



**Planejamento da Operação:
Impacto da Programação Dinâmica Dual
Estocástica tipo Hazard-Decision**

André Lawson
FGV Energia

Alexandre Street
PUC-Rio

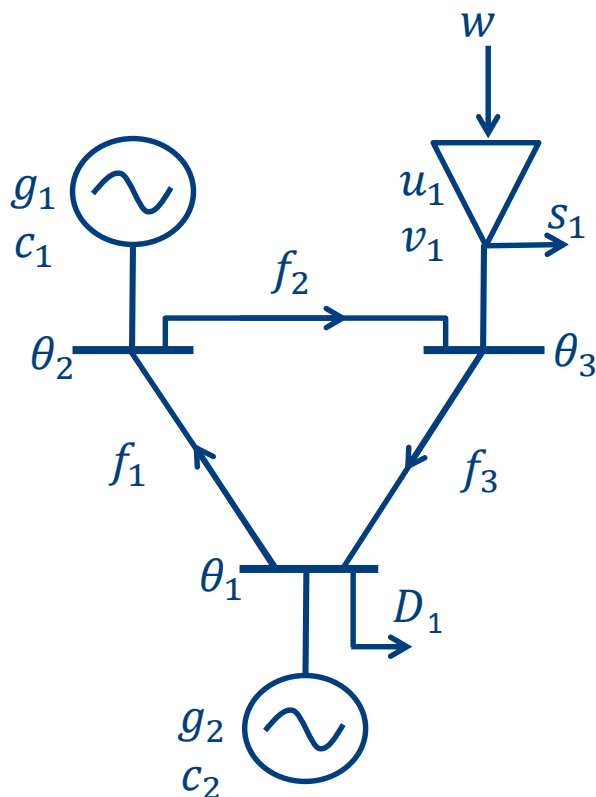
Davi Valladão
PUC-Rio

SUMÁRIO

- **MOTIVAÇÃO**
- **MODELO PROPOSTO**
- **METODOLOGIA DE SOLUÇÃO**
- **ESTUDO DE CASO**

Aproximar o modelo utilizado no planejamento hidrotérmico da realidade operativa ao incorporar uma estrutura de revelação das incertezas e processo decisório do tipo *decision-hazard*

Operação de sistemas hidrotérmicos



D	demanda (MWh)
c	custo de geração ($R\$/MWh$)
w	afluência (hm^3)
u	turbinamento (hm^3)
v	armazenamento (hm^3)
s	vertimento (hm^3)
g	geração térmica (MWh)
f	fluxos em linhas (MWh)
θ	ângulos de fase (rad)

Restrições

$$A f_t + B g_t + P u_t = D_t$$

- Atendimento à demanda
- Balanço nodal de energia em cada barra do sistema

Legenda

- A* matriz de incidência
- B* matriz de localização nodal dos geradores térmicos
- P* produtividades médias das usinas hídricas (MWh/hm^3)

Restrições

$$v_t = v_{t-1} - H(u_t + s_t) + w_t$$

- Balanço hídrico nos reservatórios
- Equação de transição de estado do sistema

Legenda

H disposição das usinas hídricas com relação aos reservatórios

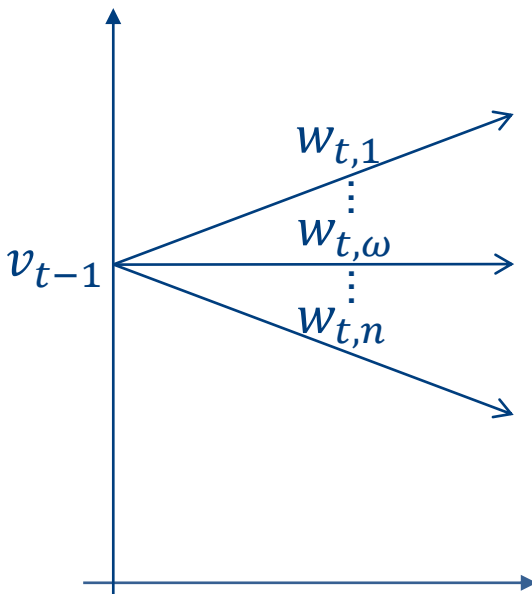
Restrições

$$(g_t, f_t, \theta_t, u_t, s_t, v_t) \in X_t$$

- Conjunto viável decorrente de todas as demais restrições relevantes para caracterizar a rede elétrica e limites dos elementos do sistema
 - limites de potência dos geradores; limites de turbinamento; limites de fluxo em linhas; limites dos reservatórios; segunda lei de Kirchhoff

Hazard-decision

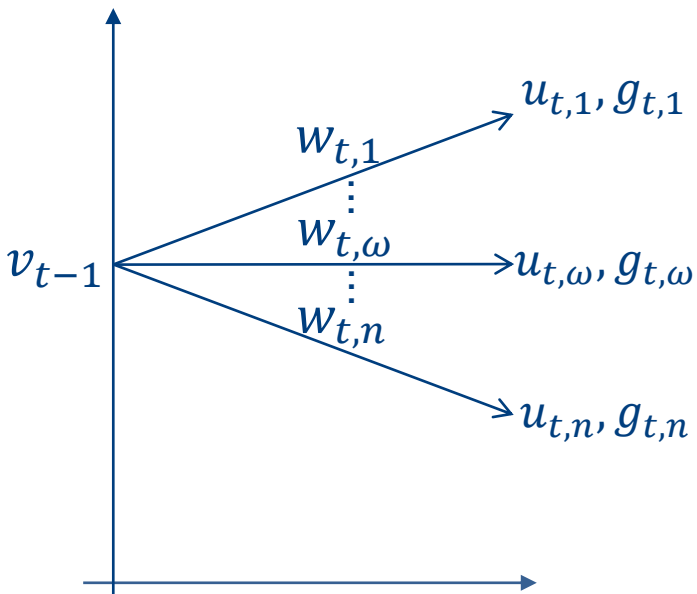
Objetivo: minimizar o valor esperado do custo de operação



w_t	afluência (hm^3)
u_t	turbinamento (hm^3)
g_t	geração térmica (MWh)
v_t	armazenamento(hm^3)

Hazard-decision

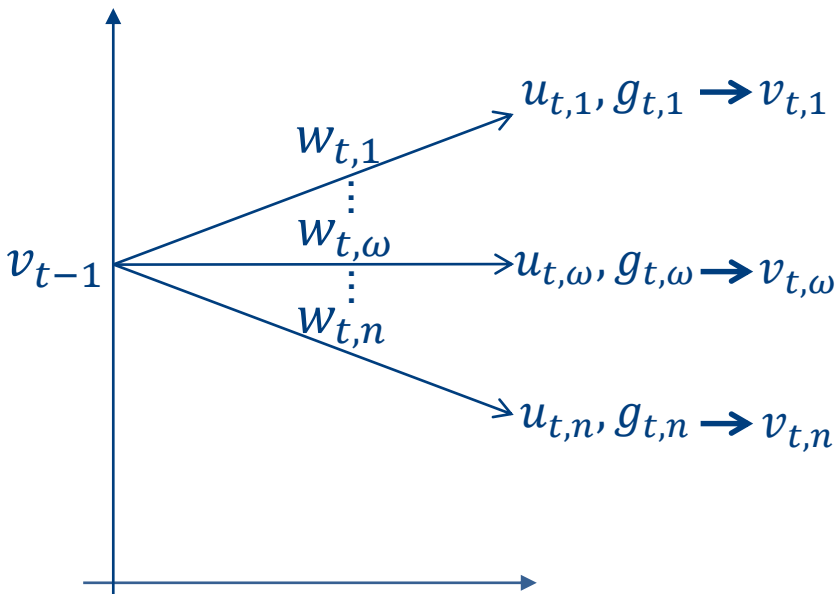
Objetivo: minimizar o valor esperado do custo de operação



w_t	afluência (hm^3)
u_t	turbinamento (hm^3)
g_t	geração térmica (MWh)
v_t	armazenamento(hm^3)

Hazard-decision

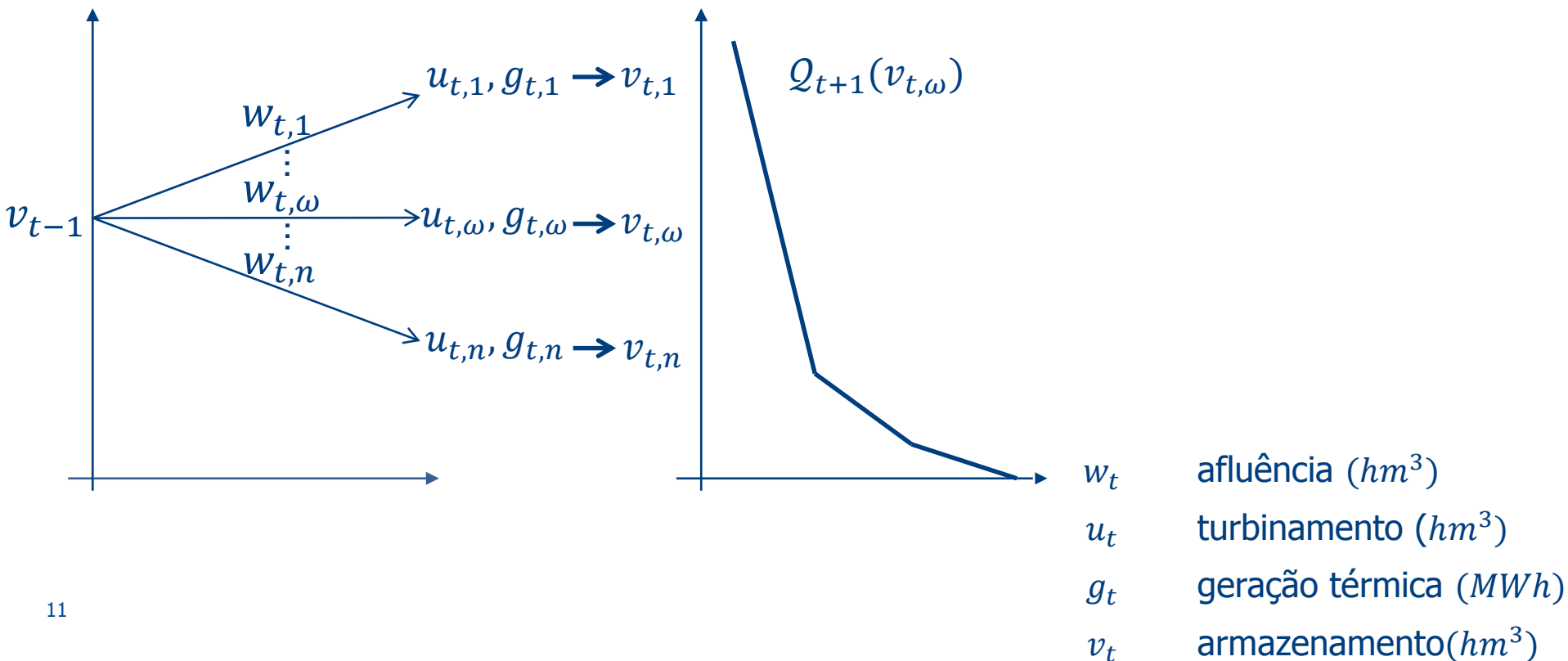
Objetivo: minimizar o valor esperado do custo de operação



w_t	afluência (hm^3)
u_t	turbinamento (hm^3)
g_t	geração térmica (MWh)
v_t	armazenamento (hm^3)

