

# Co-otimização de Energia e Serviços Ancilares no Planejamento de Médio- Prazo de Sistemas Hidrotérmicos

**SNPTEE 2017 - Curitiba**

**Alexandre Street, Arthur Brigatto e Davi Valladão**

**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](mailto:street@ele.puc-rio.br)

Website: [www.puc-rio.br/lamps](http://www.puc-rio.br/lamps)

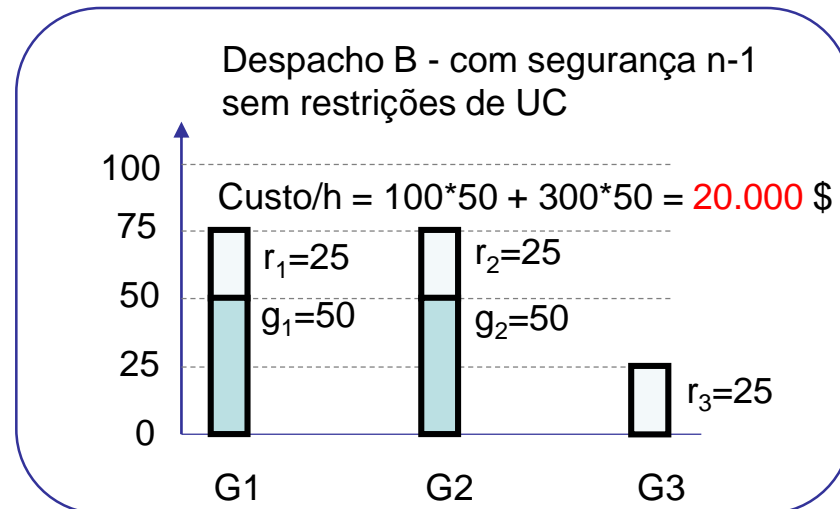
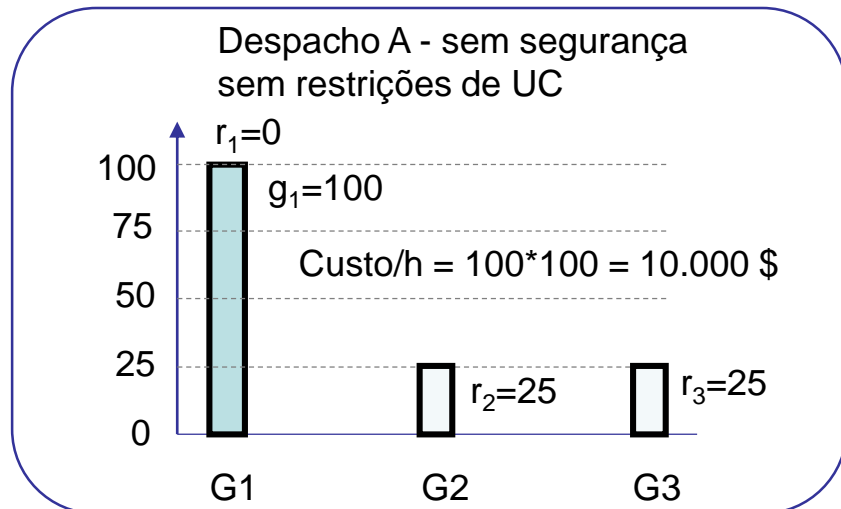
# AGENDA

- Motivação
- Efeito das simplificações
- Critério de segurança n-K



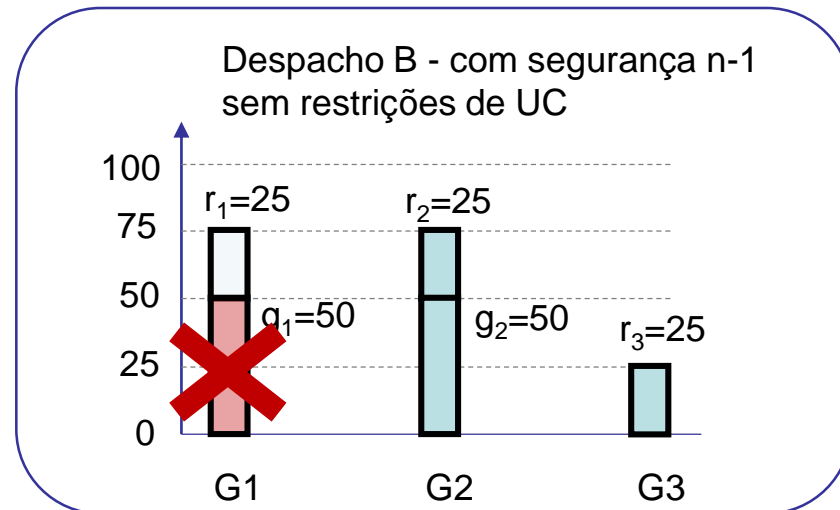
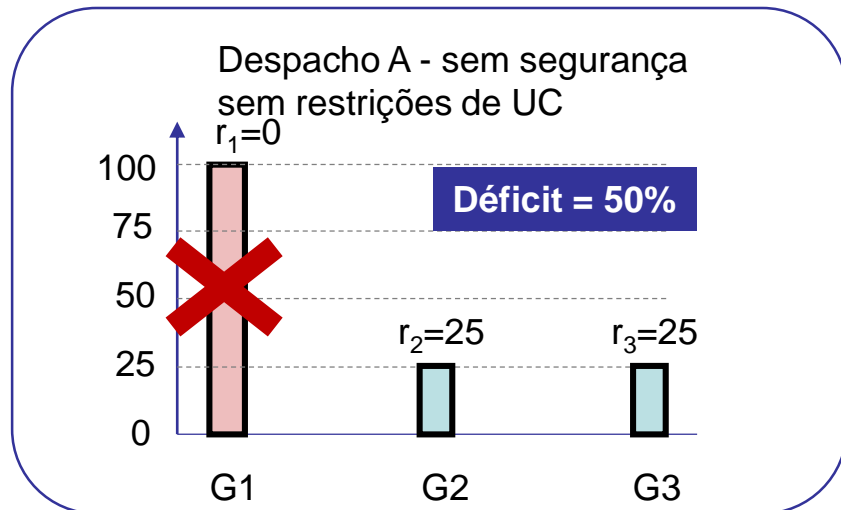
# O planejamento deve ou não considerar o critério de segurança?

