rio.br/en/publicacao/assessing-the-cost-of-time-inconsistent-operation-policies-in-hydrothermal-power-systems/>

$$\min_{g_t, y_t, f_t} c_t g_t + Q_{t+1}^{plan}(v_t)$$

Sujeito a:

$$A_t g_t + P_t u_t + C_t f_t = d_t$$

$$v_t + u_t + s_t = v_{t-1} + w_{t,\omega}$$

$$(y_t, g_t, f_t) \in \mathcal{X}_t^{plan}$$

Modelo de Planejamento

(Geralmente mais simplificado)

Modelo utilizado para calcular o valor da água

$$\min_{g_t, y_t, f_t} c_t g_t + Q_{t+1}^{plan}(v_t)$$

Sujeito a:

$$A_t g_t + P_t u_t + C_t f_t = d_t$$

$$v_t + u_t + s_t = v_{t-1} + w_{t,\omega}$$

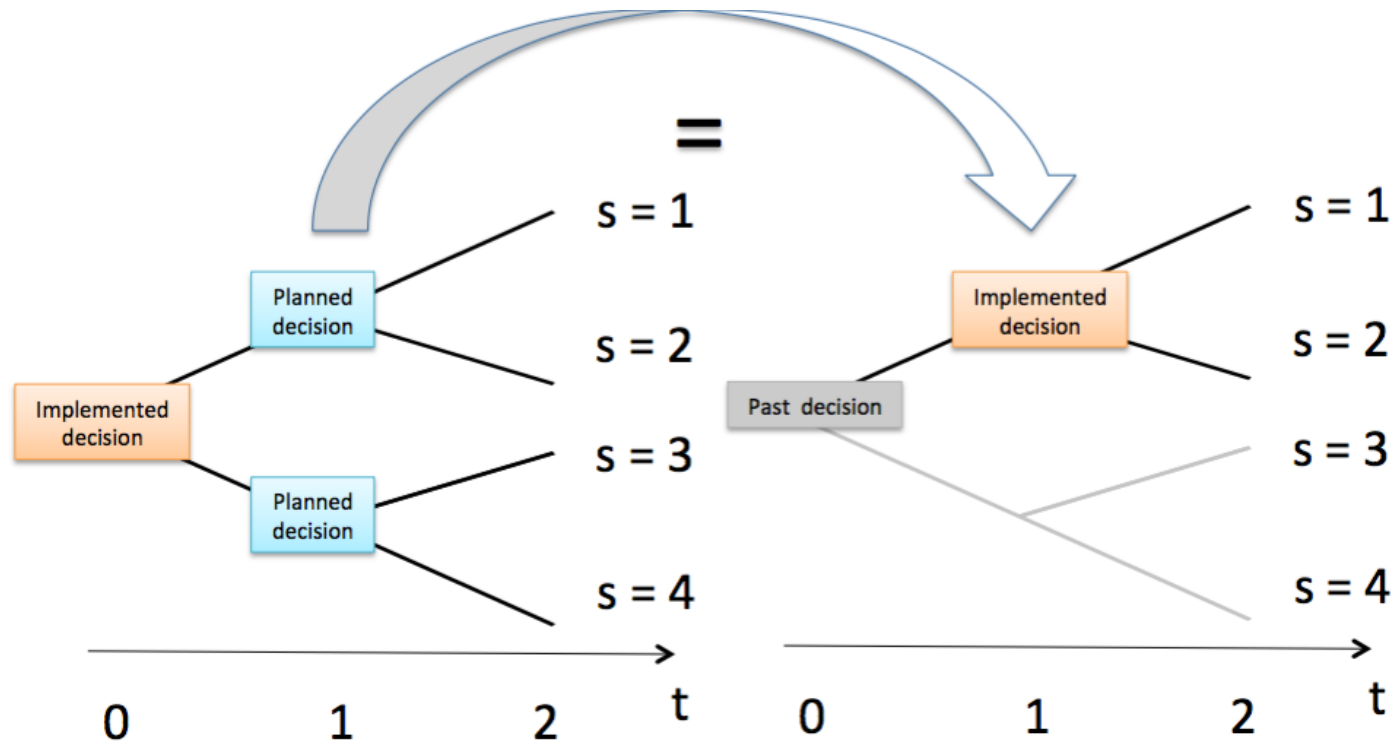
$$(y_t, g_t, f_t) \in \mathcal{X}_t^{imp}$$

Modelo de Implementação

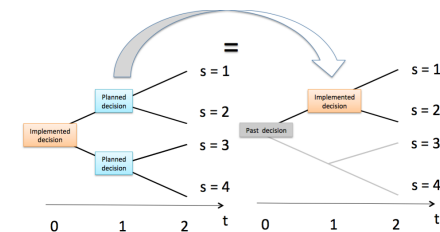
(Geralmente mais detalhado)

Modelo utilizado para tomar a decisão em t

$$GAP = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \sum_{\omega=1}^M c_t^\top g_{t,\omega}^{Imp} - \frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \sum_{\omega=1}^M c_t^\top g_{t,\omega}^{Plan}$$



- Simplificações
 - restrições de transmissão, critério de segurança, agregação dos reservatórios, não linearidades (fluxo de potência, curvas de produtividade, unit commitment), estrutura de revelação da informação (hazard-decision)
 - Se não representamos as adversidades de curto prazo, a necessidade de recursos para superá-las não ganha valor. Estaremos sempre levando sustos
- Não antecipação de mudanças nos parâmetros de aversão a risco e dados do sistema (expansão, melhorias, etc)
 - Precisamos de metodologias para atenuar esses efeitos



AGENDA

- Motivação
- Políticas de planejamento
- **Custo da Inacurácia**
- Considerações e Reflexões



Simplificações devido a restrições de transmissão e n-1

- O efeito acumulado não é desprezível

TABLE III

COST COMPARISON: INCONSISTENT VS PLANNING POLICIES (MMR\$).

	GAP	Planning policy	Inconsistent policy	Consistent policy
95% CI upper bound	3,890.89	3,407.20	7,165.59	3,675.77
Sample average	111%	3,303.18	6,989.61	+8%
95% CI lower bound	3,481.99	3,199.15	6,813.63	3,457.80

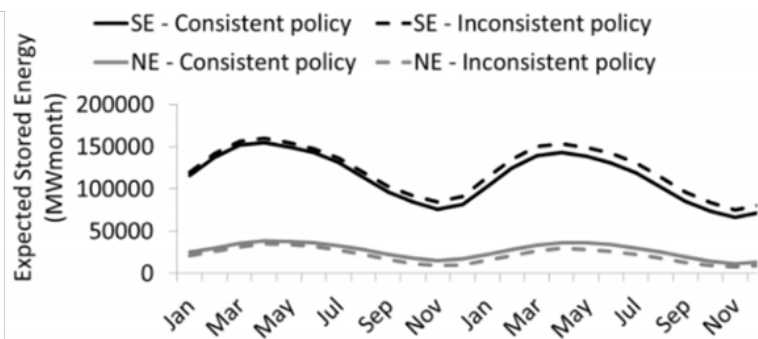


Fig. 8. Southeastern and Northeastern stored energy.

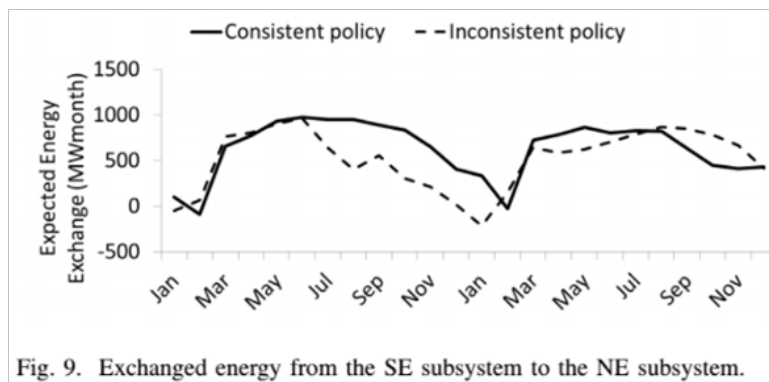


Fig. 9. Exchanged energy from the SE subsystem to the NE subsystem.

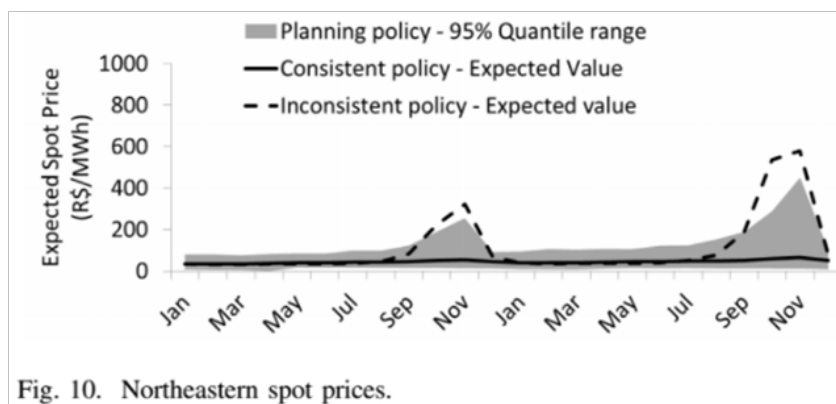


Fig. 10. Northeastern spot prices.