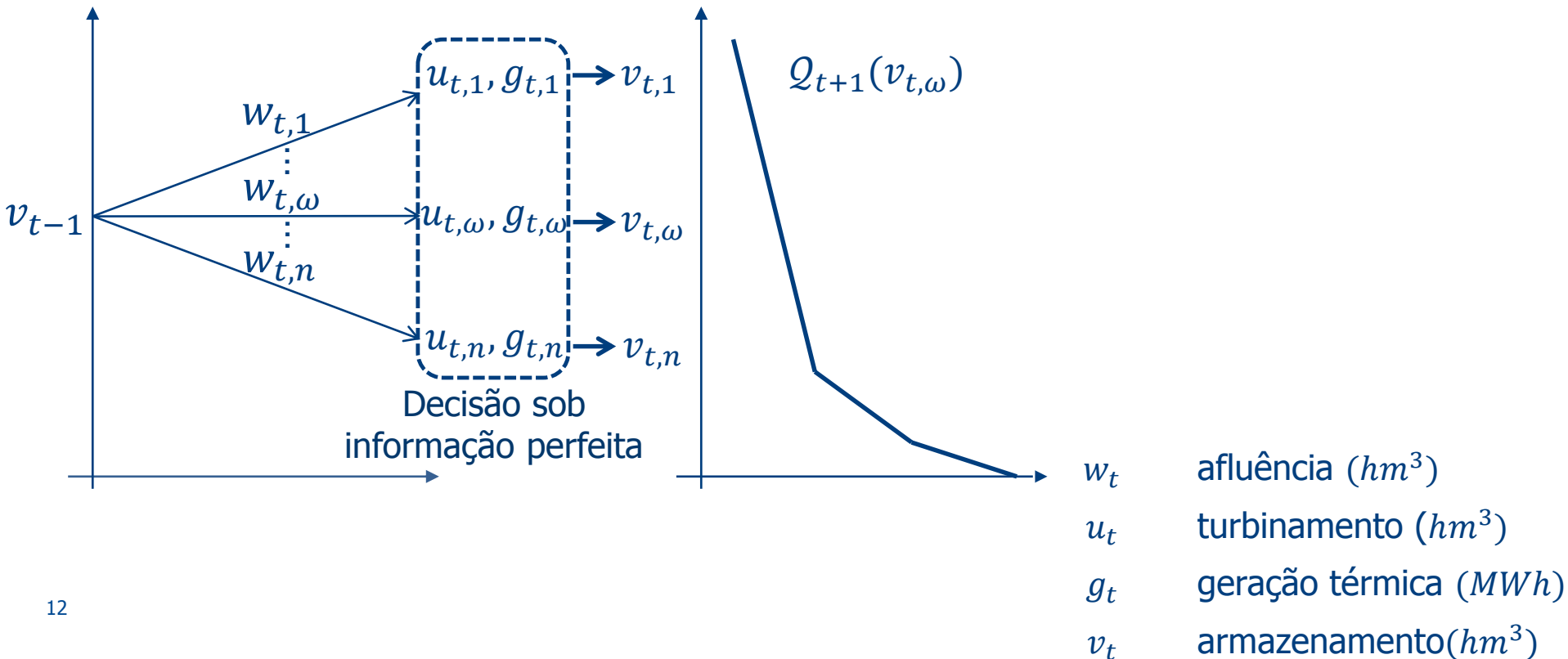
Hazard-decision

Objetivo: minimizar o valor esperado do custo de operação



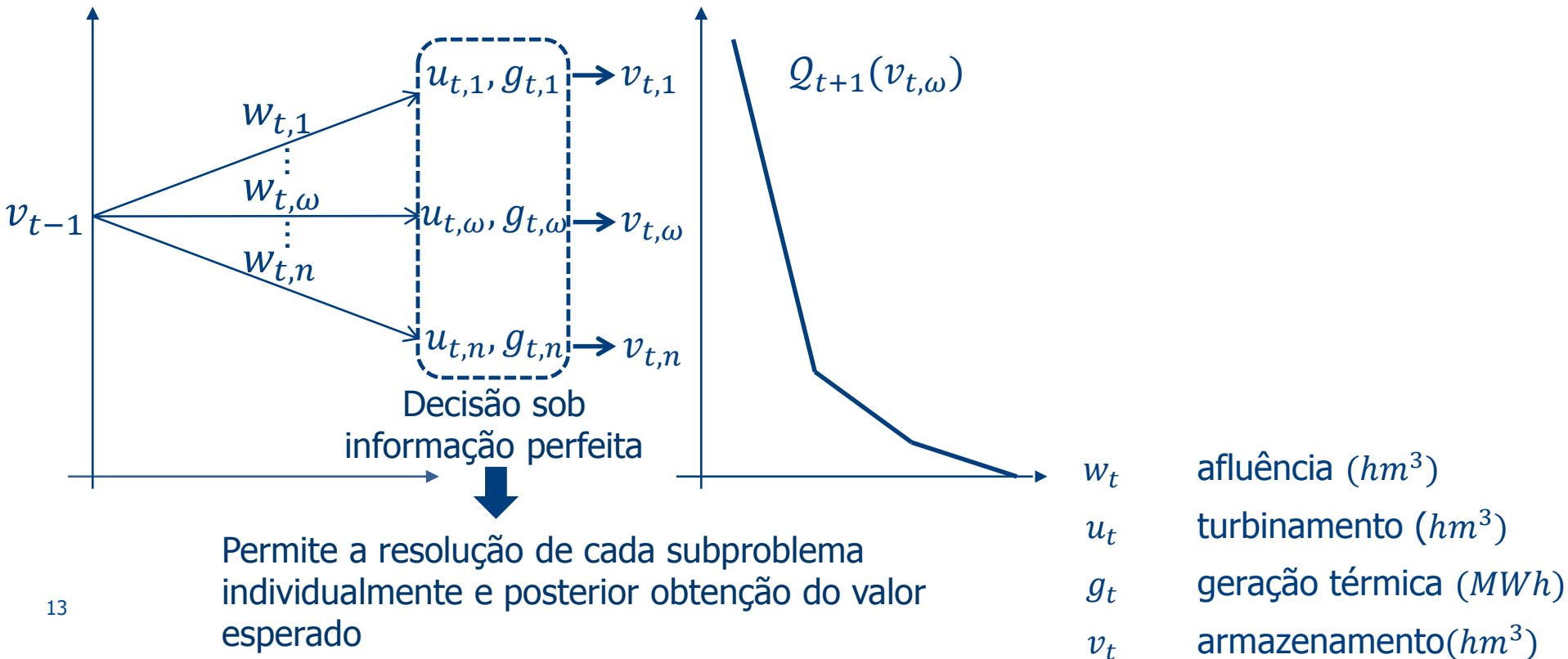
Hazard-decision

Objetivo: minimizar o valor esperado do custo de operação



Hazard-decision

Objetivo: minimizar o valor esperado do custo de operação



Hazard-decision

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, \\ s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_{t,\omega} + Q_{t+1}(v_{t,\omega})$$

s.a

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

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

$$(g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

- $Q_t(v_{t-1}) = \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega [Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega})]$
- $Q_{T+1}(\cdot) = 0$

Hazard-decision

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, \\ s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_{t,\omega} + Q_{t+1}(v_{t,\omega})$$

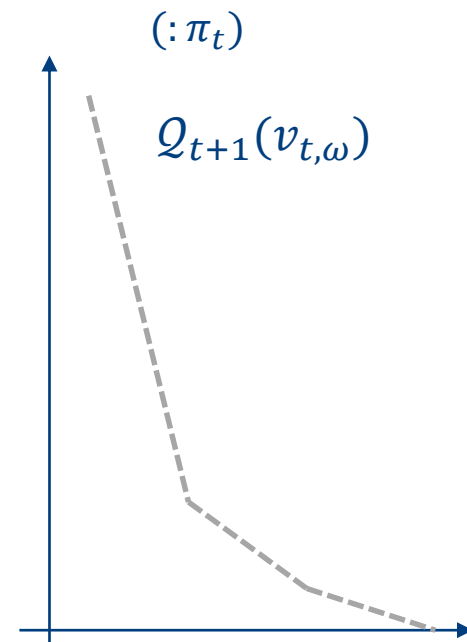
s.a

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

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

$$(g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

- $Q_t(v_{t-1}) = \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega [Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega})]$
- $Q_{T+1}(\cdot) = 0$



Hazard-decision

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, \\ s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_{t,\omega} + Q_{t+1}(v_{t,\omega})$$

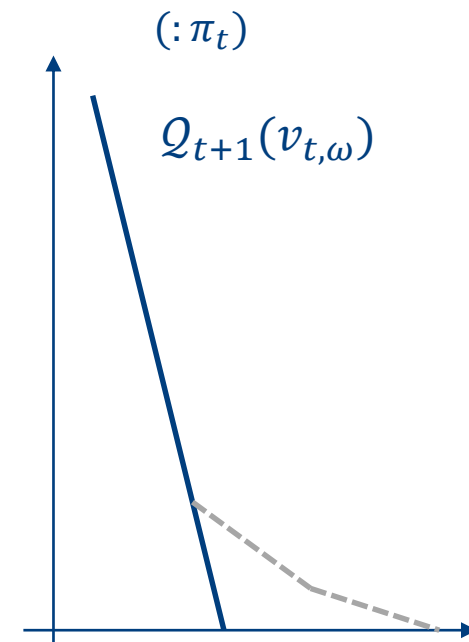
s.a

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

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

$$(g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

- $Q_t(v_{t-1}) = \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega [Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega})]$
- $Q_{T+1}(\cdot) = 0$



Hazard-decision

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, \\ s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_{t,\omega} + Q_{t+1}(v_{t,\omega})$$

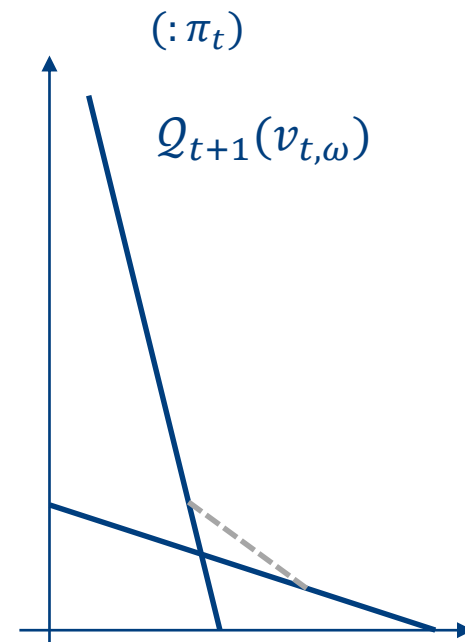
s.a

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

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

$$(g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

- $Q_t(v_{t-1}) = \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega [Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega})]$
- $Q_{T+1}(\cdot) = 0$



Hazard-decision

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, \\ s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_{t,\omega} + Q_{t+1}(v_{t,\omega})$$

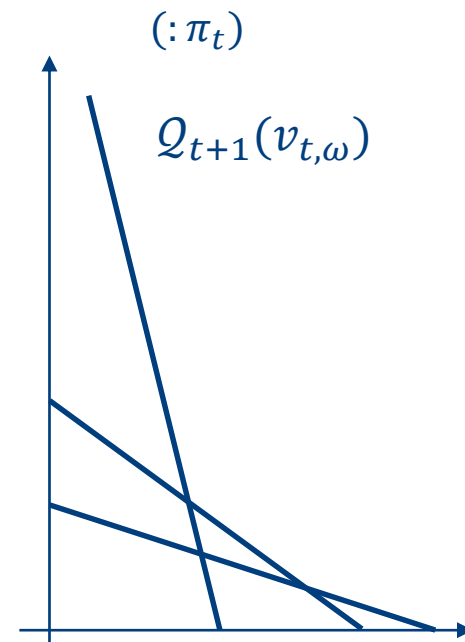
s.a

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

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

$$(g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

- $Q_t(v_{t-1}) = \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega [Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega})]$
- $Q_{T+1}(\cdot) = 0$



Hazard-decision

$$Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, \\ s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_{t,\omega} + Q_{t+1}(v_{t,\omega})$$

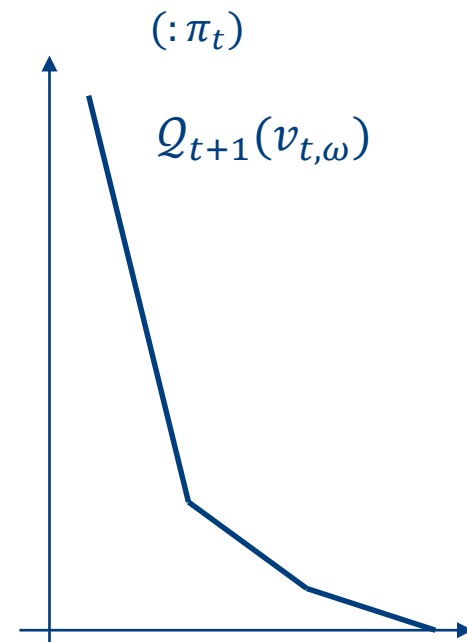
s.a

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

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

$$(g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

- $Q_t(v_{t-1}) = \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega [Q_t(v_{t-1}, w_{t,\omega})]$
- $Q_{T+1}(\cdot) = 0$