- 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



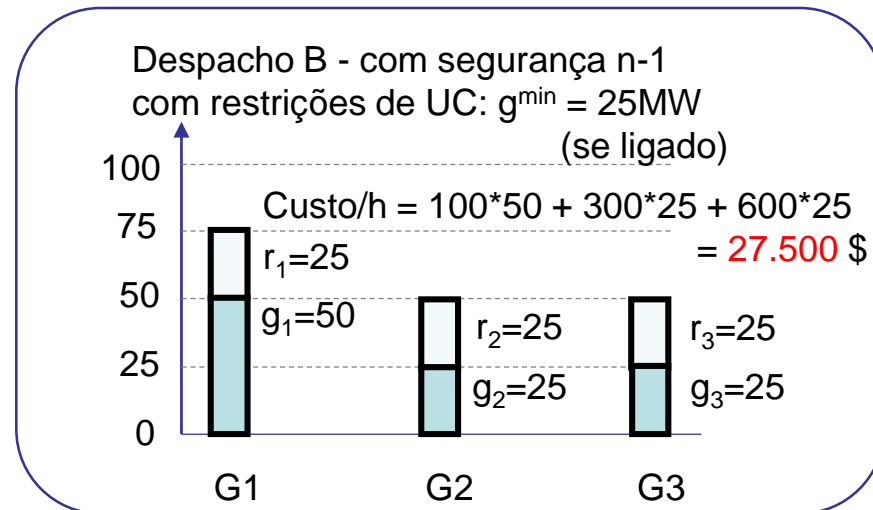
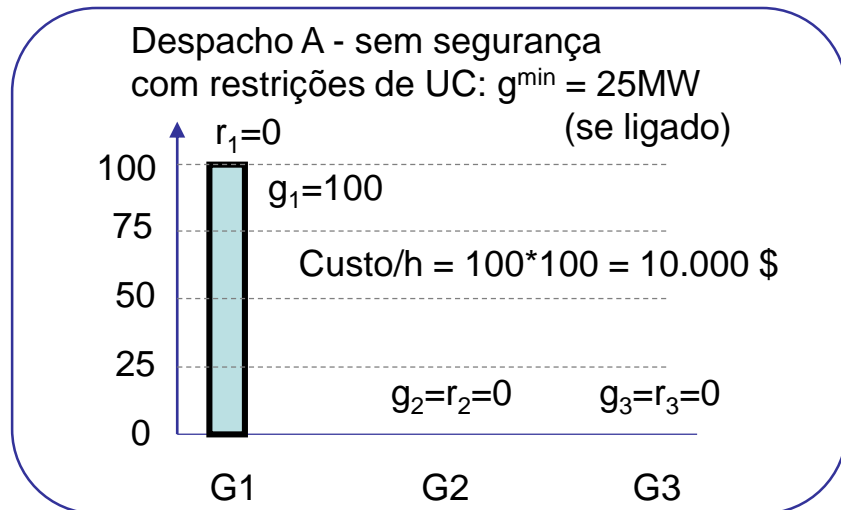
# O planejamento deve ou não considerar o critério de segurança?

- Se uma das usinas operando falhar
  - Caso A: reservas insuficientes (déficit de 50% da demanda)
  - Caso B: as demais usinas utilizam a reserva e mantêm o suprimento da carga
  - Mas no caso B, reserva não girante foi utilizada