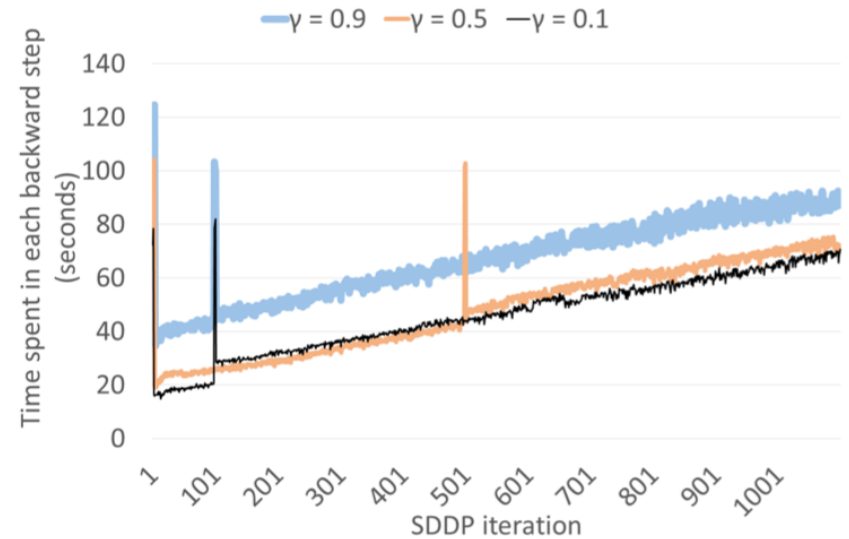
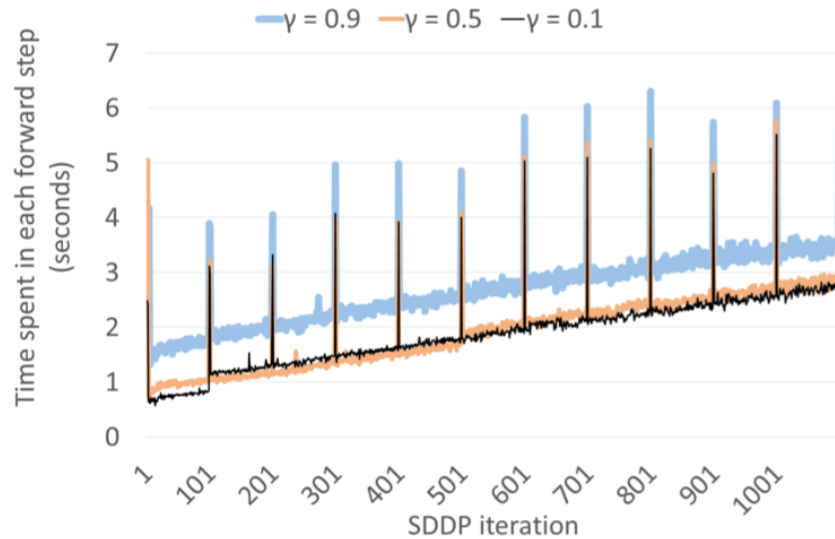


Fig. 1. Time spent (seconds) in each forward (left) and backward (right) steps.

Case	Lower bound (z) (10^6 R\$)	Operational cost (\bar{z}) (10^6 R\$)			System-wide Up-reserves (% of total demand)			System-wide Down-reserves (% of total demand)			Running time (hours)			$ C^* $	$\frac{ C^* }{ C }$
		CI(95%) LB	Sample average	CI(95%) UB	$Q_{2.5\%}$	Sample average	$Q_{97.5\%}$	$Q_{2.5\%}$	Sample average	$Q_{2.5\%}$					
											FCD	CCG _{MILP}	CCG _{INSP}		
$n - 0$	13,483.17	14,889.61	15,165.83	15,442.07	-	-	-	-	-	-	6.7	-	-	-	-
$n_T - 1$	13,729.48	15,570.95	15,850.17	16,129.40	0.82	0.95	1.06	0.82	0.96	1.07	22.9	13.8	12.5	3	30.0%
$n_{GT} - 1$	13,868.83	15,707.45	15,988.48	16,269.51	0.91	1.18	1.51	0.83	0.97	1.11	#	19.8	19.8	7	6.67%
$n_{GT} - 2$	18,463.96	21,600.69	21,924.60	22,248.52	3.51	4.00	4.44	3.78	4.45	5.17	#	27.0	53.6	12	0.22%

"Spoiler" da Dissertação André Lawson: será defendida até o fim do ano

Decision-hazard

Decisões de despacho dos geradores térmicos realizada sob incerteza

Modelo de dois estágios por nó da PDDE

Implementação prática realizada via aumento de estado



Proposição

$$\tilde{Q}_t^m(v_{t-1}, g_{t|t-1}^o, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{\alpha_{t+1}, g_{t+1|t}^o, u_{t,\omega}, \\ v_{t,\omega}, d_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_t + c^{def} \mathbb{I}' d_t + \alpha_{t+1}$$

s.a

$$A f_{t,\omega} + B g_{t,\omega} + P u_{t,\omega} = D_t - d_{t,\omega}$$

$$v_{t,\omega} = v_{t-1} - H(u_{t,\omega} + s_{t,\omega}) + w_{t,\omega} \quad (: \pi_t)$$

$$g_{j,t,\omega} = g_{j,t|t-1}^o \quad \forall j \in J \quad (: \gamma_{j,t})$$

$$(g_{t+1|t}^o, g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, d_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

$$\alpha_{t+1} \geq \tilde{Q}_{t+1}^k(v_t^k, g_{t+1|t}^{o,k}) + \tilde{\pi}_{t+1}^{v,k}(v_{t,\omega} - v_t^k) + \sum_{j \in J} \tilde{\gamma}_{j,t+1}^k(g_{j,t+1|t}^o - g_{j,t+1|t}^{o,k}) \quad \forall k \leq m$$

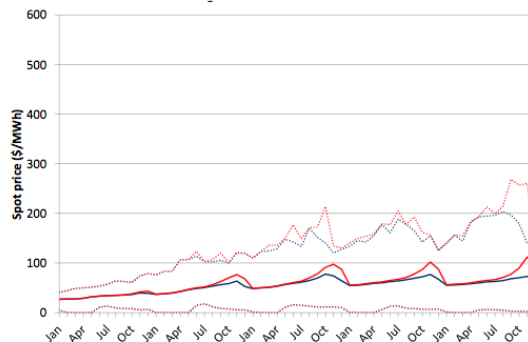
$$\text{Onde,} \quad \tilde{\pi}_{t+1}^{v,k} = \sum_{\omega \in \Omega_{t+1}} p_\omega \tilde{\pi}_{t+1,\omega}^{v,k};$$

$$\tilde{\gamma}_{j,t+1}^k = \sum_{\omega \in \Omega_{t+1}} p_\omega \tilde{\gamma}_{j,t+1,\omega}^k$$

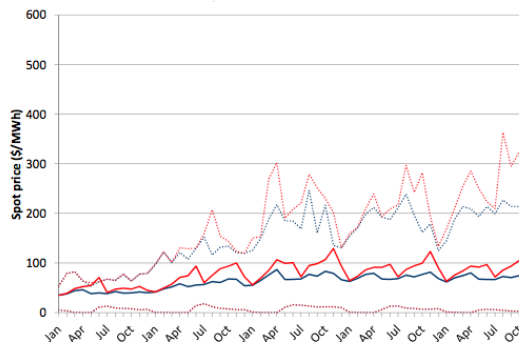
"Spoiler" da Dissertação André Lawson: será defendida até o fim do ano

Efeitos similares

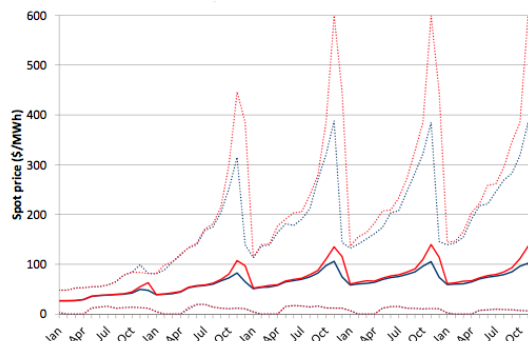
— Planning Avg Planning 5% Planning 95% — Inconsistent Avg Inconsistent 5% Inconsistent 95%