Hazard-decision

$$\tilde{Q}_t^m(v_{t-1}, w_{t,\omega}) = \min_{\substack{\alpha_{t+1}, g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, \\ v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}}} c'_t g_{t,\omega} + \alpha_{t+1}$$

s.a

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

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

$$(g_{t,\omega}, u_{t,\omega}, v_{t,\omega}, s_{t,\omega}, f_{t,\omega}, \theta_{t,\omega}) \in X_t$$

$$\alpha_{t+1} \geq \tilde{Q}_{t+1}^k(v_t^k) + \tilde{\pi}_{t+1}^{v,k} (v_{t,\omega} - v_t^k) \quad \forall k \leq m$$

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

Hazard-decision

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

Hazard-decision

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



Na operação: despacho antecipado
Decisão energética

Hazard-decision

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



Na operação: despacho antecipado
Decisão energética



Inconsistência temporal

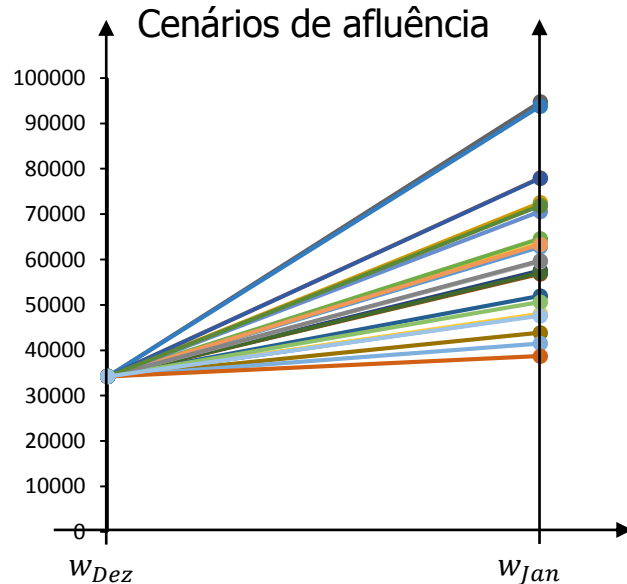
Hazard-decision

Qual a ordem de grandeza dessa incerteza?

Hazard-decision

Qual a ordem de grandeza dessa incerteza?

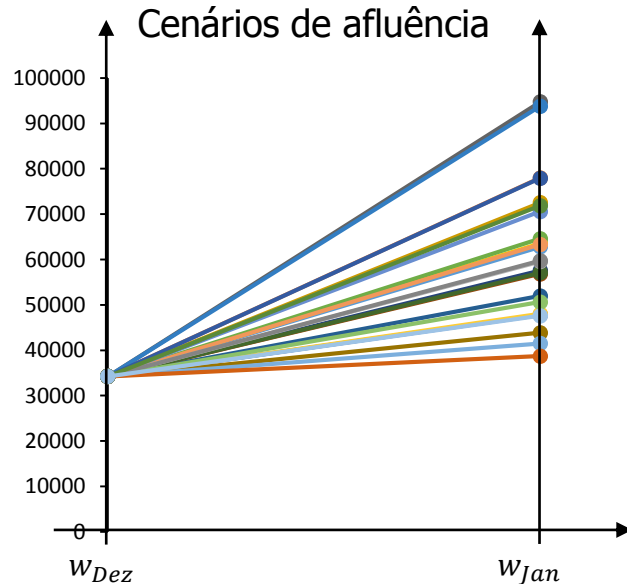
- Ex: Janeiro – Subsistema SE



Hazard-decision

Qual a ordem de grandeza dessa incerteza?

- Ex: Janeiro – Subsistema SE

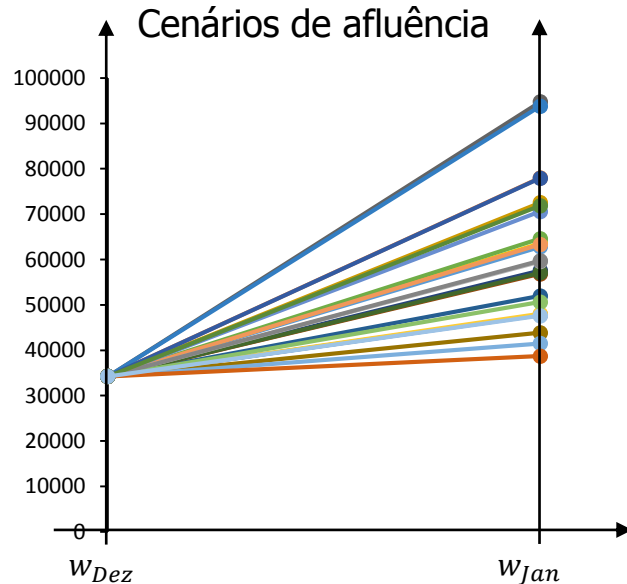


$$c_v(t|t-1) = \frac{\sigma(w_t|w_{t-1})}{E(w_t|w_{t-1})} \approx 25\%$$

Hazard-decision

Qual a ordem de grandeza dessa incerteza?

- Ex: Janeiro – Subsystema SE



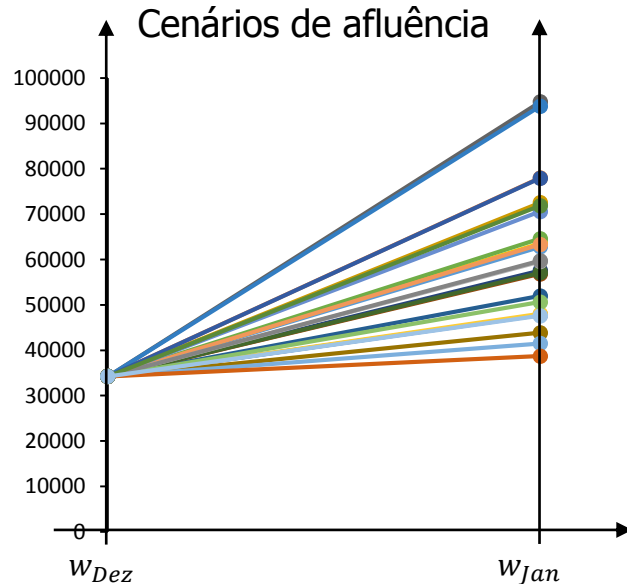
$$c_v(t|t-1) = \frac{\sigma(w_t|w_{t-1})}{E(w_t|w_{t-1})} \approx 25\%$$

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

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:

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

Decision-hazard

Proposição: utilizar um modelo que considere a incerteza do cenário de afluência

Externalidade -----> Decisão



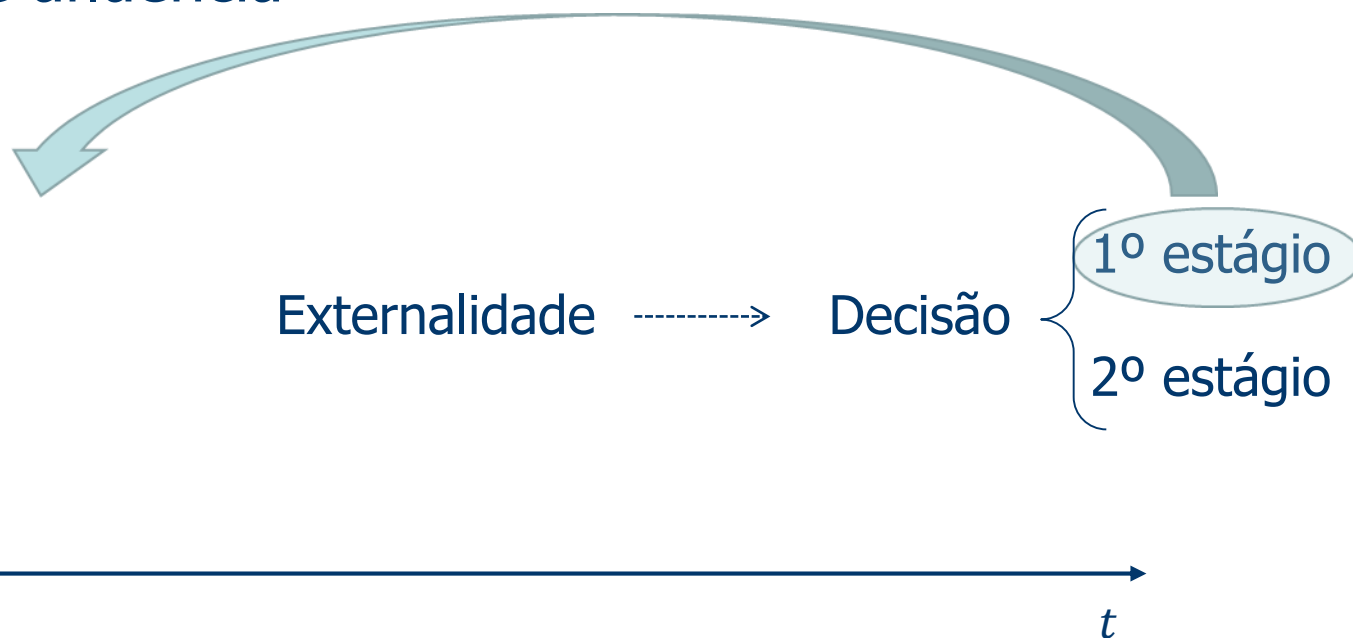
Decision-hazard

Proposição: utilizar um modelo que considere a incerteza do cenário de afluência



Decision-hazard

Proposição: utilizar um modelo que considere a incerteza do cenário de afluência

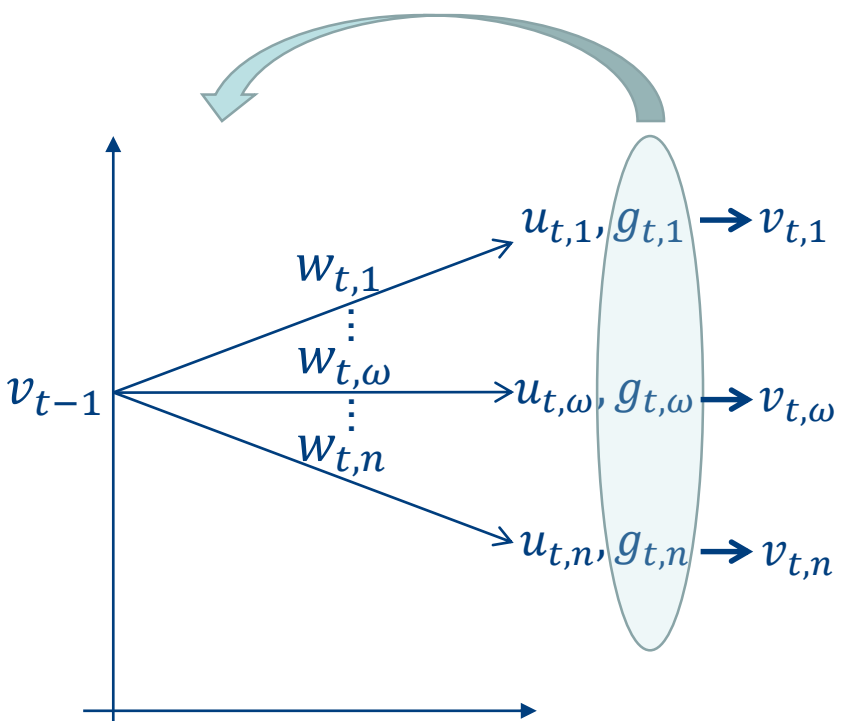


Decision-hazard

Proposição: utilizar um modelo que considere a incerteza do cenário de afluência

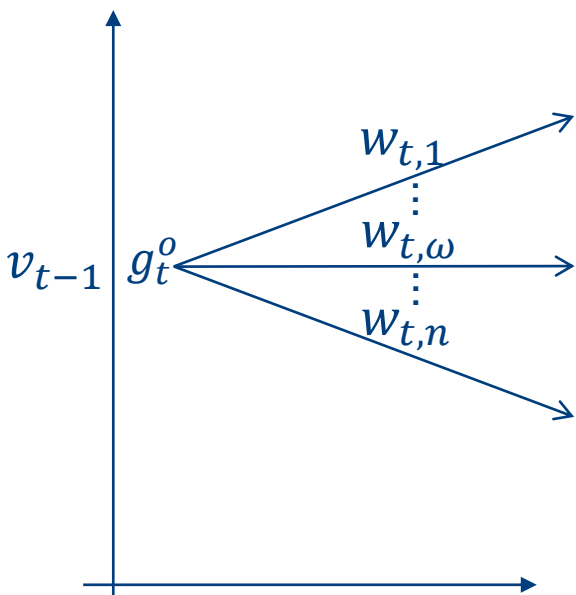


Decision-hazard



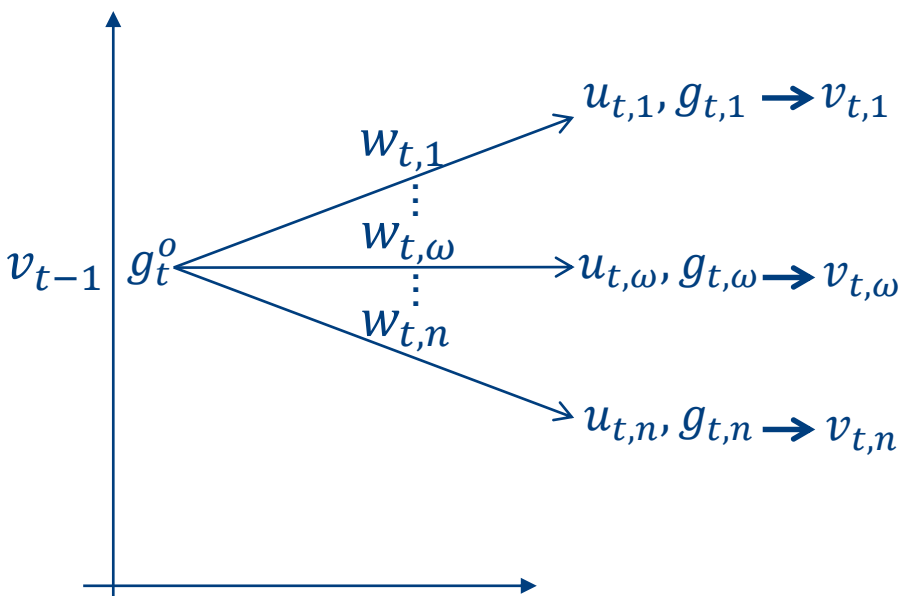
w_t	afluência (hm^3)
u_t	turbinamento (hm^3)
g_t	geração térmica (MWh)
v_t	armazenamento (hm^3)

Decision-hazard



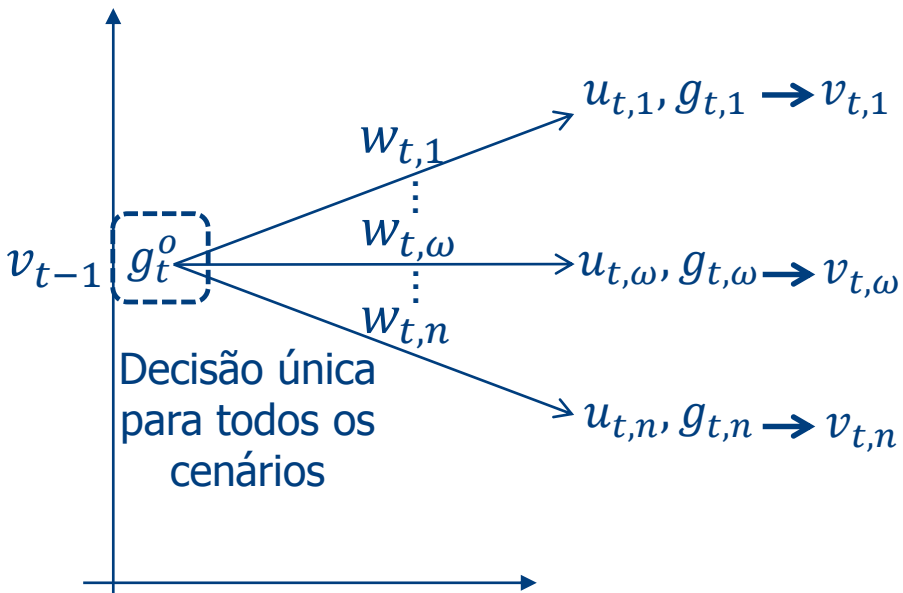
- g_t^0 geração térmica de 1º estágio (MWh)
- w_t afluência (hm^3)
- u_t turbinamento (hm^3)
- g_t geração térmica (MWh)
- v_t armazenamento (hm^3)

Decision-hazard



g_t^o	geração térmica de 1º estágio (MWh)
w_t	afluência (hm^3)
u_t	turbinamento (hm^3)
g_t	geração térmica (MWh)
v_t	armazenamento (hm^3)

Decision-hazard



g_t^o	geração térmica de 1º estágio (MWh)
w_t	afluência (hm^3)
u_t	turbinamento (hm^3)
g_t	geração térmica (MWh)
v_t	armazenamento (hm^3)

Decision-hazard

- Incorporar geradores de 1º estágio às variáveis de estado
- Decisões de 1º estágio de t são determinadas em $t - 1$
- Despacho agregado por subsistema

Decision-hazard

- Incorporar geradores de 1º estágio às variáveis de estado
- Decisões de 1º estágio de t são determinadas em $t - 1$
- Despacho agregado por subsistema

- $Q_t(v_{t-1}, G_{t|t-1})$

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

Onde, $J = \bigcup_{s \in S} J_s$

J	conjunto de geradores de 1º estágio
S	conjunto de subsistemas
g_t	geração térmica (MWh)
G_s	geração térmica agregada de 1º estágio no subsistema s (MWh)

Decision-hazard

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

s.a

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

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

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

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

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

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

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

Decision-hazard

- Modelo de pré-despacho

Determinar geração de 1º estágio para $t = 1$: $G_{t=1|0}$

Logo, em $t = 0$:

$$Q_0(G_{t=0}) = \min_{G_{t=1|0}} Q_1(v_0, G_{t=1|0})$$

s.a

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

Decision-hazard

- Modelo de pré-despacho

Determinar geração de 1º estágio para $t = 1$: $G_{t=1|0}$

Logo, em $t = 0$:

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

s.a

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

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

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

Decision-hazard

- Aumento do número de restrições
- Incremento do número de dimensões dos cortes
- Permite decomposição entre cenários
- Considera não-antecipatividade da decisão

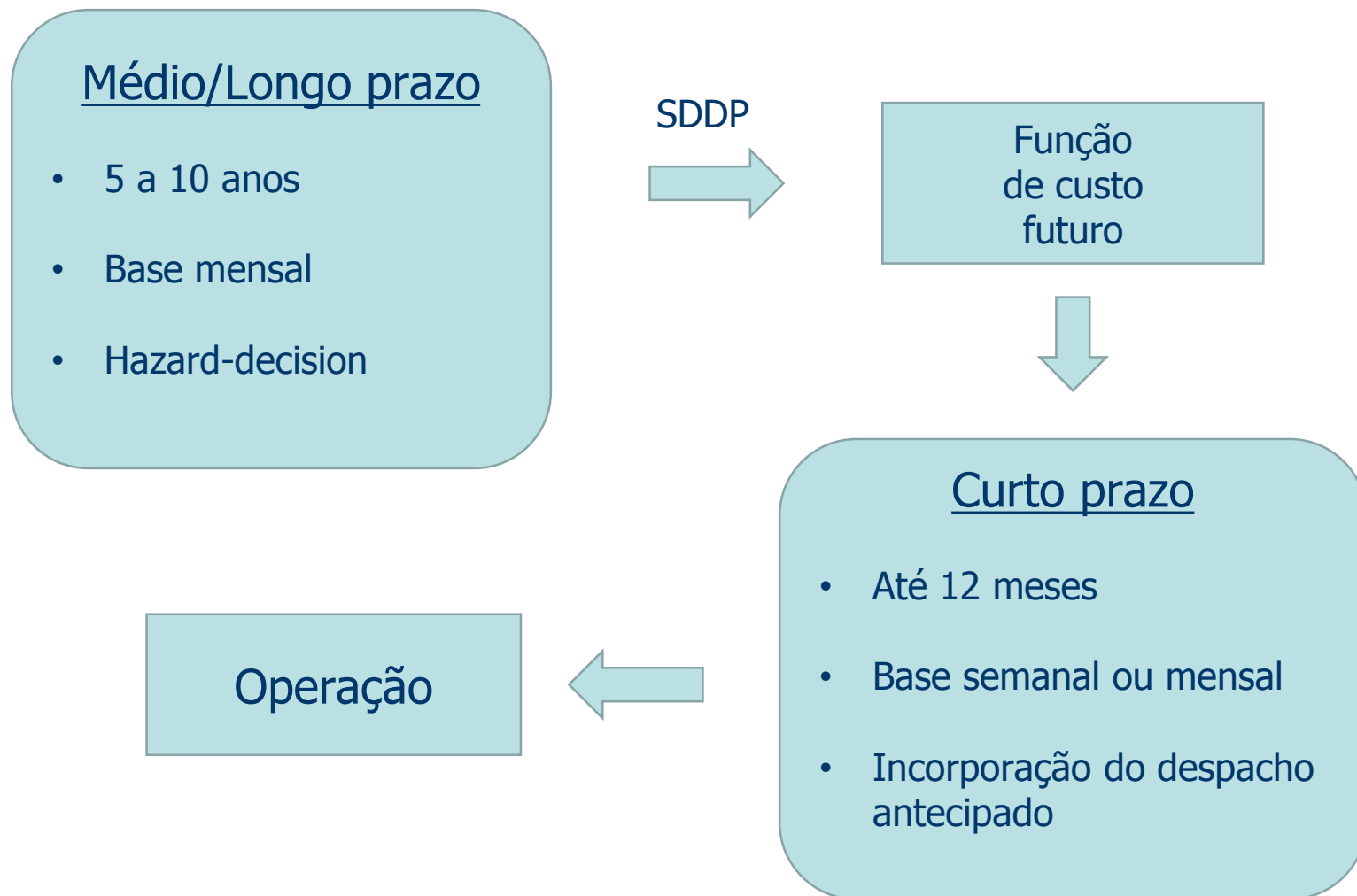
Decision-hazard

- Aumento do número de restrições
- Incremento do número de dimensões dos cortes
- Permite decomposição entre cenários
- Considera não-antecipatividade da decisão