# 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





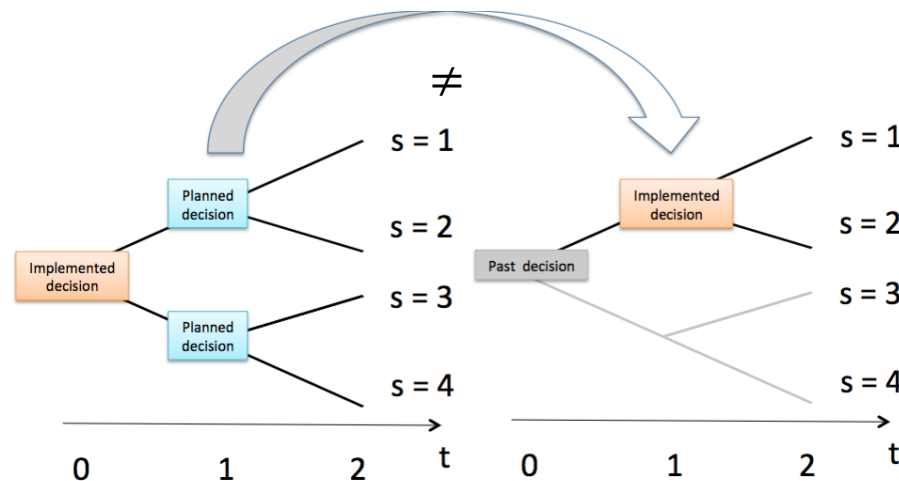
# AGENDA

- Motivação
- Efeito das simplificações
- Critério de segurança n-K

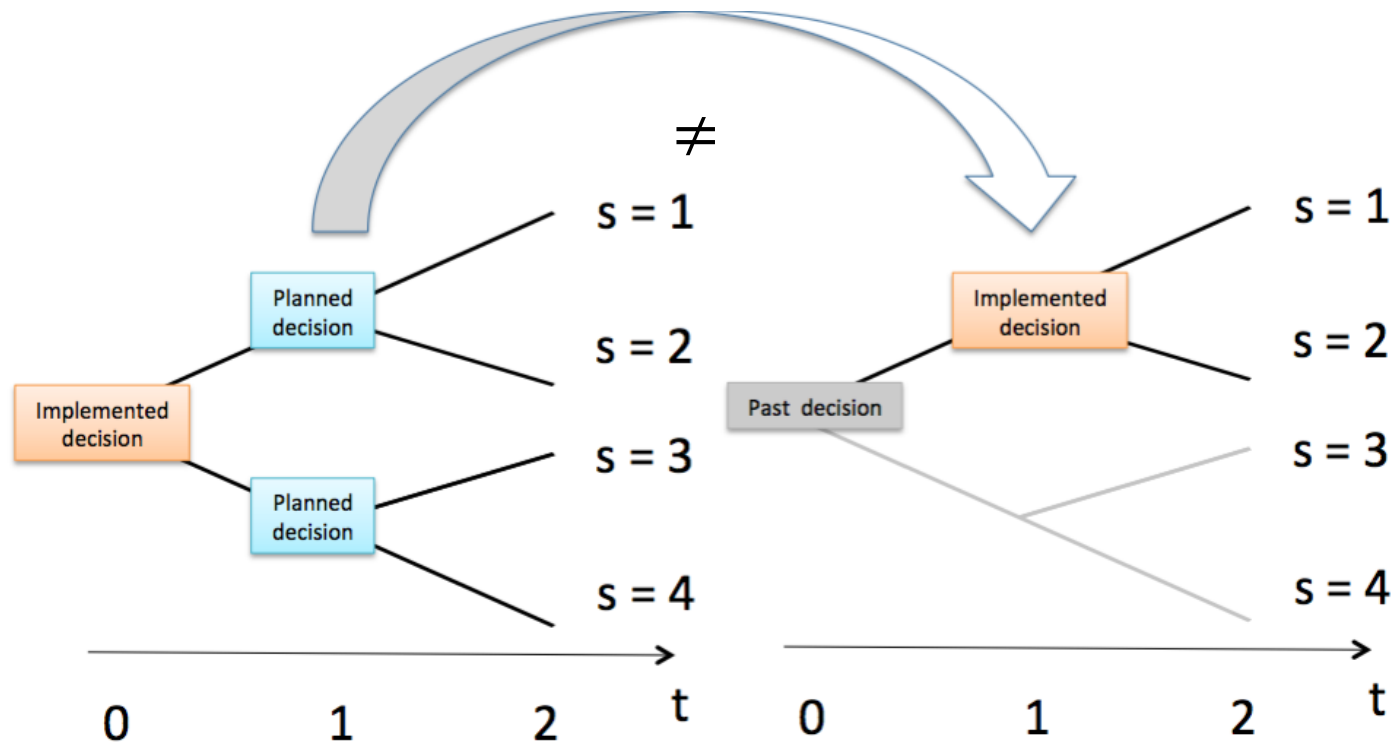


# Conceito e Exemplos de Inconsistência temporal

- As decisões planejadas são diferentes do que se implementa
- Simplificações
  - restrições de linha
  - Critério de segurança



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





- 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

## 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

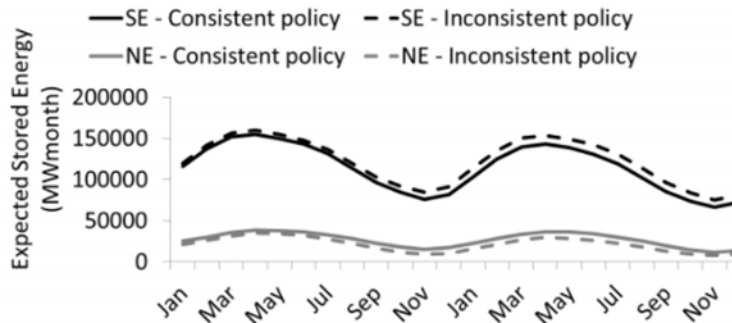


Fig. 8. Southeastern and Northeastern stored energy.

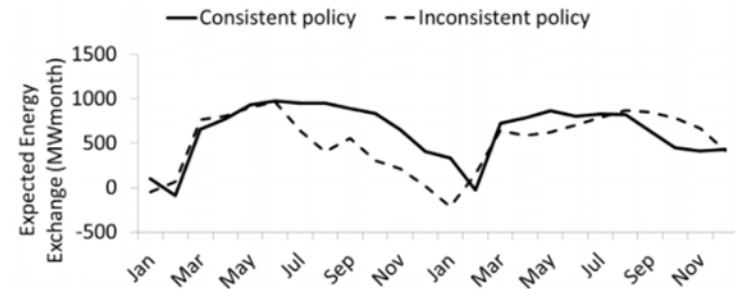


Fig. 9. Exchanged energy from the SE subsystem to the NE subsystem.



Fig. 10. Northeastern spot prices.

# AGENDA

- Motivação
- Efeito das simplificações
- Critério de segurança  $n-K$



- 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

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

subject to

$$Ag_t + By_t + Cf_t + \phi_t^+ - \phi_t^- = d_t$$

$$v_t = v_{t-1} - H_t y_t + \mathbf{w}_{t,\omega} : (\pi_{t,\omega})$$

$$f_t = S\theta_t$$

$$u_t + \Delta u_t^{up} \leq \bar{U}_t$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$(3) \quad Z_u^c(u_t - \Delta u_t^{dn}) \leq u_t^c \leq Z_u^c(u_t + \Delta u_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \quad (15)$$

$$(4) \quad Z_g^c(g_t - \Delta g_t^{dn}) \leq g_t^c \leq Z_g^c(g_t + \Delta g_t^{up}); \forall c \in \mathcal{C} \quad (16)$$

$$(5) \quad f_t^c \in \mathcal{F}_t, y_t^c \in \mathcal{Y}_t, g_t^c \in \mathcal{G}_t, v_t^c \in \mathcal{V}_t; \forall c \in \mathcal{C} \quad (17)$$