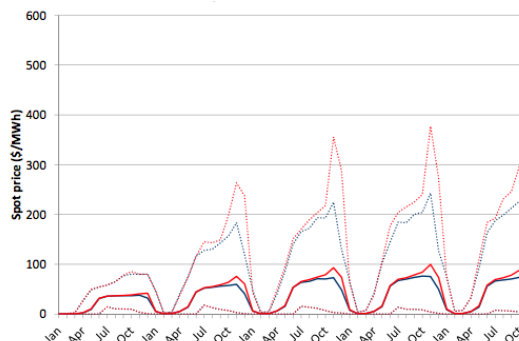
(a) SE Subsystem



(b) S Subsystem



(c) NE Subsystem



(d) N Subsystem

Fig. 5.2: Spot prices for planning and inconsistent policies

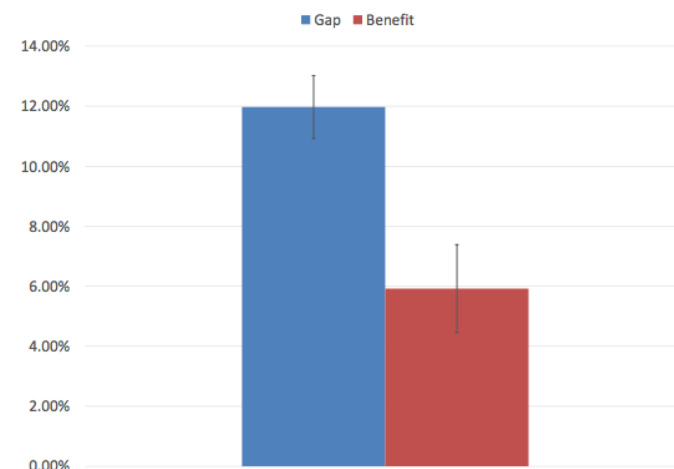


Fig. 5.3: Inconsistency gap and consistency benefit

Tab. 5.4: Elapsed time (sec)

Algorithm	Iterations	Simulation	Total
HD	1535	223	1758
DH Naive	25003	12178	37181
DH Augmented state	6699	1981	8680

Atuais dificuldades do Sistema Brasileiro

- Reservatórios que não enchem mais
- GSF sistematicamente abaixo de 1
 - Judicialização do setor
- PLD's imprevisíveis com incerteza desproporcional:
 - Redução de atratividade e financiabilidade
- Garantias físicas que não refletem a operação
- COP, CEC e ICB's otimistas
- Leilões alocando recursos de longo prazo de maneira inconsistente (otimista)

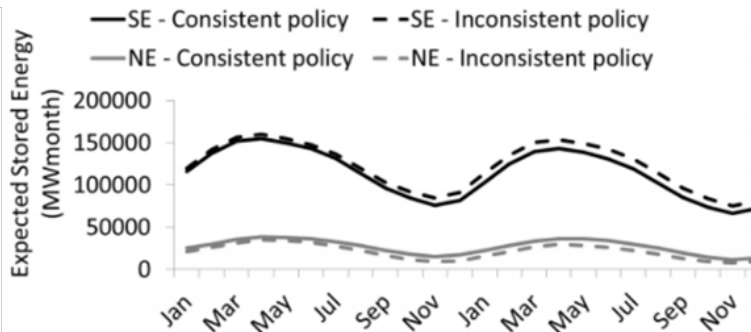


Fig. 8. Southeastern and Northeastern stored energy.



Fig. 10. Northeastern spot prices.

Qualquer política será inconsistente! O que fazer então?

- Caracterizar “bem” as incertezas e a política de decisão através da PDDE e aproximar as características do sistema
 - A escola PDDE defende a incorporação aproximada de *features* na PDDE
- Caracterizar “bem” as restrições operativas e aproximar o efeito da política de decisão sob incerteza
 - Impondo regras que emulam o efeito de uma “política ótima”, mesmo considerando apenas um cenário
- Ambos os casos são heurísticas para resolver o problema real
- Como sabemos qual a melhor política?

AGENDA

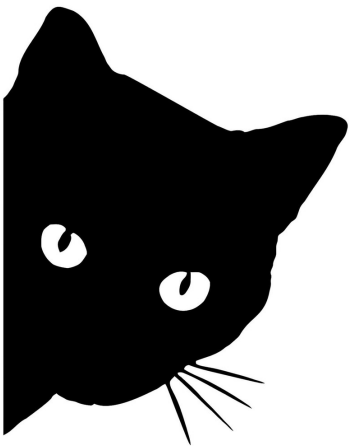
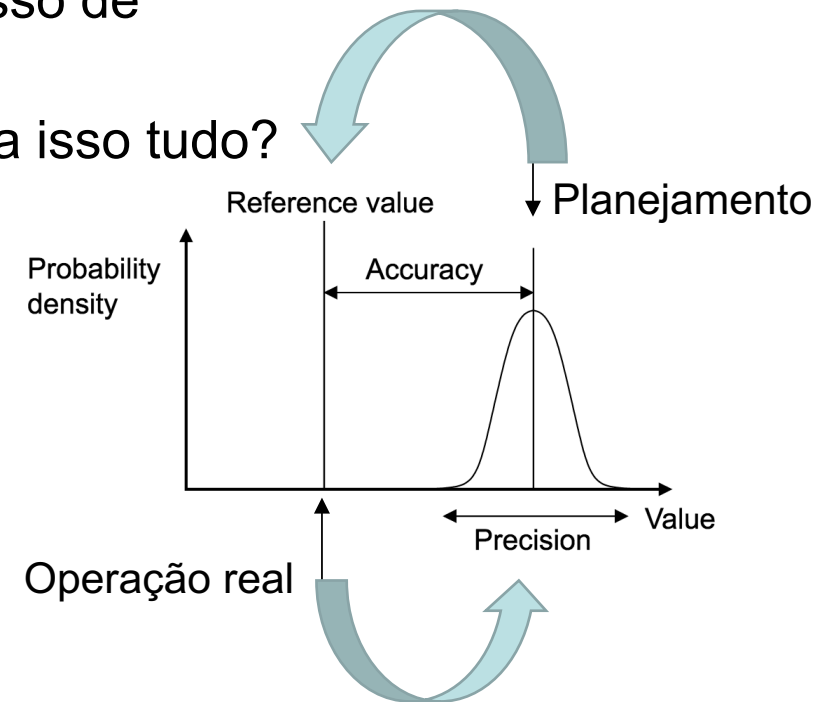
- Motivação
- Políticas de planejamento
- Custo da Inacurácia
- Considerações e Reflexões



- O planejamento existe para antecipar dificuldades e oportunidades
- O mundo é inconsistente, não tem jeito!
- Mas existem inconsistências que são potencialmente muito perigosas: “é melhor errar e verter do que errar e dar déficit”
- Como saber qual a melhor política?
 - SIMULADOR DE ALTA ACURÁCIA: capaz de simular com acurácia o sistema em um longo horizonte temporal sob múltiplos cenários
 - Impulsiona a necessidade do DESSEM
- Cuidado! O simulador não resolve o problema!!!
 - Precisamos identificar as *características* que restringem a operação de curto prazo e levá-las, de maneira robusta (garantir viabilidade), para o planejamento. Caso contrário, o valor dos recursos necessários para contorná-las não aparecerá e eles não serão programados.

O modelo de planejamento é a pedra fundamental do setor

1. Como acelerar a convergência entre modelos e operação real?
2. Como induzir o operador à consistência entre planejado e realizado?
3. Como garantir dados realistas e políticas de medição, acompanhamento, e melhoria do processo de planejamento/operação?
4. Qual a estrutura institucional que induz a isso tudo?



Obrigado! Visite nossa página para mais informações
www.puc-rio.br/lamps



[ABOUT US](#)

[TEAM](#)

[RESEARCH](#)

[PROJECTS](#)

[PUBLICATIONS](#)

[NEWS](#)

[CONTACT](#)



Laboratory of Applied Mathematical Programming and Statistics

Laboratory for research and development on mathematical programming (optimization) and statistics to resolve relevant issues for industry and society, in particular for energy and financial sectors. LAMPS comprises professors, researchers and students associated with the Electrical and Industrial Engineering Departments of Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio), Brazil.