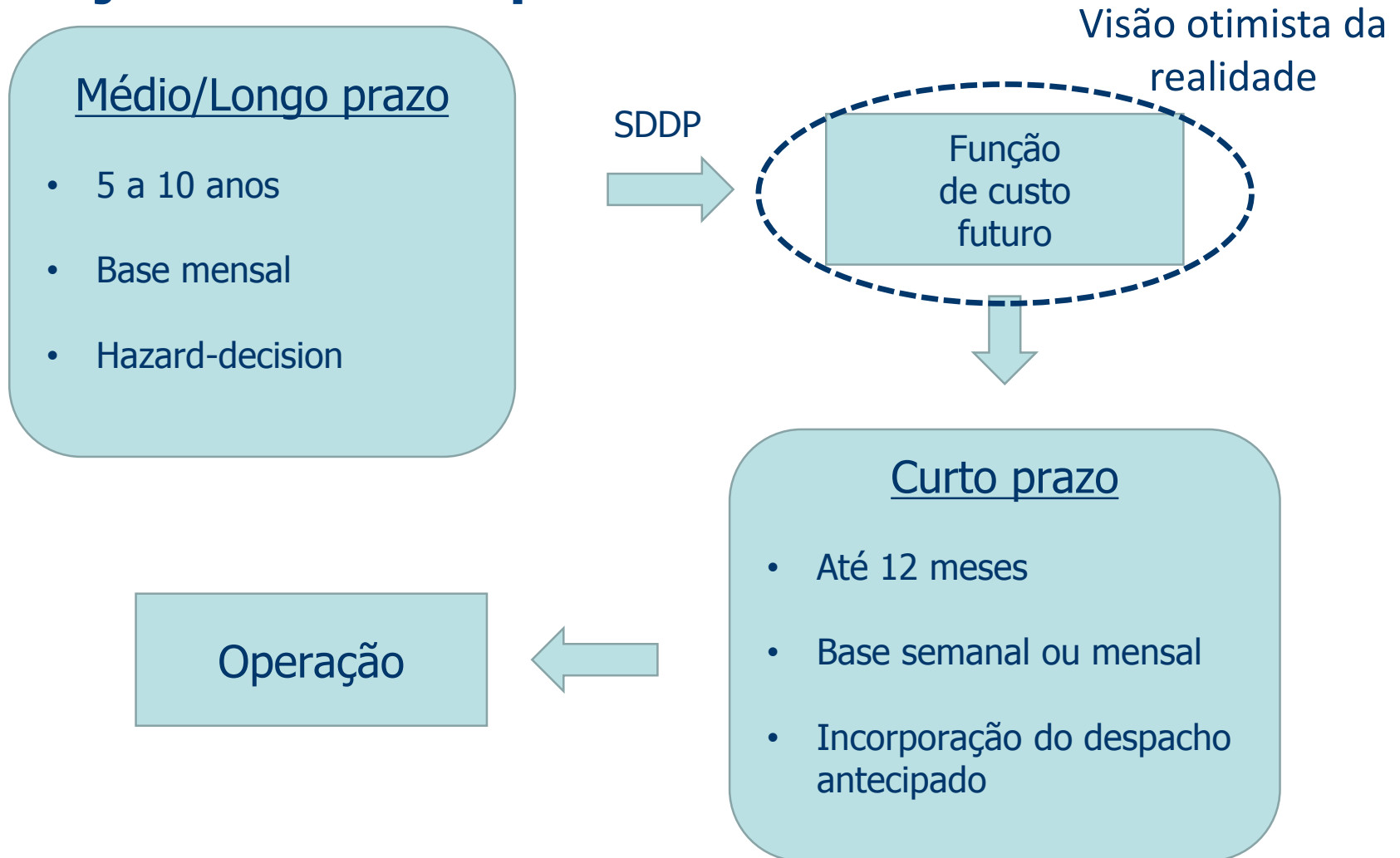


Mais próximo da realidade
operacional

Planejamento do despacho hidrotérmico



Planejamento do despacho hidrotérmico



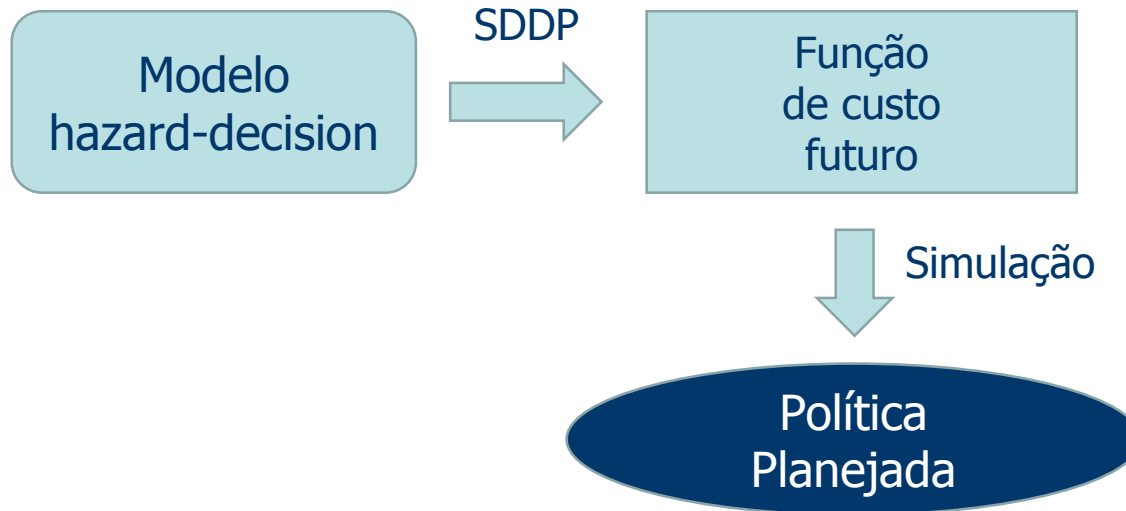
Políticas de despacho

- Política planejada



Políticas de despacho

- Política planejada



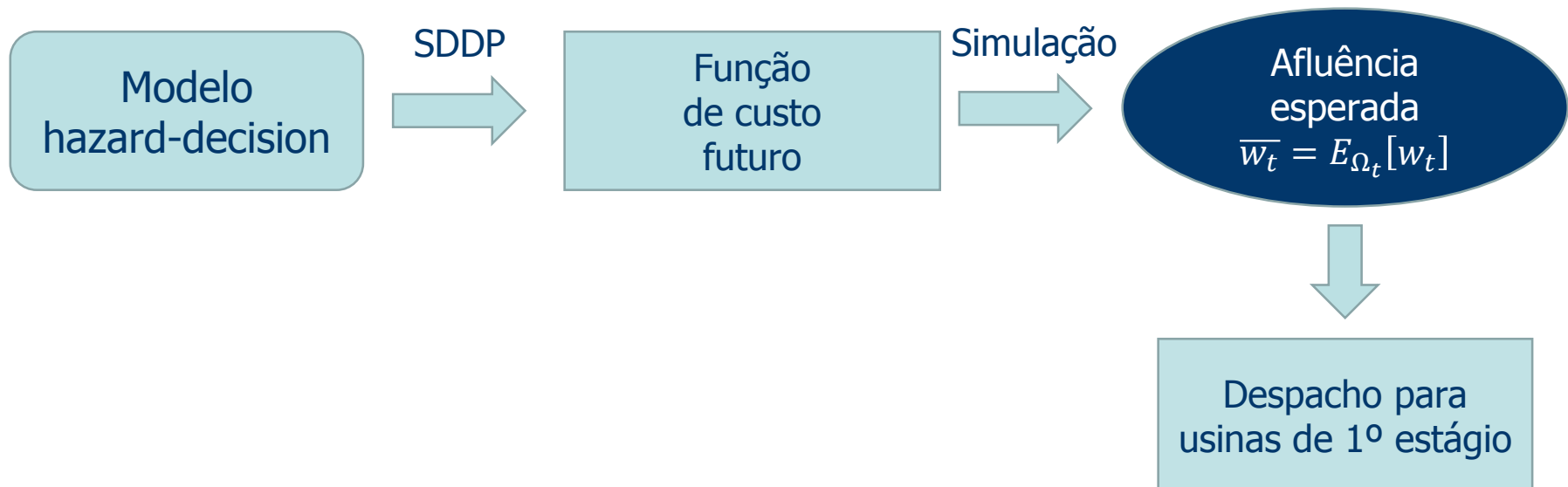
Políticas de despacho

- Política **inconsistente**



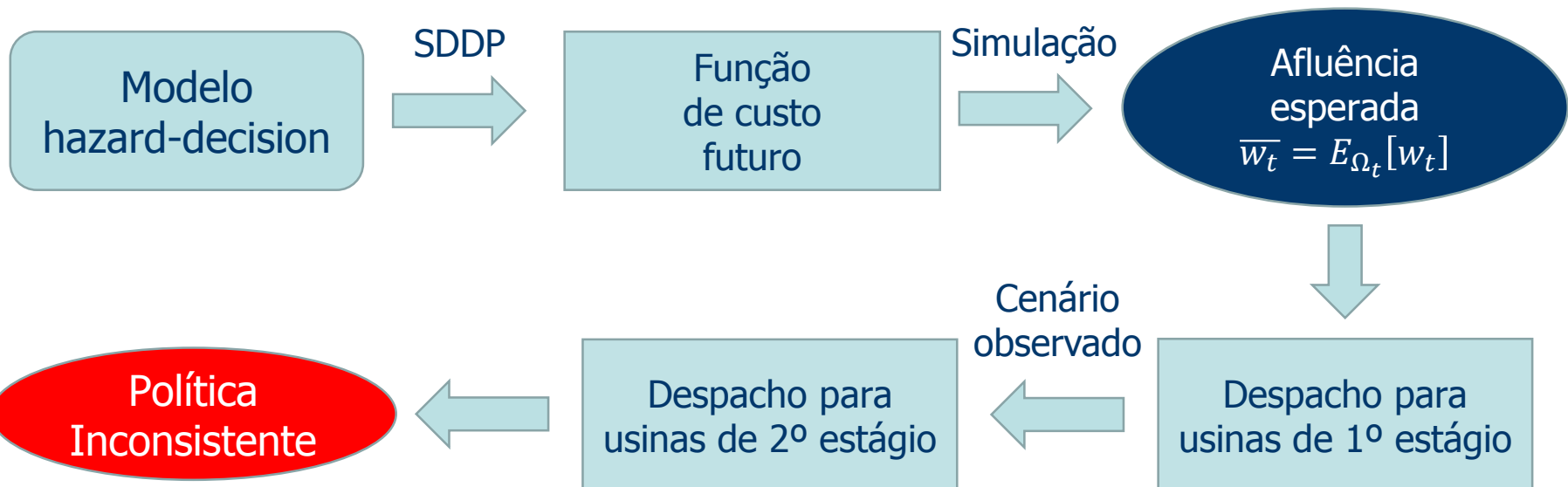
Políticas de despacho

- Política **inconsistente**



Políticas de despacho

- Política **inconsistente**



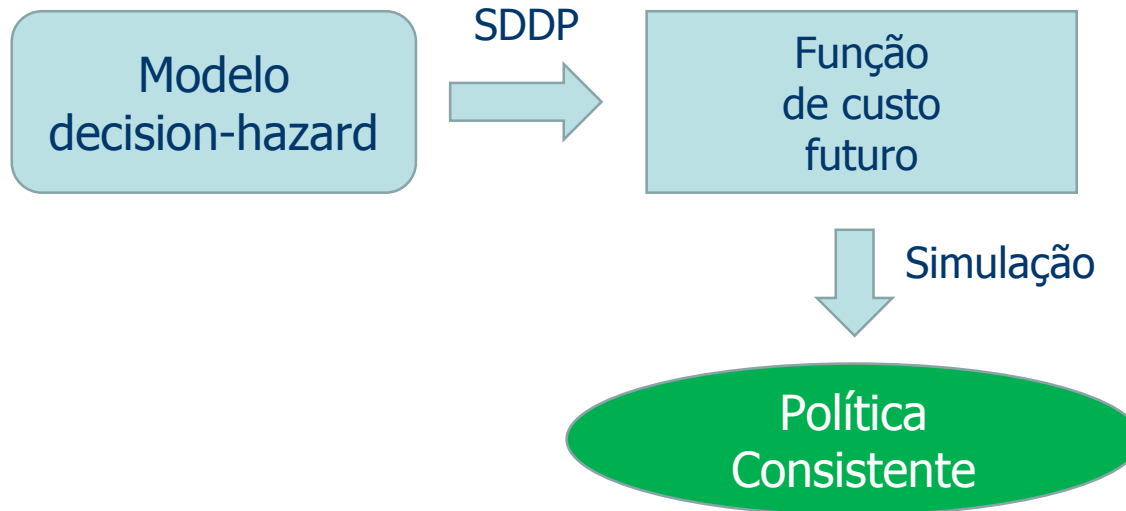
Políticas de despacho

- Política consistente



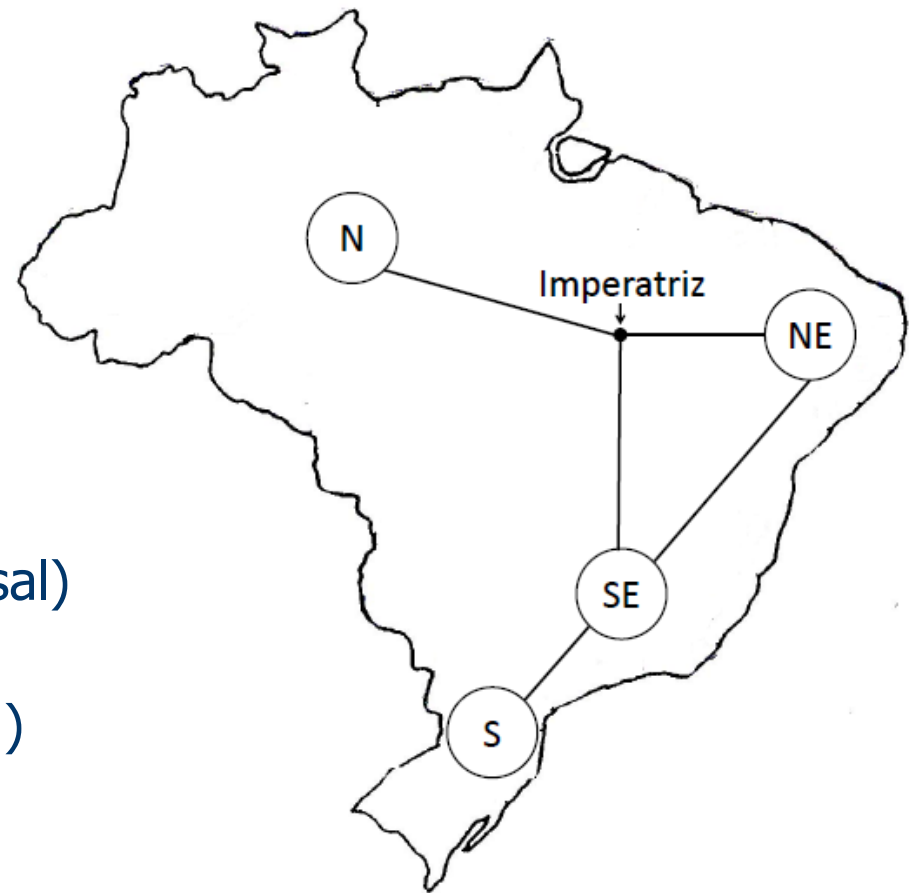
Políticas de despacho

- Política consistente



Caso Brasil