- 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



- 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

subject to:

$$Ax \leq b$$

First stage problem

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

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

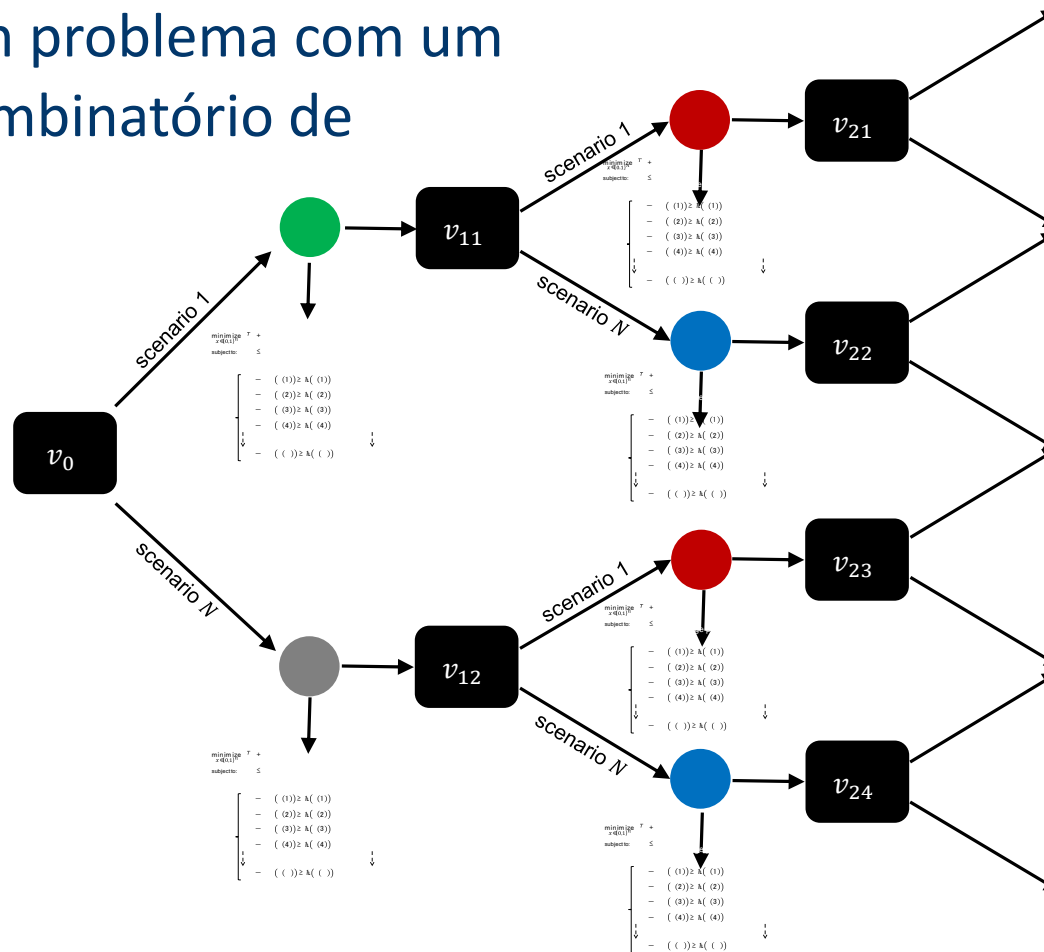
$$Tx - Wy(\xi(3)) \geq h(\xi(3))$$

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

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

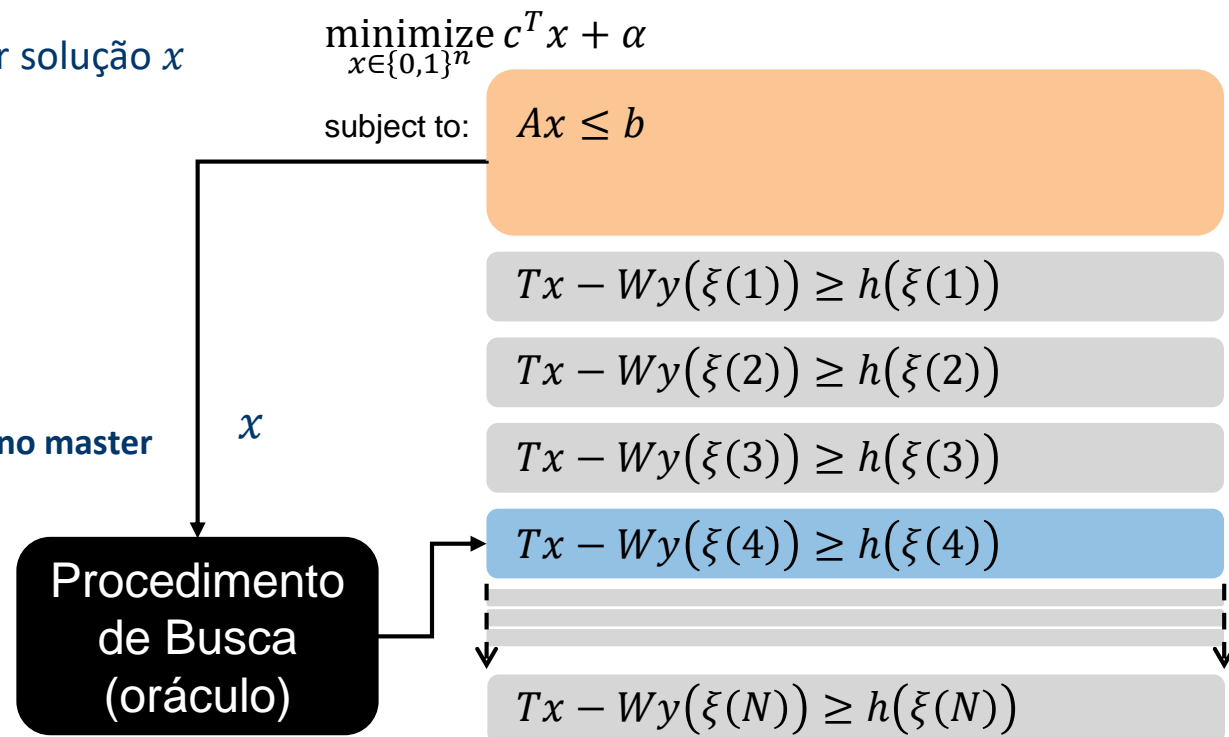


Em cada nó da árvore temos que resolver um problema com um número combinatório de restrições