AGENDA

- Motivação
- Políticas de planejamento
- Custo da Inacurácia
- Considerações e Reflexões
- Material Extra

- O Sistema tem que sobreviver à perda de até K componentes: usualmente os critérios n-1 e n-2 são usados na prática
- A cada estágio do SDDP temos que resolver um problema com um conjunto combinatório de restrições

$$\begin{aligned}
 Q_t(v_{t-1}, \mathbf{w}_{t,\omega}) = & \min_{\substack{\phi_t^+, \phi_t^-, \phi_t^{+c}, \phi_t^{-c} \\ g_t, y_t, f_t, \theta_t, \\ \Delta u_t^{up}, \Delta u_t^{dn}, \\ \Delta g_t^{up}, \Delta g_t^{dn} \\ g_t^c, y_t^c, f_t^c, \theta_t^c}} c_t^\top g_t + \sum_{i \in \mathcal{I}^T} (c_i^U \Delta g_{t,i}^{up} + c_i^D \Delta g_{t,i}^{dn}) + \\ & \sum_{i \in \mathcal{I}^H} (c_i^U \Delta u_{t,i}^{up} + c_i^D \Delta u_{t,i}^{dn}) + \\ & C^{Imb}(\phi_t^+ + \phi_t^-, \max_{c \in \mathcal{C}} \{\phi_t^{+c} + \phi_t^{-c}\}) + Q_{t+1}(v_t) \quad (1)
 \end{aligned}$$

subject to

$$\begin{aligned}
 (2) \quad & Ag_t + By_t + Cf_t + \phi_t^+ - \phi_t^- = d_t \\
 (3) \quad & v_t = v_{t-1} - H_t y_t + \mathbf{w}_{t,\omega} : (\pi_{t,\omega}) \\
 (4) \quad & f_t = S\theta_t \\
 (5) \quad & u_t + \Delta u_t^{up} \leq \bar{U}_t \\
 (6) \quad & u_t - \Delta u_t^{dn} \geq \underline{U}_t \\
 (7) \quad & g_t + \Delta g_t^{up} \leq \bar{G}_t \\
 (8) \quad & g_t - \Delta g_t^{dn} \geq \underline{G}_t \\
 (9) \quad & f_t \in \mathcal{F}_t, y_t \in \mathcal{Y}_t, g_t \in \mathcal{G}_t \\
 (10) \quad & (\Delta u_t^{up}, \Delta u_t^{dn}, \Delta g_t^{up}, \Delta g_t^{dn}) \in \mathcal{R} \\
 (11) \quad & Ag_t^c + By_t^c + Cf_t^c + \phi_t^{+c} - \phi_t^{-c} = d_t; \forall c \in \mathcal{C} \\
 (12) \quad & v_t^c = v_{t-1} - H_t^c y_t^c + \mathbf{w}_{t,\omega} : (\pi_{t,\omega}^c); \forall c \in \mathcal{C} \\
 (13) \quad & f_t^c = Z_t^c S^c \theta_t^c; \forall c \in \mathcal{C} \\
 (14) \quad & v_t^c \geq \gamma v_t; \forall c \in \mathcal{C} \\
 (15) \quad & Z_u^c(u_t - \Delta u_t^{dn}) \leq u_t^c \leq Z_u^c(u_t + \Delta u_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \\
 (16) \quad & Z_g^c(g_t - \Delta g_t^{dn}) \leq g_t^c \leq Z_g^c(g_t + \Delta g_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \\
 (17) \quad & f_t^c \in \mathcal{F}_t, y_t^c \in \mathcal{Y}_t, g_t^c \in \mathcal{G}_t, v_t^c \in \mathcal{V}_t; \forall c \in \mathcal{C}
 \end{aligned}$$

- O Sistema tem que sobreviver à perda de até K componentes: usualmente os critérios n-1 e n-2 são usados na prática
- A cada estágio do SDDP temos que resolver um problema com um conjunto combinatório de restrições

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{\phi_t^+, \phi_t^-, \phi_t^{+c}, \phi_t^{-c} \\ g_t, y_t, f_t, \theta_t, \\ \Delta u_t^{up}, \Delta u_t^{dn}, \\ \Delta g_t^{up}, \Delta g_t^{dn} \\ g_t^c, y_t^c, f_t^c, \theta_t^c}} c_t^\top g_t + \sum_{i \in \mathcal{I}^T} (c_i^U \Delta g_{t,i}^{up} + c_i^D \Delta g_{t,i}^{dn}) + \sum_{i \in \mathcal{I}^H} (c_i^U \Delta u_{t,i}^{up} + c_i^D \Delta u_{t,i}^{dn}) + C^{Imb}(\phi_t^+ + \phi_t^-, \max_{c \in \mathcal{C}} \{\phi_t^{+c} + \phi_t^{-c}\}) + Q_{t+1}(v_t) \quad (1)$$

subject to

$$Ag_t + By_t + Cf_t + \phi_t^+ - \phi_t^- = d_t \quad (2)$$

$$v_t = v_{t-1} - H_t y_t + w_{t,\omega} : (\pi_{t,\omega}) \quad (3)$$

$$f_t = S\theta_t \quad (4)$$

$$u_t + \Delta u_t^{up} \leq \bar{U}_t \quad \text{Pré-contingência} \quad (5)$$

$$u_t - \Delta u_t^{dn} \geq \underline{U}_t \quad (6)$$

$$g_t + \Delta g_t^{up} \leq \bar{G}_t \quad \text{Pré-contingência} \quad (7)$$

$$g_t - \Delta g_t^{dn} \geq \underline{G}_t \quad (8)$$

$$f_t \in \mathcal{F}_t, y_t \in \mathcal{Y}_t, g_t \in \mathcal{G}_t \quad (9)$$

$$(\Delta u_t^{up}, \Delta u_t^{dn}, \Delta g_t^{up}, \Delta g_t^{dn}) \in \mathcal{R} \quad (10)$$

$$Ag_t^c + By_t^c + Cf_t^c + \phi_t^{+c} - \phi_t^{-c} = d_t; \forall c \in \mathcal{C} \quad (11)$$

$$v_t^c = v_{t-1} - H_t^c y_t^c + w_{t,\omega} : (\pi_{t,\omega}^c); \forall c \in \mathcal{C} \quad (12)$$

$$f_t^c = Z_t^c S^c \theta_t^c; \forall c \in \mathcal{C} \quad (13)$$

$$v_t^c \geq \gamma v_t; \forall c \in \mathcal{C} \quad (14)$$

$$Z_u^c(u_t - \Delta u_t^{dn}) \leq u_t^c \leq Z_u^c(u_t + \Delta u_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \quad (15)$$

$$Z_g^c(g_t - \Delta g_t^{dn}) \leq g_t^c \leq Z_g^c(g_t + \Delta g_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \quad (16)$$

$$f_t^c \in \mathcal{F}_t, y_t^c \in \mathcal{Y}_t, g_t^c \in \mathcal{G}_t, v_t^c \in \mathcal{V}_t; \forall c \in \mathcal{C} \quad (17)$$

- O Sistema tem que sobreviver à perda de até K componentes: usualmente os critérios n-1 e n-2 são usados na prática
- A cada estágio do SDDP temos que resolver um problema com um conjunto combinatório de restrições

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{\phi_t^+, \phi_t^-, \phi_t^{+c}, \phi_t^{-c} \\ g_t, y_t, f_t, \theta_t, \\ \Delta u_t^{up}, \Delta u_t^{dn}, \\ \Delta g_t^{up}, \Delta g_t^{dn} \\ g_t^c, y_t^c, f_t^c, \theta_t^c}} c_t^\top g_t + \sum_{i \in \mathcal{I}^T} (c_i^U \Delta g_{t,i}^{up} + c_i^D \Delta g_{t,i}^{dn}) + \sum_{i \in \mathcal{I}^H} (c_i^U \Delta u_{t,i}^{up} + c_i^D \Delta u_{t,i}^{dn}) + C^{Imb}(\phi_t^+ + \phi_t^-, \max_{c \in \mathcal{C}} \{\phi_t^{+c} + \phi_t^{-c}\}) + Q_{t+1}(v_t) \quad (1)$$

subject to

$$Ag_t + By_t + Cf_t + \phi_t^+ - \phi_t^- = d_t \quad (2)$$

$$v_t = v_{t-1} - H_t y_t + w_{t,\omega} : (\pi_{t,\omega}) \quad (3)$$

$$f_t = S\theta_t \quad (4)$$

$$u_t + \Delta u_t^{up} \leq \bar{U}_t \quad (5)$$

$$u_t - \Delta u_t^{dn} \geq \underline{U}_t \quad (6)$$

$$g_t + \Delta g_t^{up} \leq \bar{G}_t \quad (7)$$

$$g_t - \Delta g_t^{dn} \geq \underline{G}_t \quad (8)$$

$$f_t \in \mathcal{F}_t, y_t \in \mathcal{Y}_t, g_t \in \mathcal{G}_t \quad (9)$$

$$(\Delta u_t^{up}, \Delta u_t^{dn}, \Delta g_t^{up}, \Delta g_t^{dn}) \in \mathcal{R} \quad (10)$$

$$Ag_t^c + By_t^c + Cf_t^c + \phi_t^{+c} - \phi_t^{-c} = d_t; \forall c \in \mathcal{C} \quad (11)$$

$$v_t^c = v_{t-1} - H_t^c y_t^c + w_{t,\omega} : (\pi_{t,\omega}^c); \forall c \in \mathcal{C} \quad (12)$$

$$f_t^c = Z_l^c S^c \theta_t^c; \forall c \in \mathcal{C} \quad (13)$$

$$v_t^c \geq \gamma v_t; \forall c \in \mathcal{C} \quad (14)$$

$$Z_u^c(u_t - \Delta u_t^{dn}) \leq u_t^c \leq Z_u^c(u_t + \Delta u_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \quad (15)$$

$$Z_g^c(g_t - \Delta g_t^{dn}) \leq g_t^c \leq Z_g^c(g_t + \Delta g_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \quad (16)$$

$$f_t^c \in \mathcal{F}_t, y_t^c \in \mathcal{Y}_t, g_t^c \in \mathcal{G}_t, v_t^c \in \mathcal{V}_t; \forall c \in \mathcal{C} \quad (17)$$

Pós-contingência

- Temos que considerar todas os possíveis estados pós-contingência em cada subproblema da PDDE!