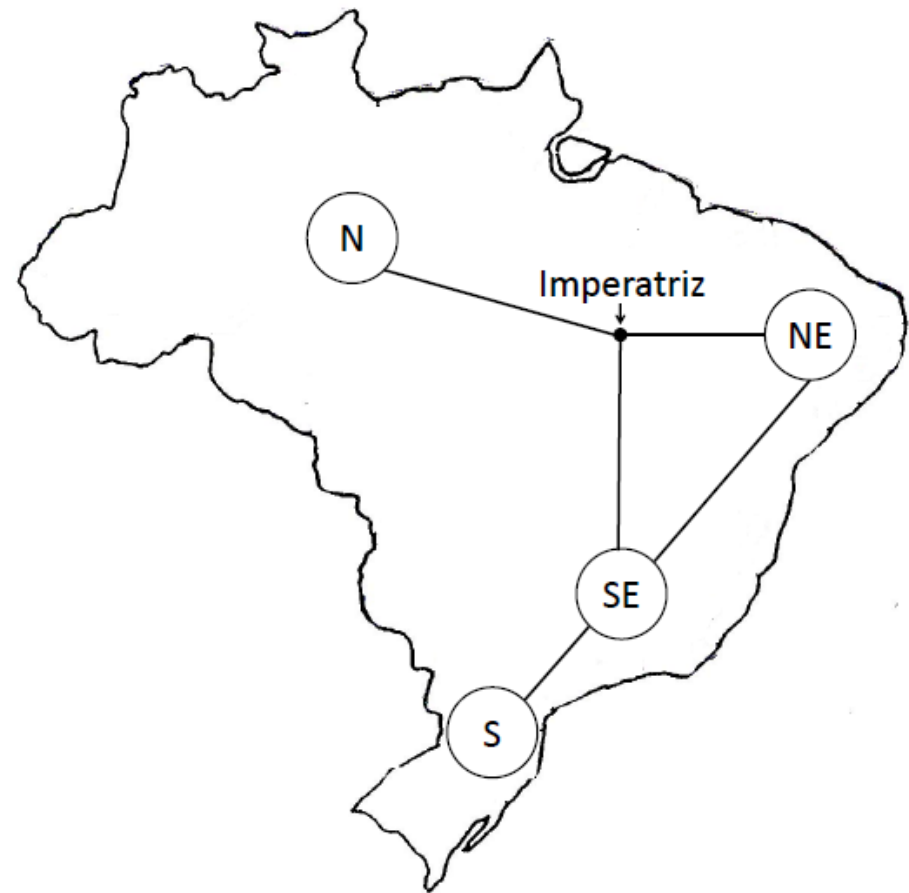
- 4 subsistemas
- 4 reservatórios
- 111 térmicas
- 5 anos de operação (base mensal)
- 25 cenários de afluência (lag=1)



Caso Brasil

- 1º Estágio
 - Nuclear
 - Carvão
 - Gás/GNL

- 2º Estágio
 - Hidro
 - Outras térmicas



GAP de Inconsistência

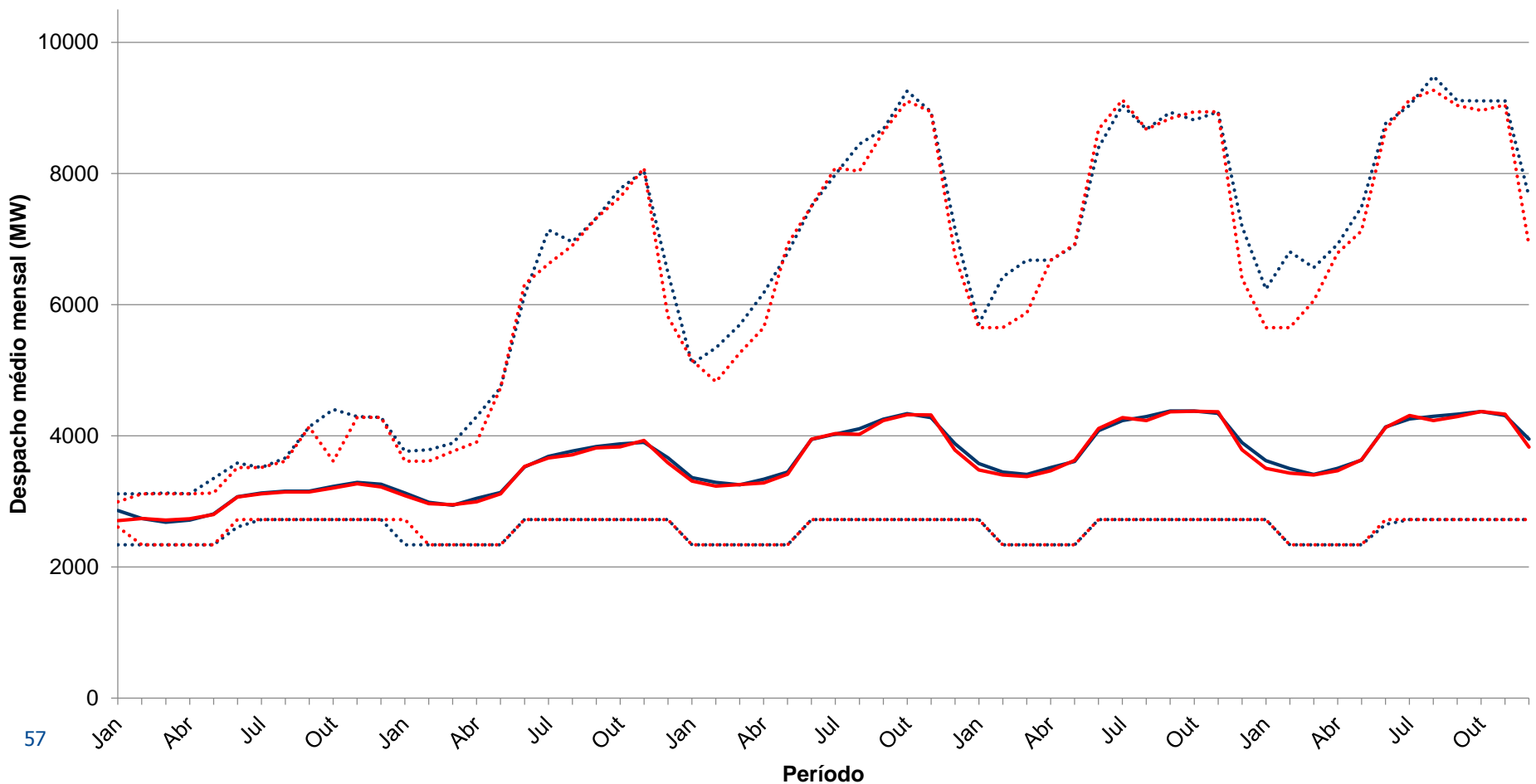
Valor esperado da diferença de custo entre as políticas implementada (**inconsistente**) e a planejada

$$GAP = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \sum_{\omega=1}^M c'_t g_{t,\omega}^{Inc} - \frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \sum_{\omega=1}^M c'_t g_{t,\omega}^{Plan}$$

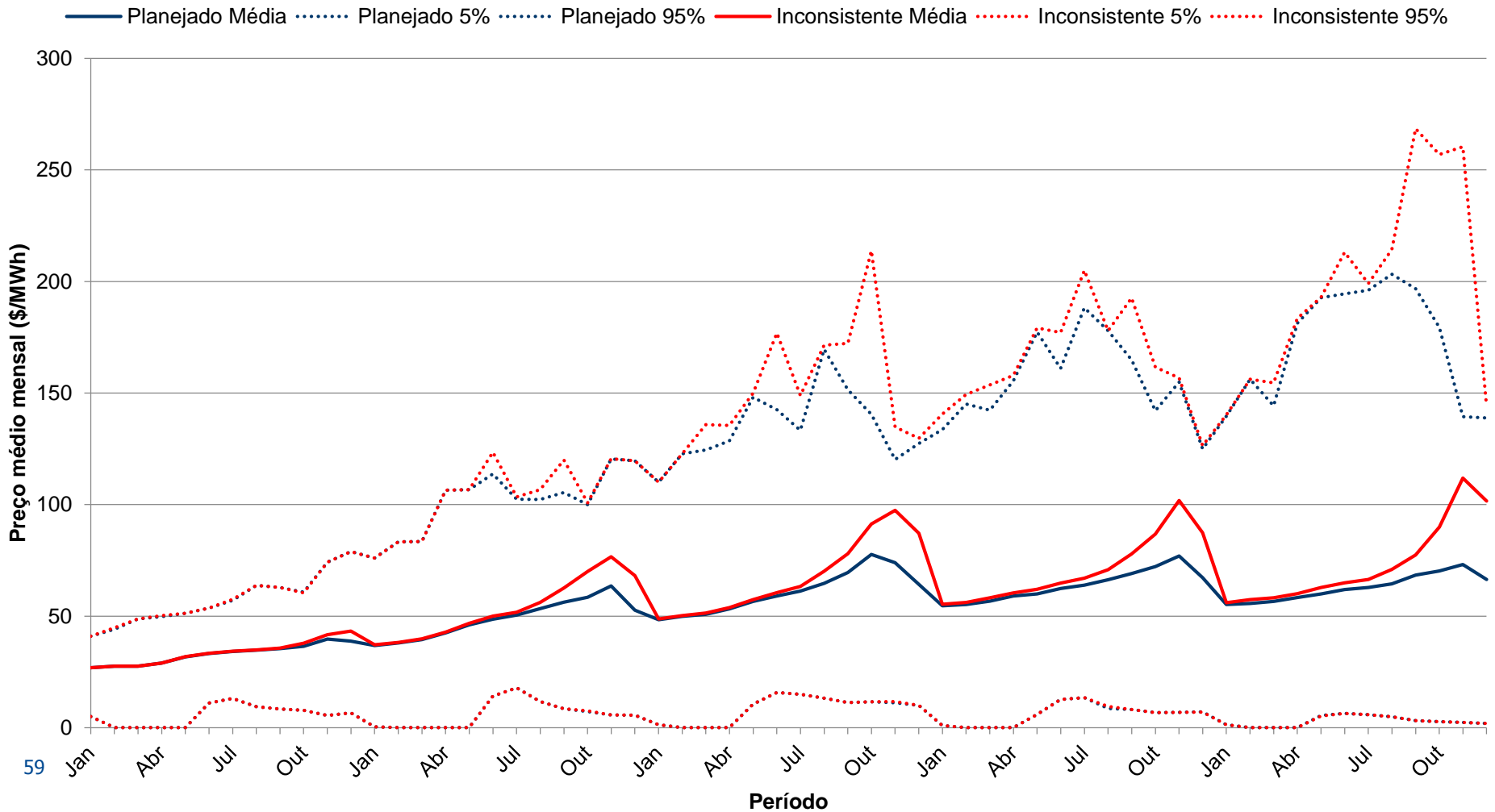
GAP de Inconsistência	MMR\$	% Custo Planejado
IC 95%	1361,85 – 1623,47	10,92 – 13,02