## 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

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

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

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

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

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

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

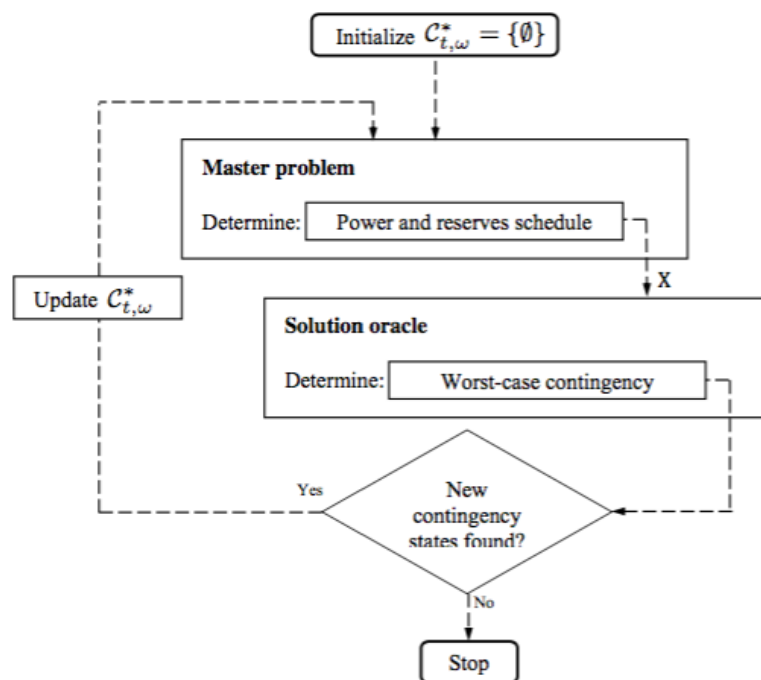
$$Tx - Wy(\xi(N)) \geq h(\xi(N))$$

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

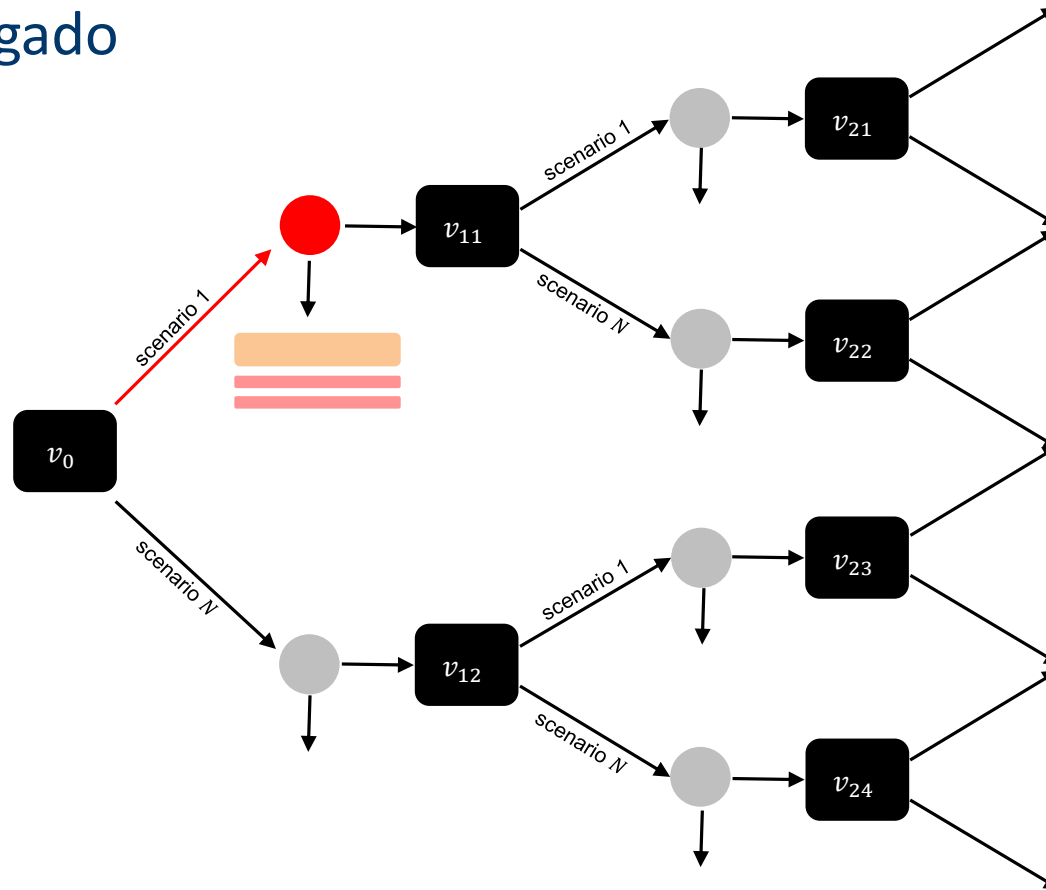
- Conjunto guarda-chuva de contingências
  - é pequeno
  - é robusto frente a mudanças no RHS
  - Pode ser compartilhado entre os problemas dos diversos nós da PDDE
  - O problema sem todas as restrições gera um limite inferior