Para n-2

Todos os vetores binários

com 2 zeros: $\xi(\omega) = [1111011110111]^T$

n	K = 1	K = 2	K = 3
3	3	3	1
10	10	45	120
50	50	1,225	19,600
100	100	4,950	161,700
150	150	11,175	551,300
200	200	19,900	1,313,400
250	250	31,125	2,573,000
300	300	44,850	4,455,100
350	350	61,075	7,084,700
400	400	79,800	10,586,800
450	450	101,025	15,086,400
500	500	124,750	20,708,500

Conjunto muito grande
de restrições de fluxo de
potência:
um para cada estado
pós-contingência

$$\underset{x \in \{0,1\}^n}{\text{minimize}} \quad c^T x + \alpha$$

subject to:

$$Ax \leq b$$

First stage problem

$$Tx - Wy(\xi(1)) \geq h(\xi(1))$$

$$Tx - Wy(\xi(2)) \geq h(\xi(2))$$

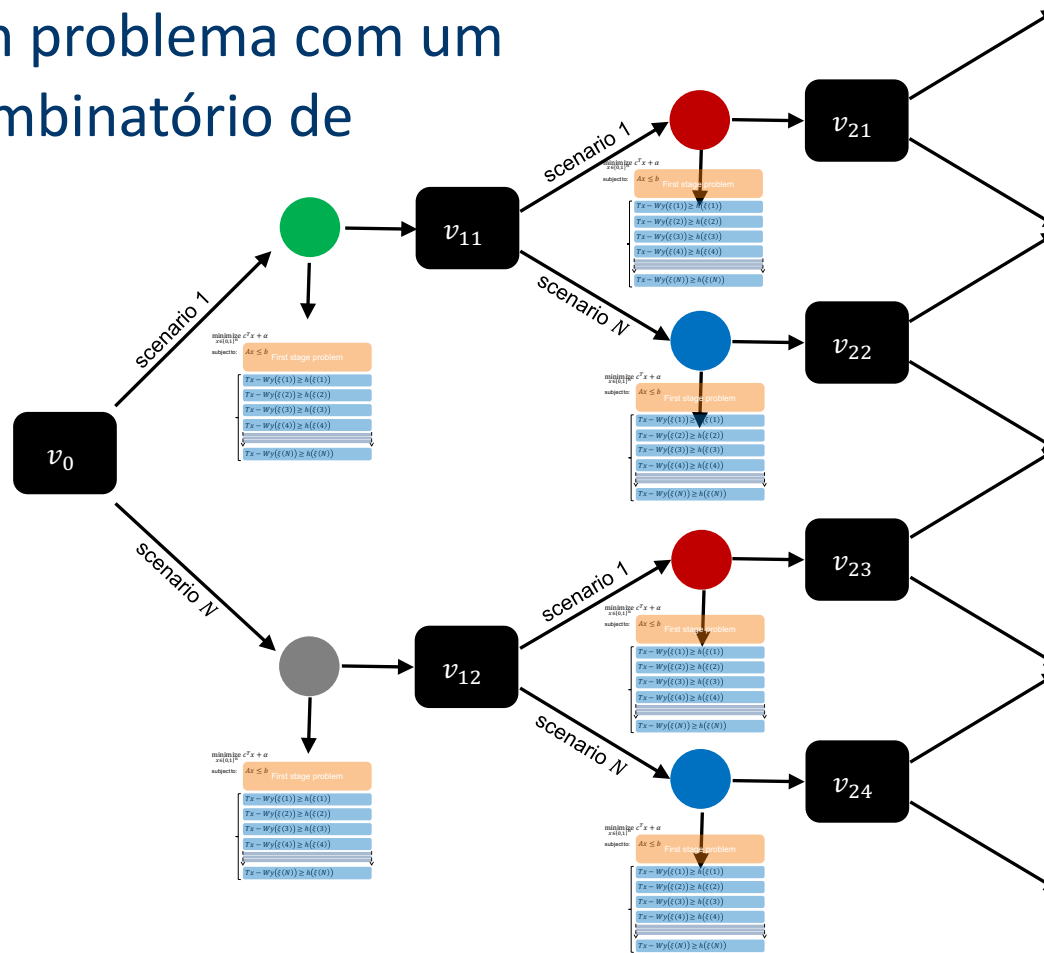
$$Tx - Wy(\xi(3)) \geq h(\xi(3))$$

$$Tx - Wy(\xi(4)) \geq h(\xi(4))$$

$$\vdots$$

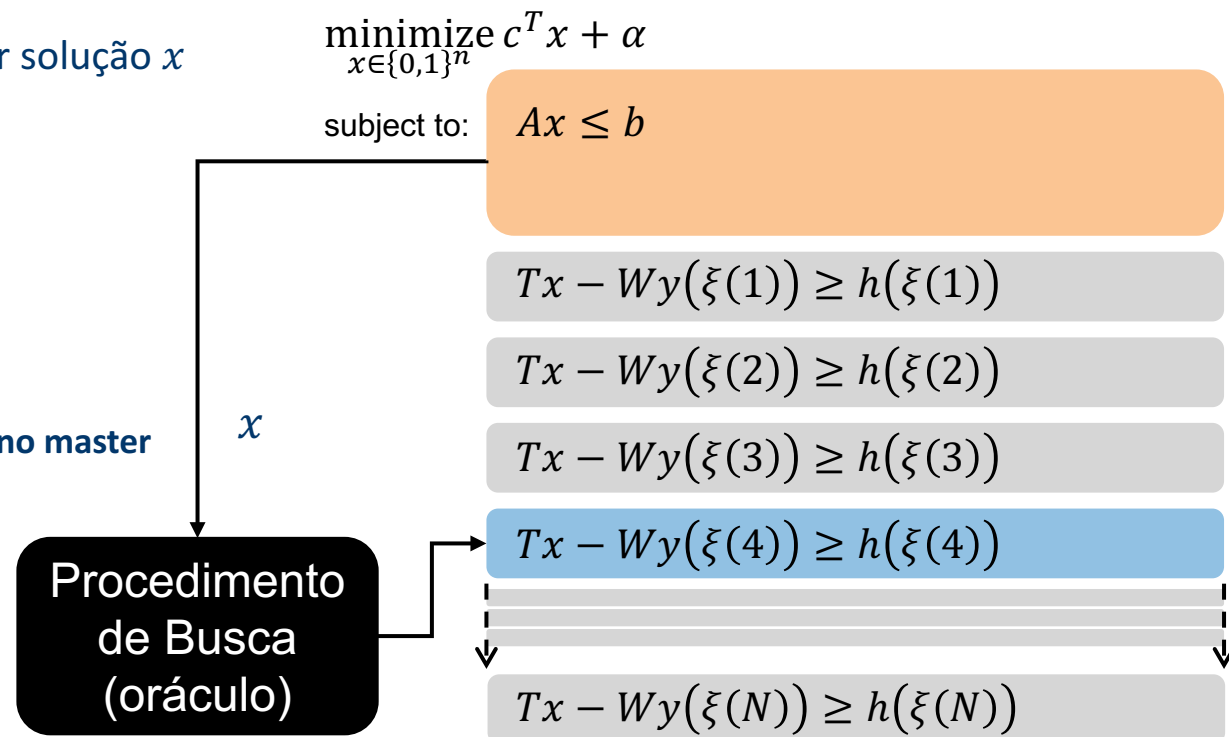
$$Tx - Wy(\xi(N)) \geq h(\xi(N))$$

Em cada nó da árvore temos que resolver um problema com um número combinatório de restrições