Térmicas de 1º estágio

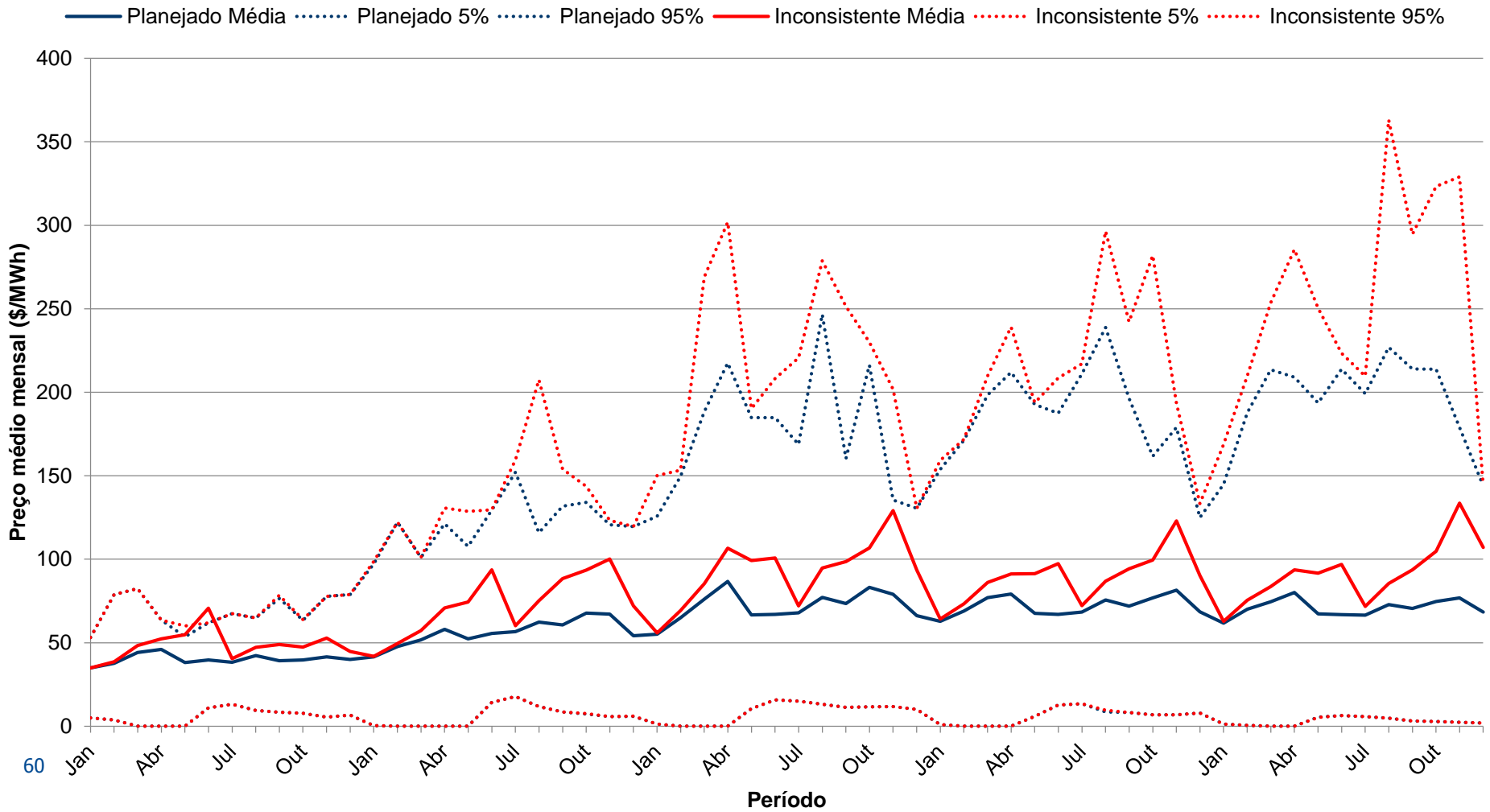
— Planejado Média Planejado 5% Planejado 95% — Inconsistente Média Inconsistente 5% Inconsistente 95%