- PDDE com a GCR

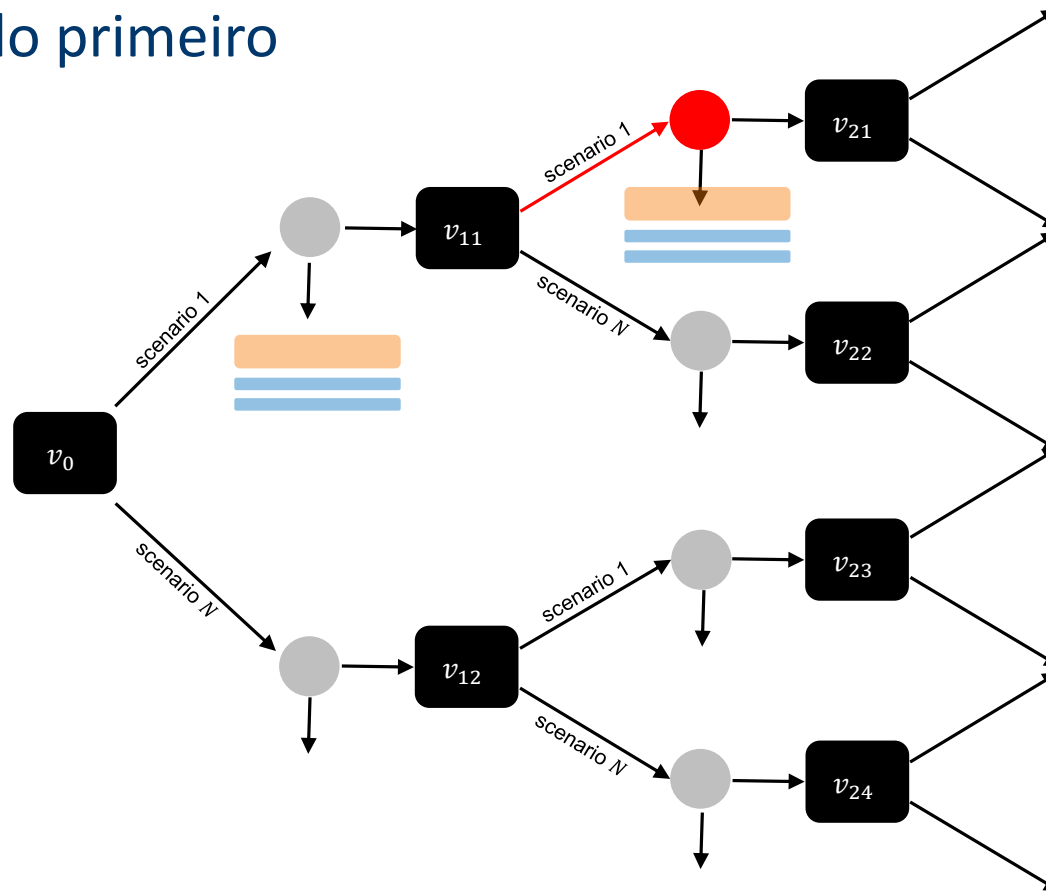
- Aplicar a GCR em cada cenários da PDDE
- Utilizar as contingências identificadas em cenários e estágios anteriores para inicializar a GCR de um dado subproblema.
- Desligar o oráculo depois de uma iteração forward completa sem encontrar restrições violadas
- Após um dado número de iterações, religar o oráculo



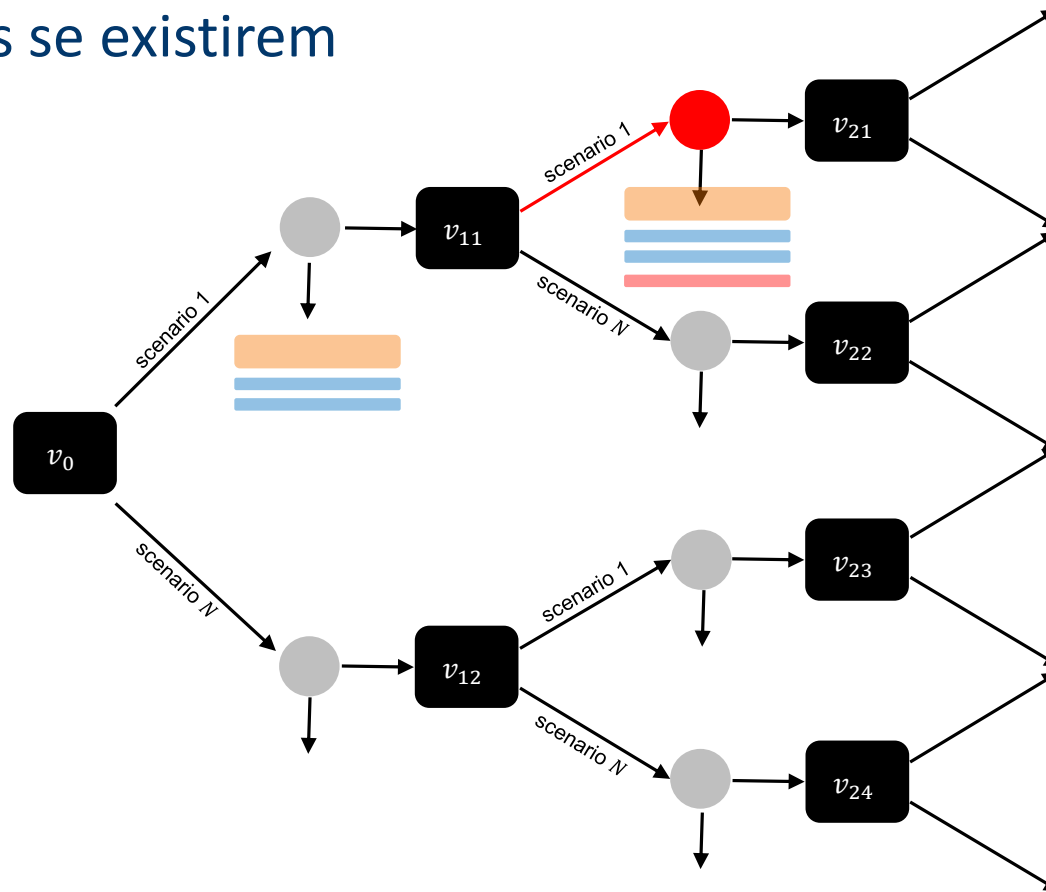
Resolver o primeiro problema com  
o oráculo ligado