Geração de Coluna e Restrição (GCR) para resolver o problema robusto

1. Inicializar sem restrição pós-contingência
2. Resolver o master e encontrar solução x
3. Encontre estado mais violado
 - worst-case corte de carga
4. Corte de carga é zero?
 - Sim: Pare
 - **Não: adicione as restrições no master**
5. Volte ao passo 2



Geração de Coluna e Restrição (GCR) para resolver o problema robusto

1. Inicializar sem restrição pós-contingência
2. Resolver o master e encontrar solução x
3. Encontre estado mais violado
 - worst-case corte de carga
4. Corte de carga é zero?
 - **Sim: Pare**
 - Não: adicione as restrições no master
5. Volte ao passo 2

$$\underset{x \in \{0,1\}^n}{\text{minimize}} \quad c^T x + \alpha$$

$$\text{subject to:} \quad Ax \leq b$$

$$Tx - Wy(\xi(1)) \geq h(\xi(1))$$

$$Tx - Wy(\xi(2)) \geq h(\xi(2))$$

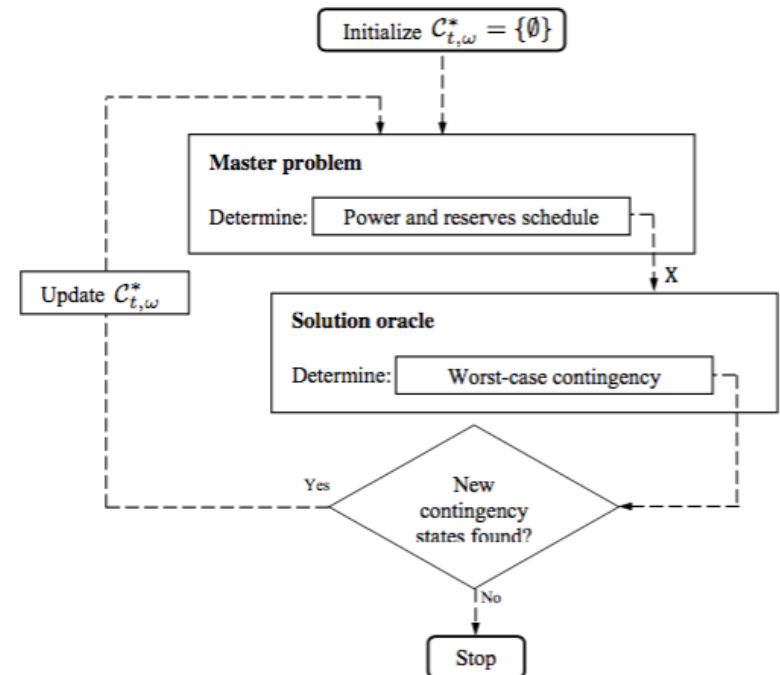
$$Tx - Wy(\xi(3)) \geq h(\xi(3))$$

$$Tx - Wy(\xi(4)) \geq h(\xi(4))$$

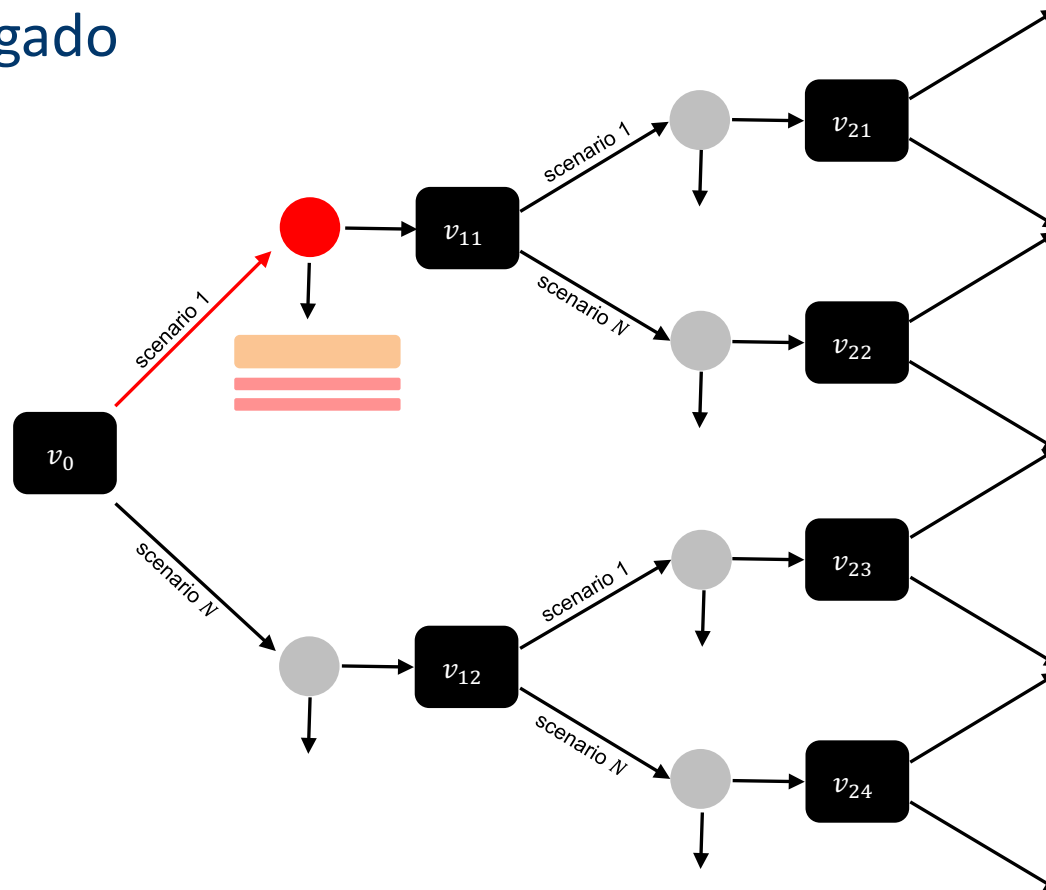
$$Tx - Wy(\xi(N)) \geq h(\xi(N))$$

Poucos cenários protegem contra muitos!
Propriedade de métricas de pior caso

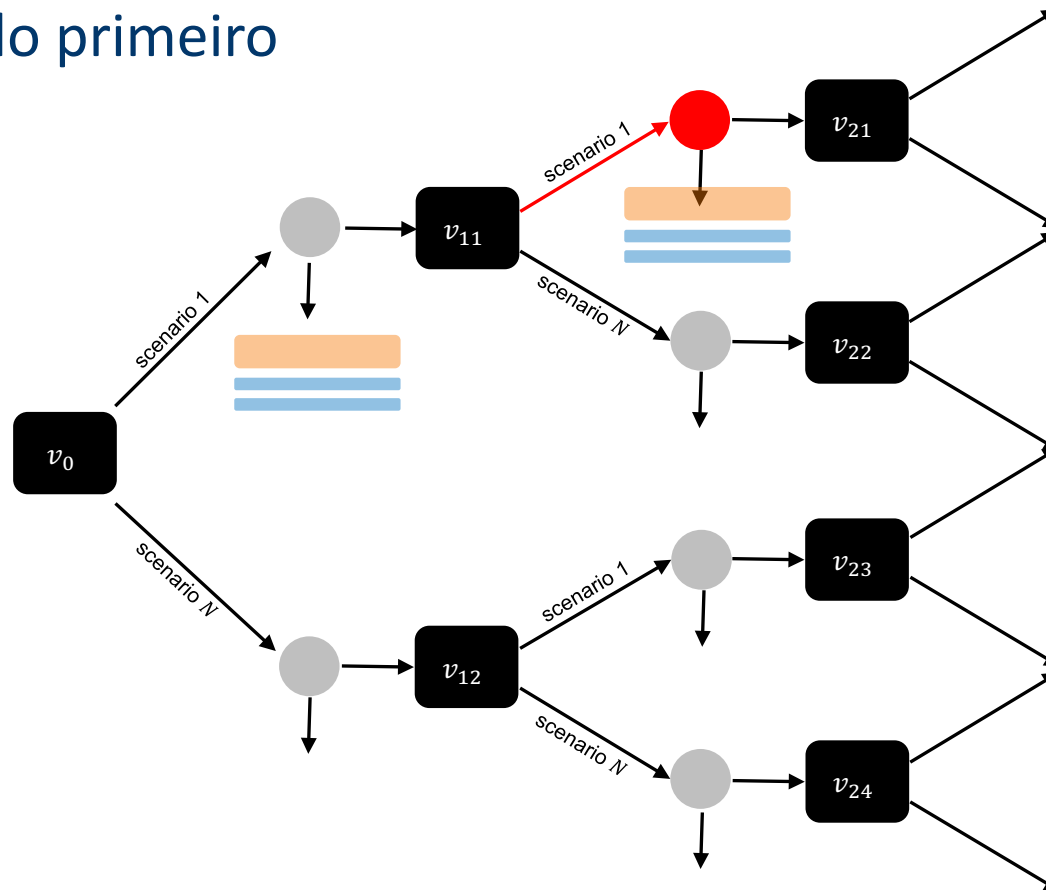
- Conjunto guarda-chuva de contingências
 - é pequeno
 - é robusto frente a mudanças no RHS
 - Pode ser compartilhado entre os problemas dos diversos nós da PDDE
 - O problema sem todas as restrições gera um limite inferior
- PDDE com a GCR
 - Aplicar a GCR em cada cenários da PDDE
 - Utilizar as contingências identificadas em cenários e estágios anteriores para inicializar a GCR de um dado subproblema.
 - Desligar o oráculo depois de uma iteração forward completa sem encontrar restrições violadas
 - Após um dado número de iterações, religar o oráculo