O segundo problema já utiliza as restrições do primeiro

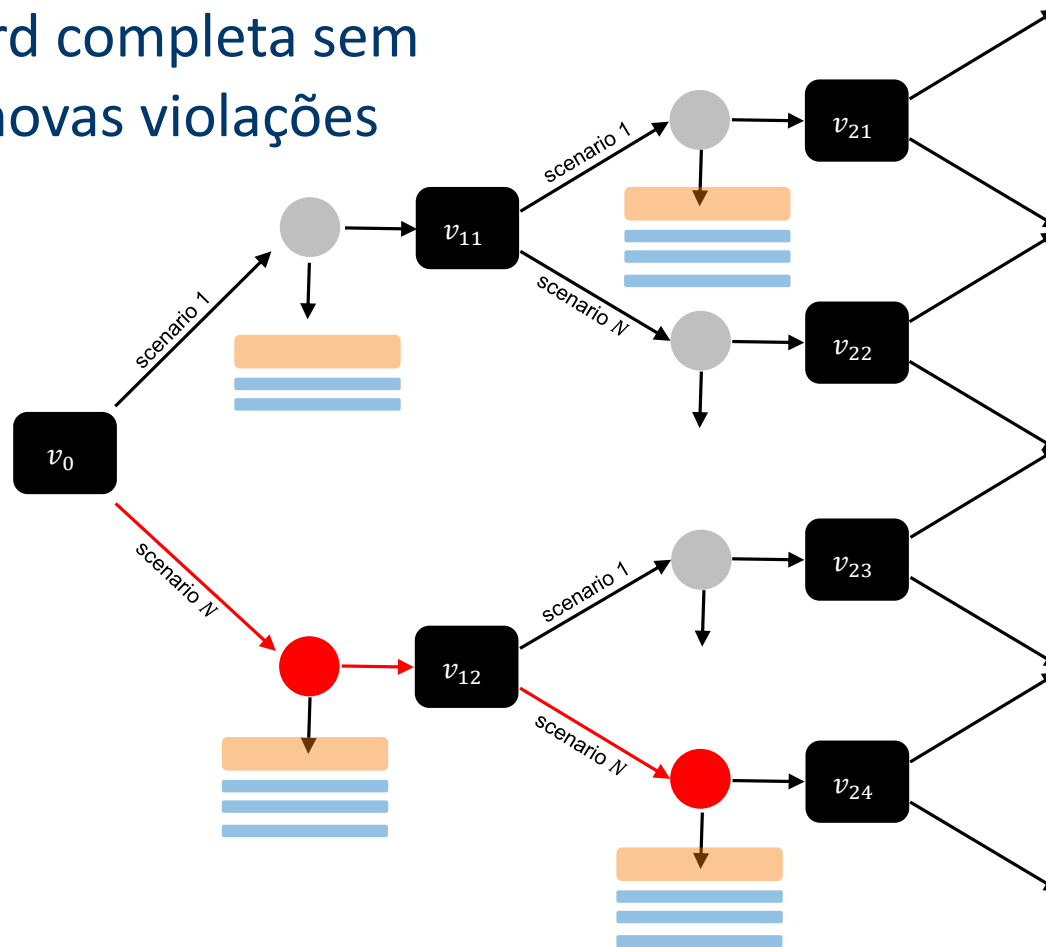


Novas restrições violadas são adicionadas se existirem





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



Case	Running time (hours)			$ C^* $	$\frac{ C^* }{ C }$
	FCD	CCG <sub>MILP</sub>	CCG <sub>INSP</sub>		
$n - 0$	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

- Política para desligar e religar o oráculo
  - Garantia de lowerbound
  - Baseada na robustez do conjunto guarda-chuva de contingências

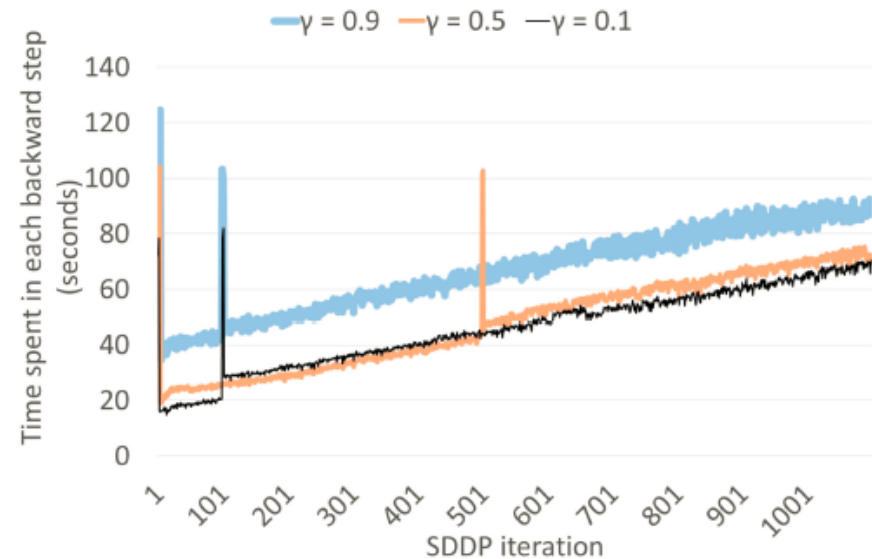
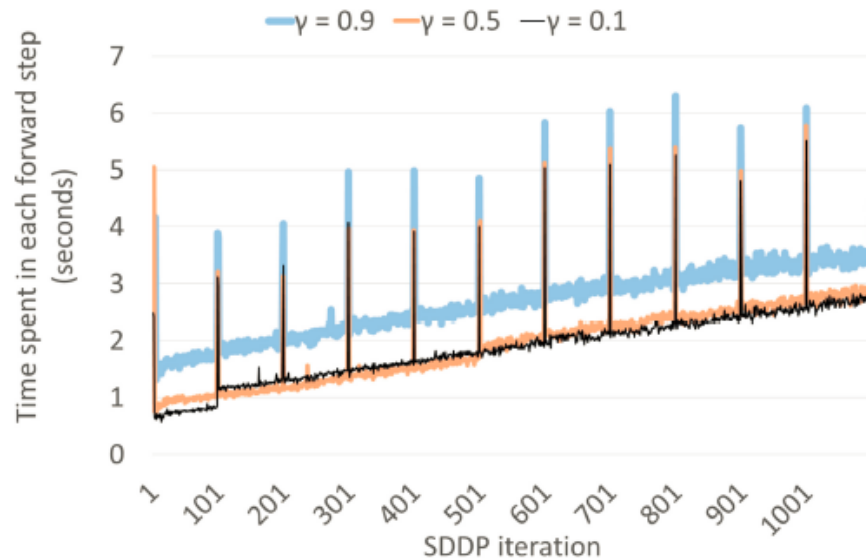
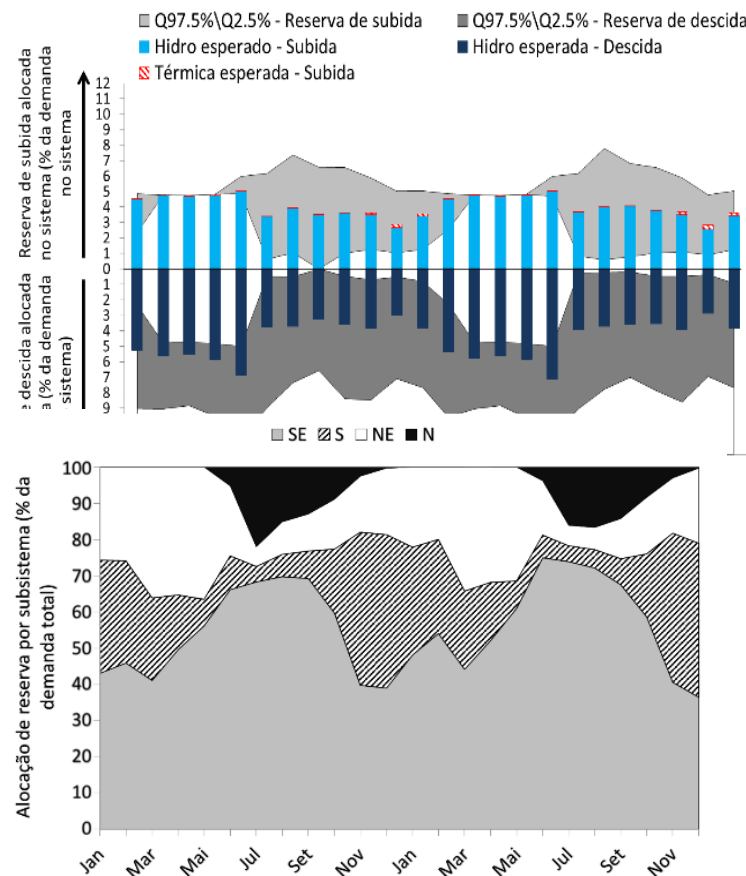
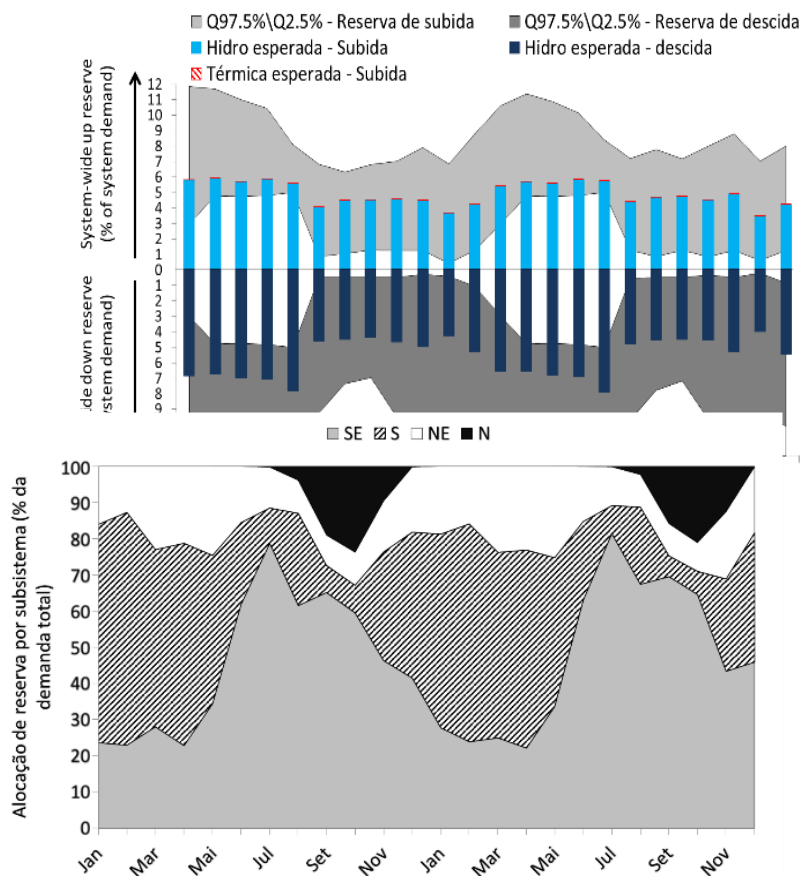


Fig. 1. Time spent (seconds) in each forward (left) and backward (right) steps.

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



Obrigado! Visite nossa página para mais informações  
[www.puc-rio.br/lamps](http://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.