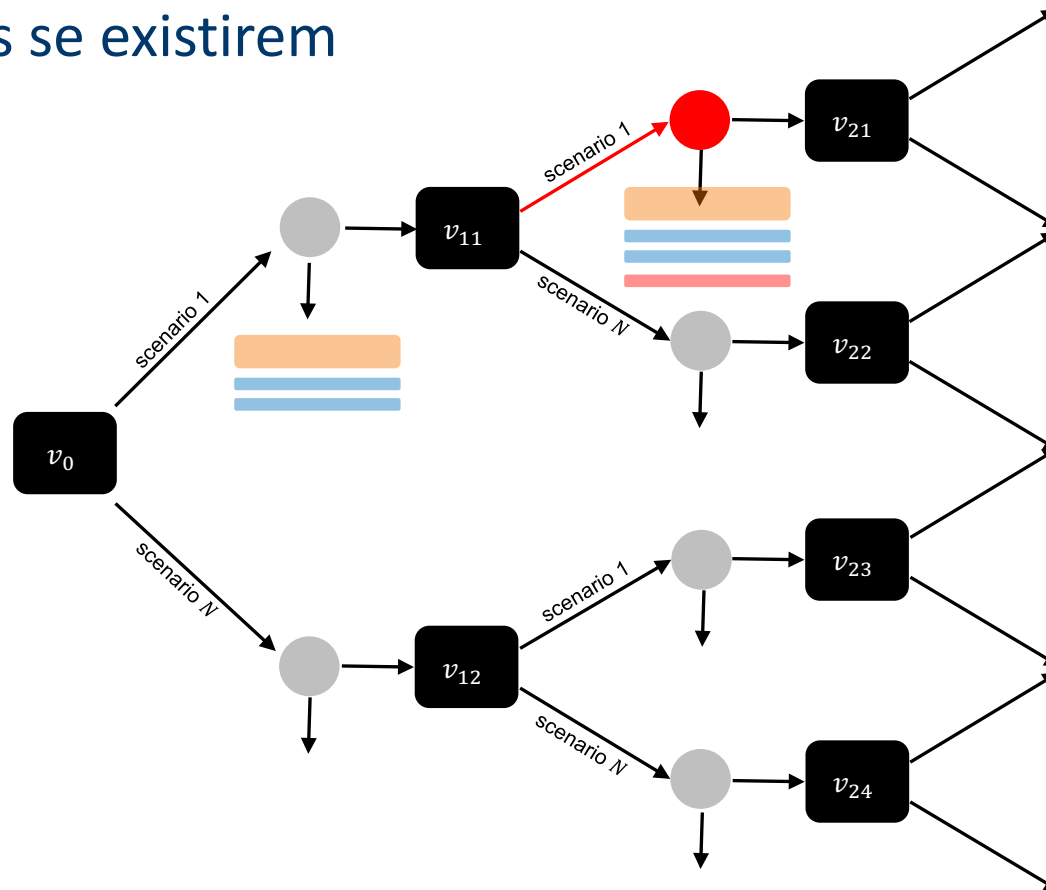
Resolver o primeiro problema com
o oráculo ligado



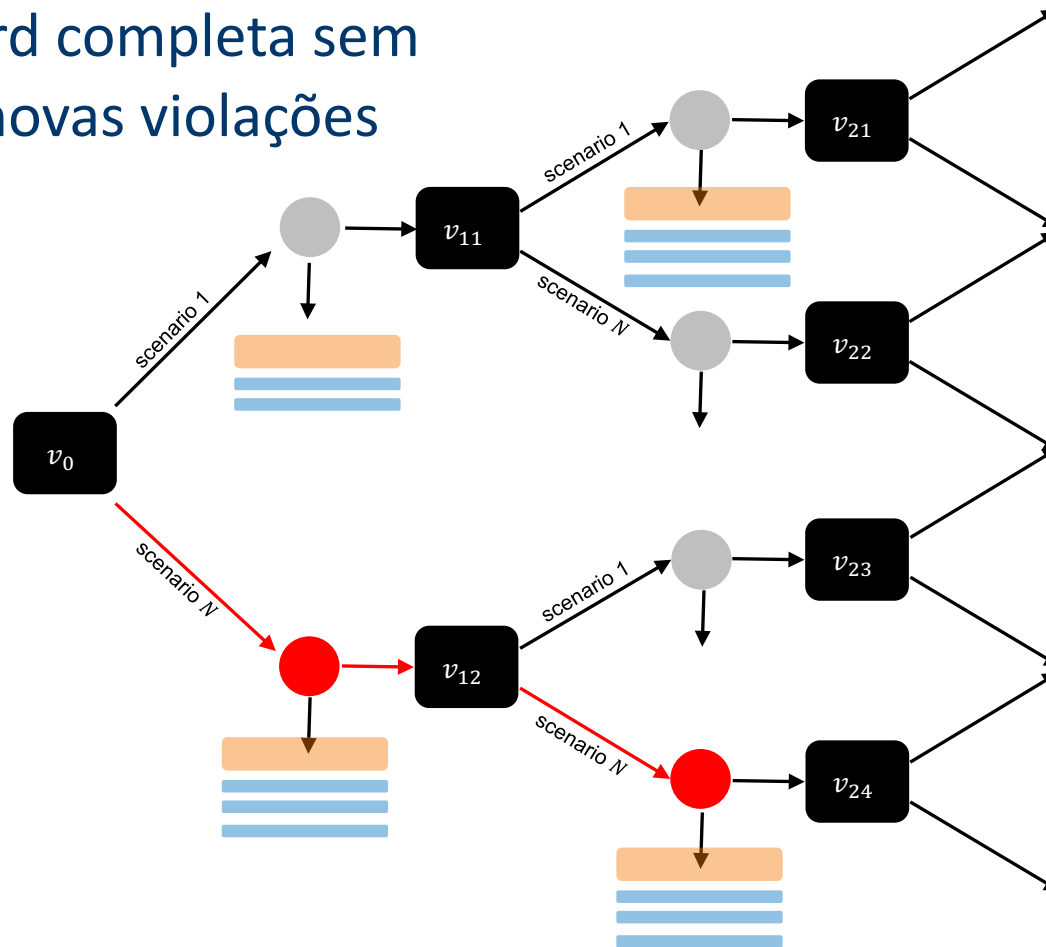
O segundo problema já utiliza as restrições do primeiro



Novas restrições violadas são adicionadas se existirem



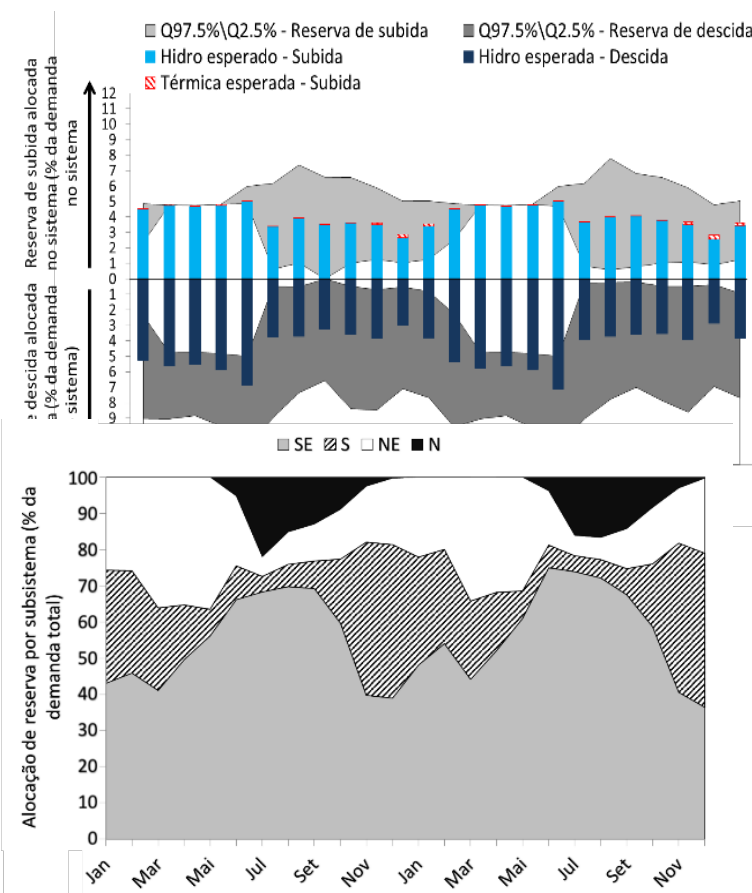
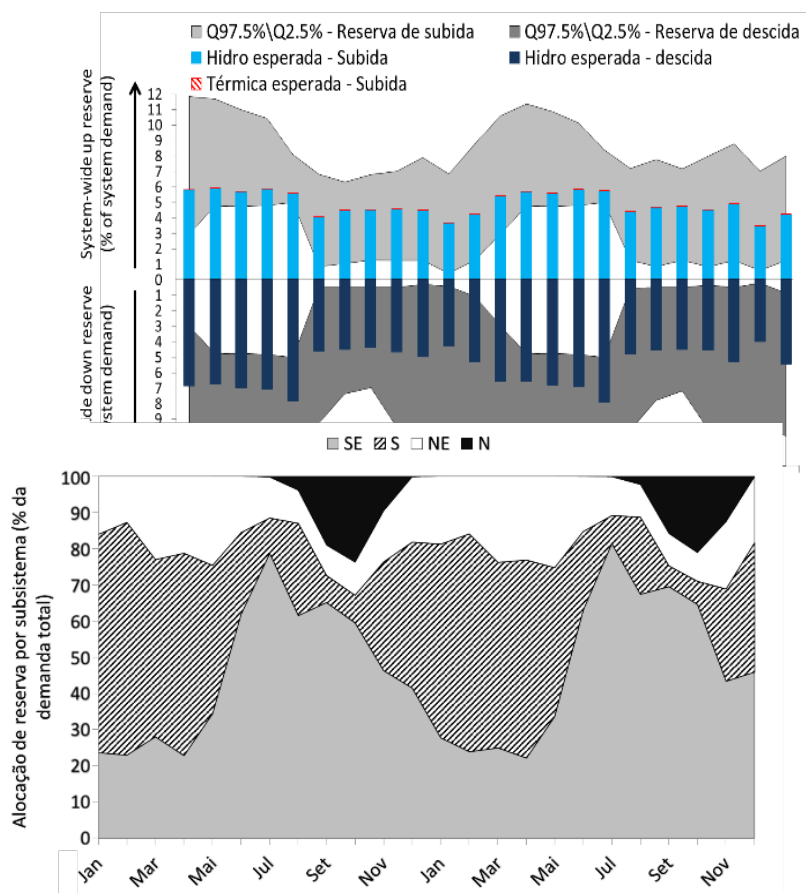
Desligando o oráculo depois de uma forward completa sem encontrar novas violações



Case	Running time (hours)			$ C^* $	$\frac{ C^* }{ C }$
	FCD	CCG _{MILP}	CCG _{INSP}		
$n - 0$	6.7	-	-	-	-
$n_T - 1$	22.9	13.8	12.5	3	30.0%
$n_{GT} - 1$	#	19.8	19.8	7	6.67%
$n_{GT} - 2$	#	27.0	53.6	12	0.22%

Case	Lower bound (z) (10^6 R\$)	Operational cost (\bar{z}) (10^6 R\$)			System-wide Up-reserves (% of total demand)			System-wide Down-reserves (% of total demand)		
		CI(95%) LB	Sample average	CI(95%) UB	$Q_{2.5\%}$	Sample average	$Q_{97.5\%}$	$Q_{2.5\%}$	Sample average	$Q_{2.5\%}$
$n - 0$	13,483.17	14,889.61	15,165.83	15,442.07	-	-	-	-	-	-
$n_T - 1$	13,729.48	15,570.95	15,850.17	16,129.40	0.82	0.95	1.06	0.82	0.96	1.07
$n_{GT} - 1$	13,868.83	15,707.45	15,988.48	16,269.51	0.91	1.18	1.51	0.83	0.97	1.11
$n_{GT} - 2$	18,463.96	21,600.69	21,924.60	22,248.52	3.51	4.00	4.44	3.78	4.45	5.17

- A política de alocação de reservas faz parte do planejamento ótimo!



Proposição

$$\tilde{Q}_t^m(v_{t-1}, g_{t|t-1}^o, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{\alpha_{t+1}, g_{t+1|t}^o, u_{t,\omega}, \\ v_{t,\omega}, d_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_t + c^{def} \mathbb{I}' d_t + \alpha_{t+1}$$

s.a

$$A f_{t,\omega} + B g_{t,\omega} + P u_{t,\omega} = D_t - d_{t,\omega}$$

$$v_{t,\omega} = v_{t-1} - H(u_{t,\omega} + s_{t,\omega}) + w_{t,\omega} \quad (: \pi_t)$$

$$g_{j,t,\omega} = g_{j,t|t-1}^o \quad \forall j \in J \quad (: \gamma_{j,t})$$

$$(g_{t+1|t}^o, g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, d_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

$$\alpha_{t+1} \geq \tilde{Q}_{t+1}^k(v_t^k, g_{t+1|t}^{o,k}) + \tilde{\pi}_{t+1}^{v,k}(v_{t,\omega} - v_t^k) + \sum_{j \in J} \tilde{\gamma}_{j,t+1}^k(g_{j,t+1|t}^o - g_{j,t+1|t}^{o,k}) \quad \forall k \leq m$$

$$\text{Onde, } \tilde{\pi}_{t+1}^{v,k} = \sum_{\omega \in \Omega_{t+1}} p_\omega \tilde{\pi}_{t+1,\omega}^{v,k};$$

$$\tilde{\gamma}_{j,t+1}^k = \sum_{\omega \in \Omega_{t+1}} p_\omega \tilde{\gamma}_{j,t+1,\omega}^k$$

Proposição

$$\tilde{Q}_t^m(v_{t-1}, G_{t|t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{G_{t+1|t}, g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, \\ v_{t,\omega}, d_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c_t' g_t + c^{def} \mathbb{I}' d_t + \alpha_{t+1}$$

s.a

$$A f_{t,\omega} + B g_{t,\omega} + P u_{t,\omega} = D_t - d_{t,\omega}$$

$$v_{t,\omega} = v_{t-1} - H(u_{t,\omega} + s_{t,\omega}) + w_{t,\omega} \quad (:\pi_t)$$

$$\sum_{j \in J_s} g_{j,\omega,t} = G_{s,t|t-1} \quad \forall s \in S \quad (:\gamma_{t,s})$$

$$(G_{t+1|t}, g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, d_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

$$\alpha_{t+1} \geq \tilde{Q}_{t+1}^k(v_t^k, G_{t+1|t}^k) + \tilde{\pi}_{t+1}^{v,k}(v_{t,\omega} - v_t^k) + \sum_{s \in S} \tilde{\gamma}_{s,t+1}^k (G_{s,t+1|t} - G_{s,t+1|t}^k) \quad \forall k \leq m$$

$$\text{Onde,} \quad \tilde{\pi}_{t+1}^{v,k} = \sum_{\omega \in \Omega_{t+1}} p_\omega \tilde{\pi}_{t+1,\omega}^{v,k};$$

$$\tilde{\gamma}_{s,t+1}^m = \sum_{\omega \in \Omega_{t+1}} p_\omega \tilde{\gamma}_{s,t+1,\omega}^m$$

Proposição

- Modelo de pré-despacho

$$\tilde{Q}_0^m(G_{t=1|0}) = \min_{\alpha_1, G_{t=1|0}} \alpha_1$$

s.a

$$G_{min} \leq G_{t=1|0} \leq G_{max}$$

$$\alpha_1 \geq \tilde{Q}_1^k(v_0, G_{t=1|0}^k) + \sum_{s \in S} \tilde{\gamma}_{s,1}^k (G_{s,t=1|0} - G_{s,t=1|0}^k) \quad \forall k \leq m$$

$$\text{Onde, } \tilde{\gamma}_{s,1}^m = \sum_{\omega \in \Omega_1} p_{\omega} \tilde{\gamma}_{s,1,\omega}^m$$

Proposição

- Aumento do número de restrições ($|S|$)
- Incremento do número de dimensões dos cortes ($|S|$)

Proposição

- Aumento do número de restrições ($|S|$)
- Incremento do número de dimensões dos cortes ($|S|$)
- Permite decomposição entre cenários
- Considera não-antecipatividade dos cenários

Proposição

- Aumento do número de restrições ($|S|$)
- Incremento do número de dimensões dos cortes ($|S|$)
- Permite decomposição entre cenários
- Considera não-antecipatividade dos cenários



Temporalmente consistente