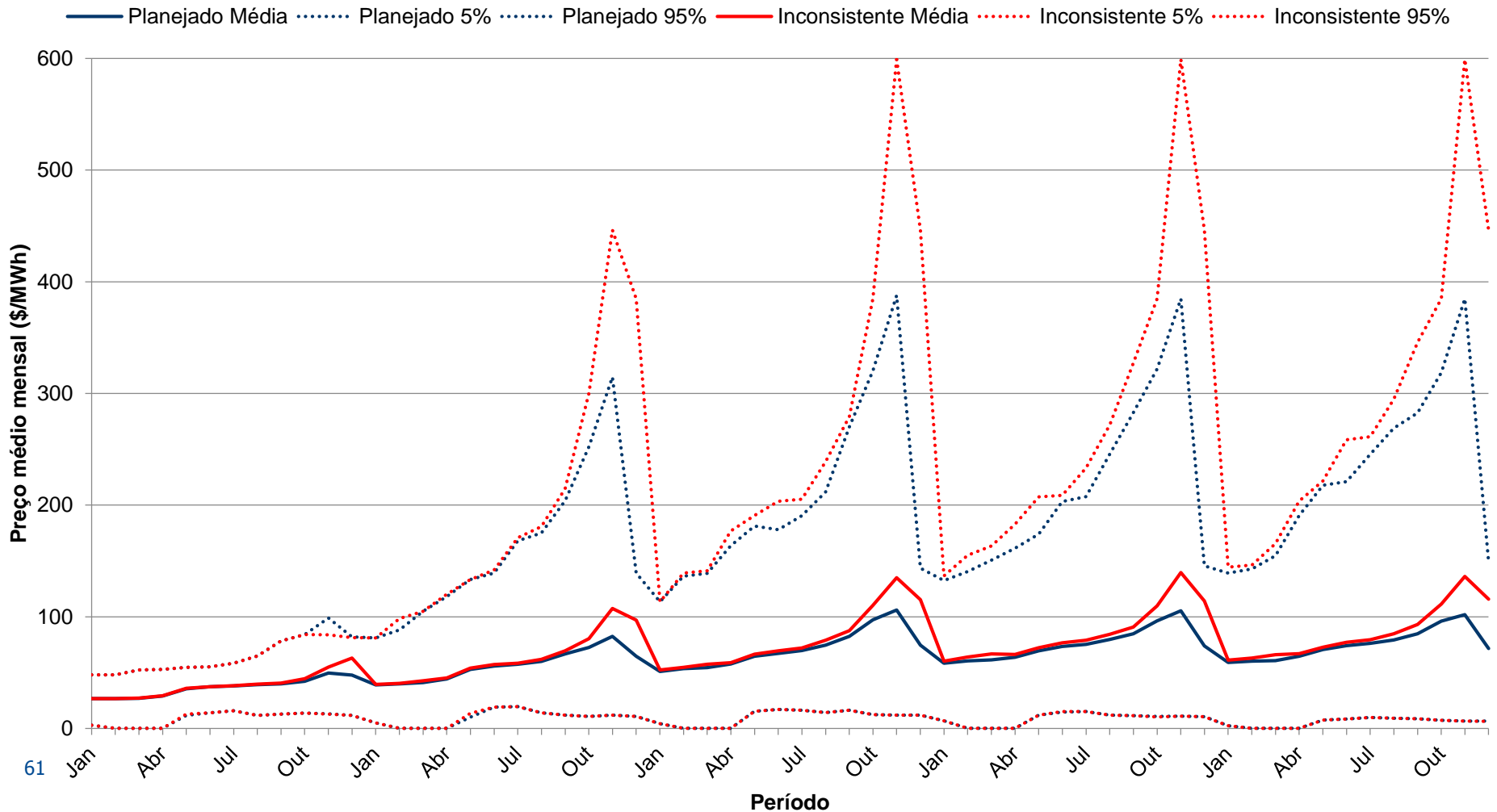
Custo Marginal de Operação - SE



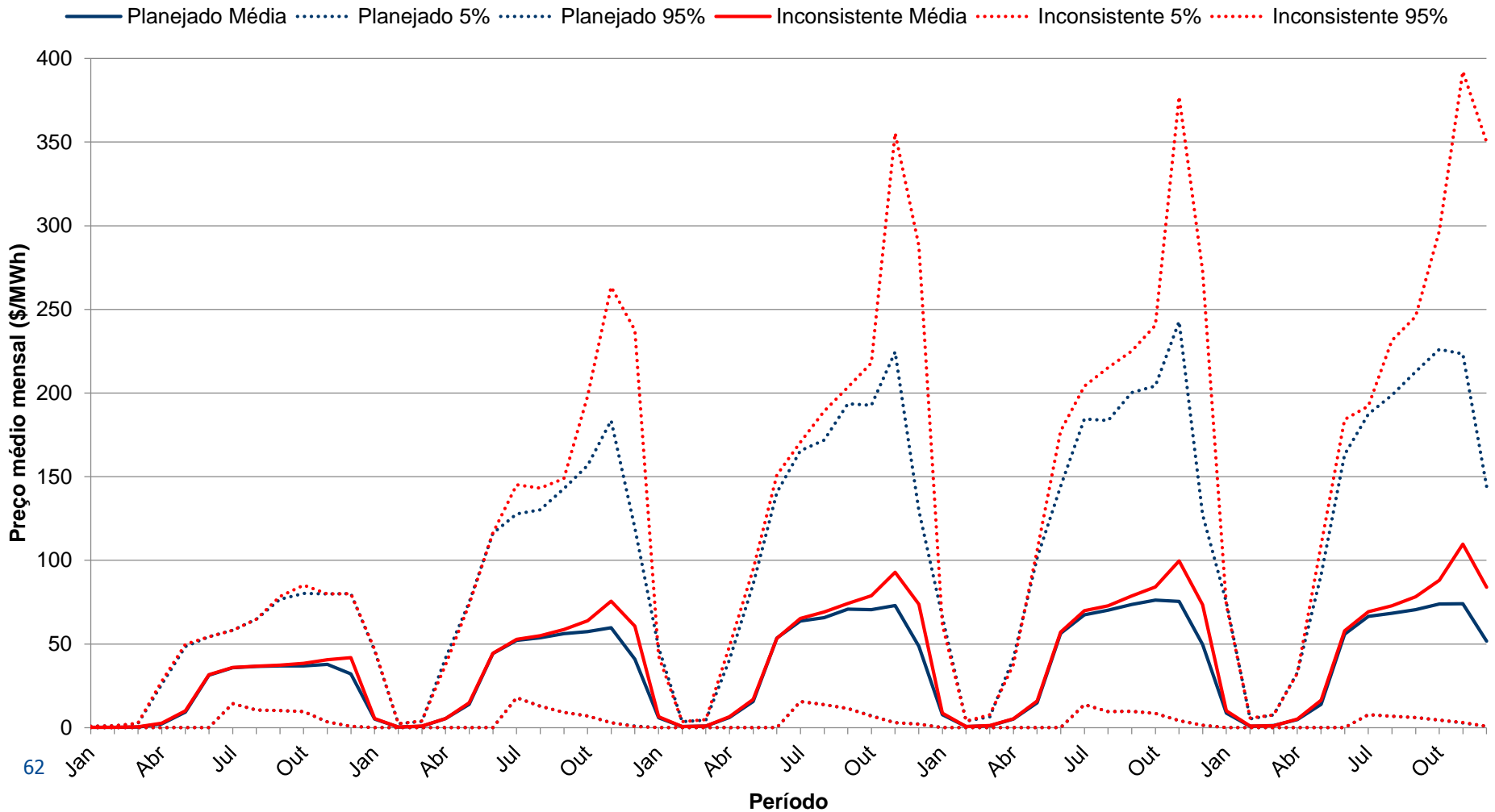
Custo Marginal de Operação - S



Custo Marginal de Operação - NE



Custo Marginal de Operação - N



Benefício da Consistência

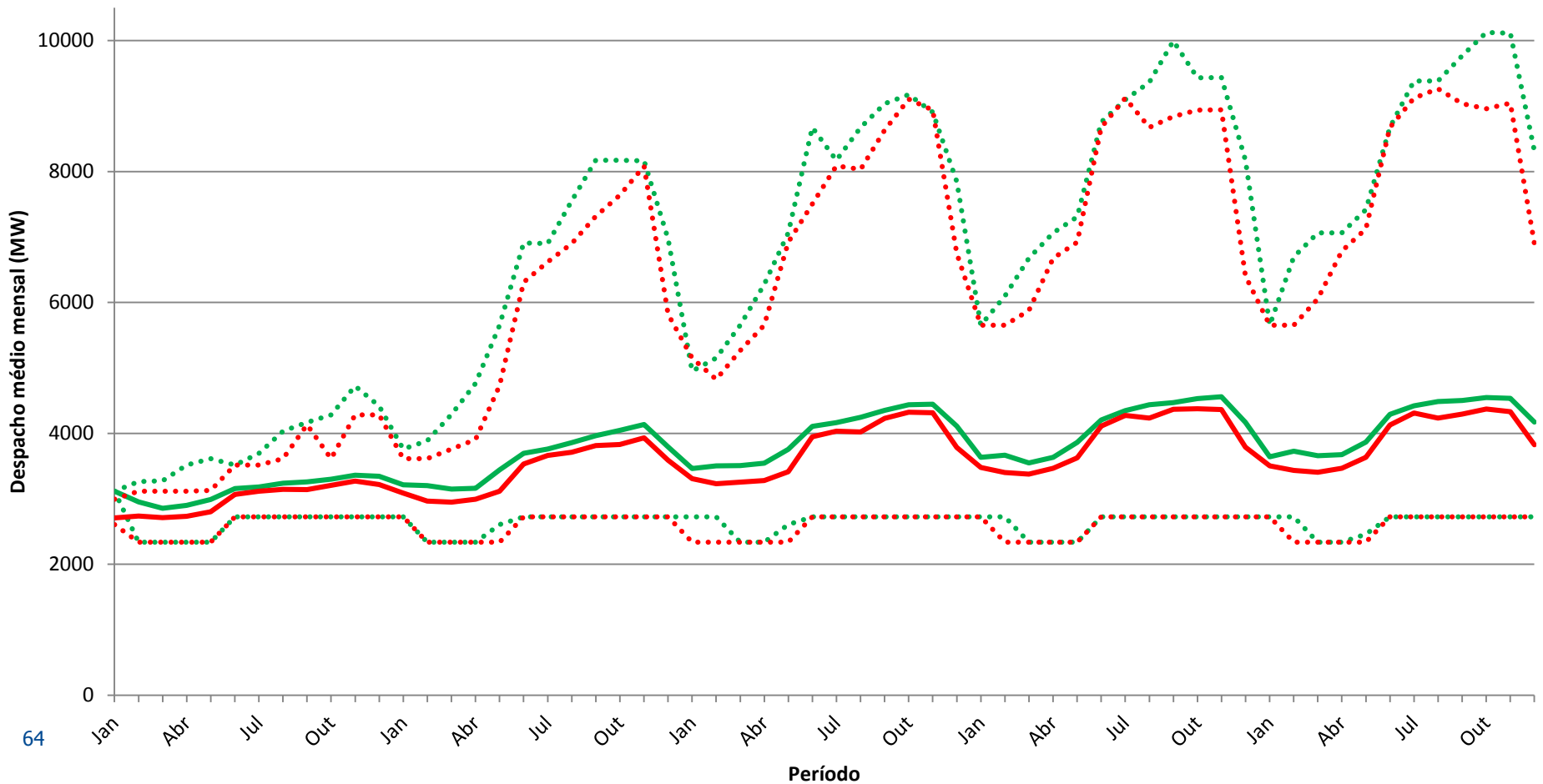
Valor esperado da diferença de custo entre as políticas implementada (**inconsistente**) e a **consistente**

$$GAP = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \sum_{\omega=1}^M c'_t g_{t,\omega}^{Inc} - \frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \sum_{\omega=1}^M c'_t g_{t,\omega}^{Cons}$$

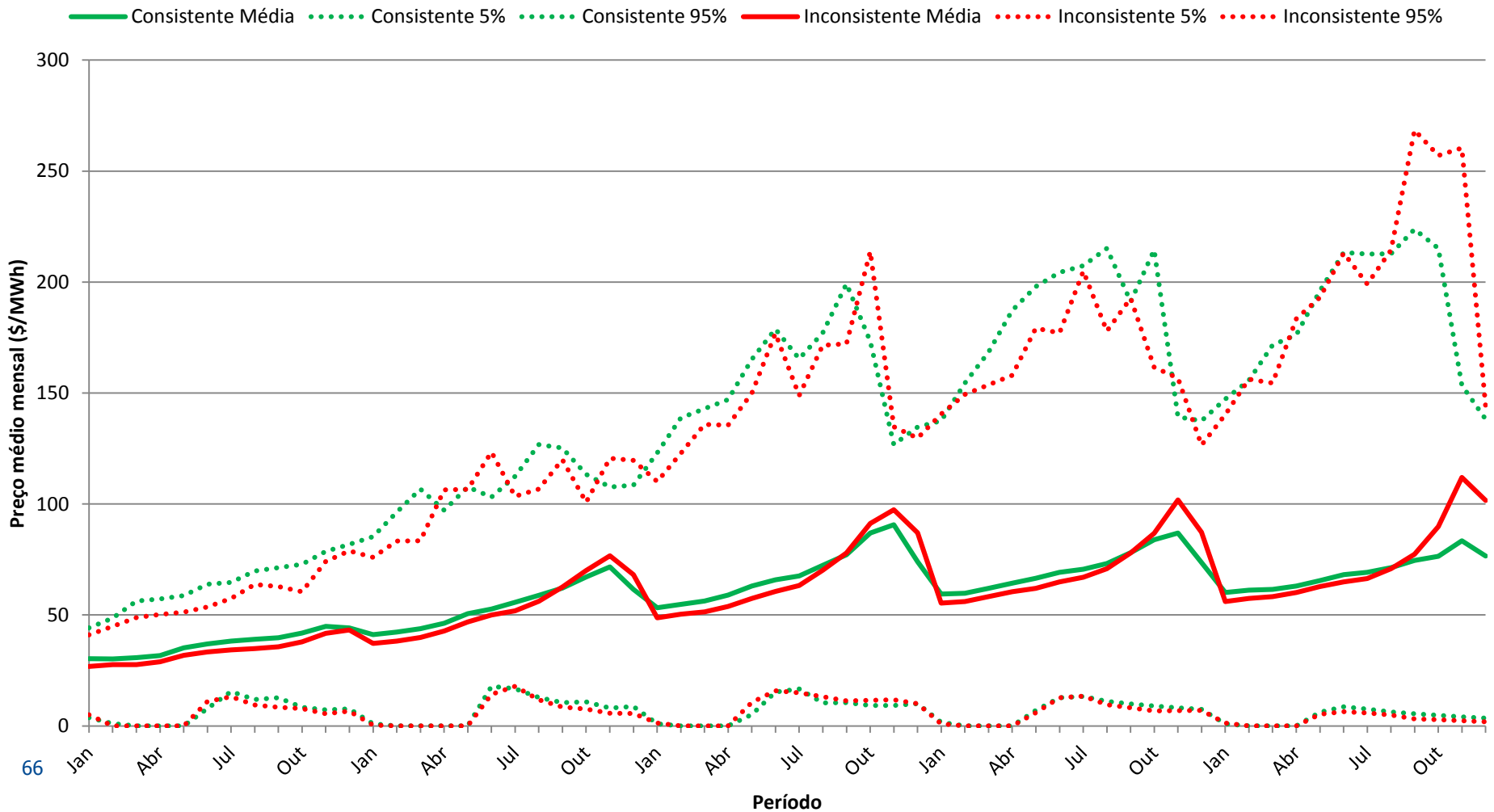
Benefício da Consistência	MMR\$	% Custo Planejado
IC 95%	555,20 – 921,07	4,45 – 7,39

Térmicas de 1º estágio

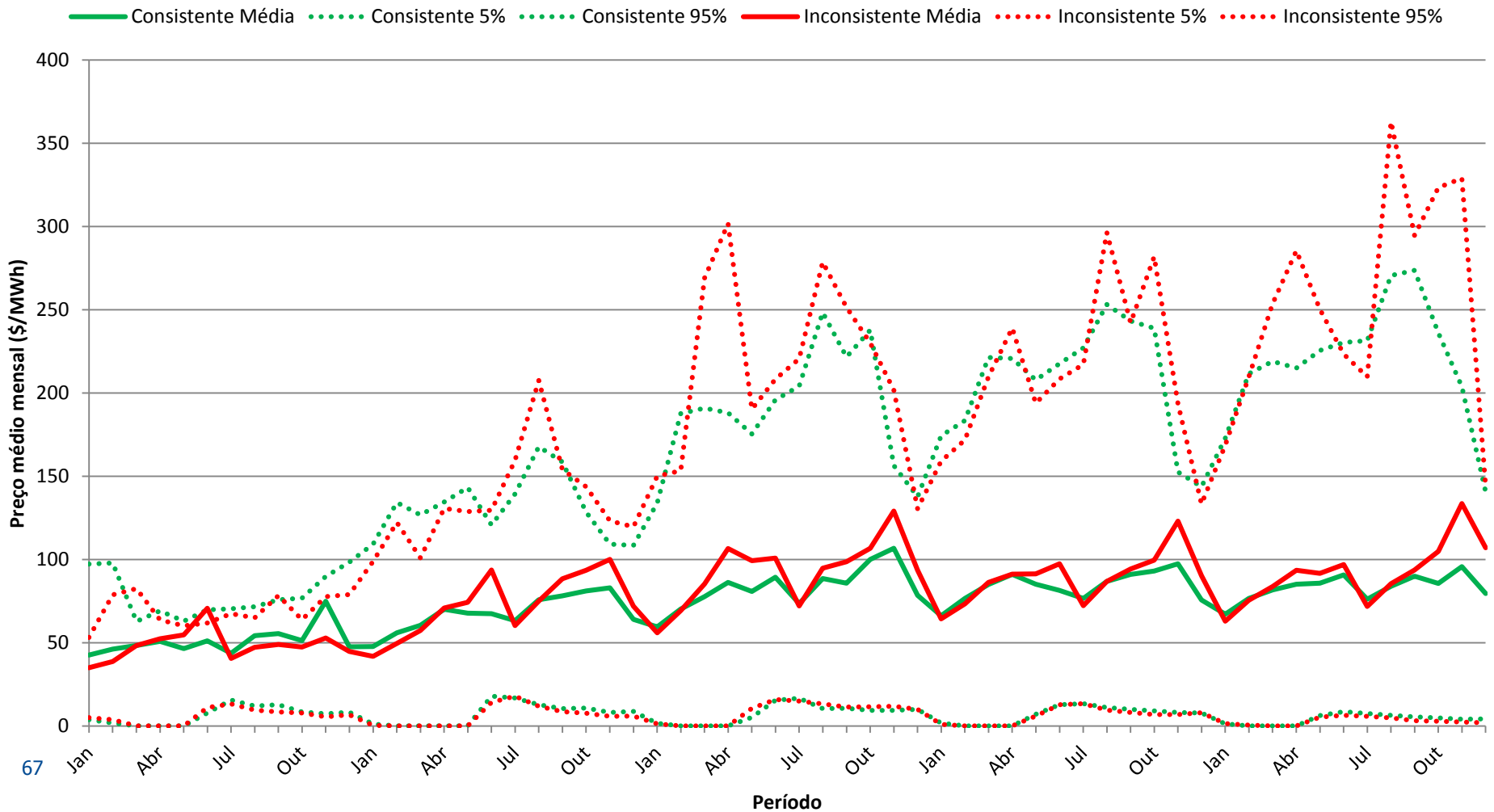
— Consistente Média Consistente 5% Consistente 95% — Inconsistente Média Inconsistente 5% Inconsistente 95%



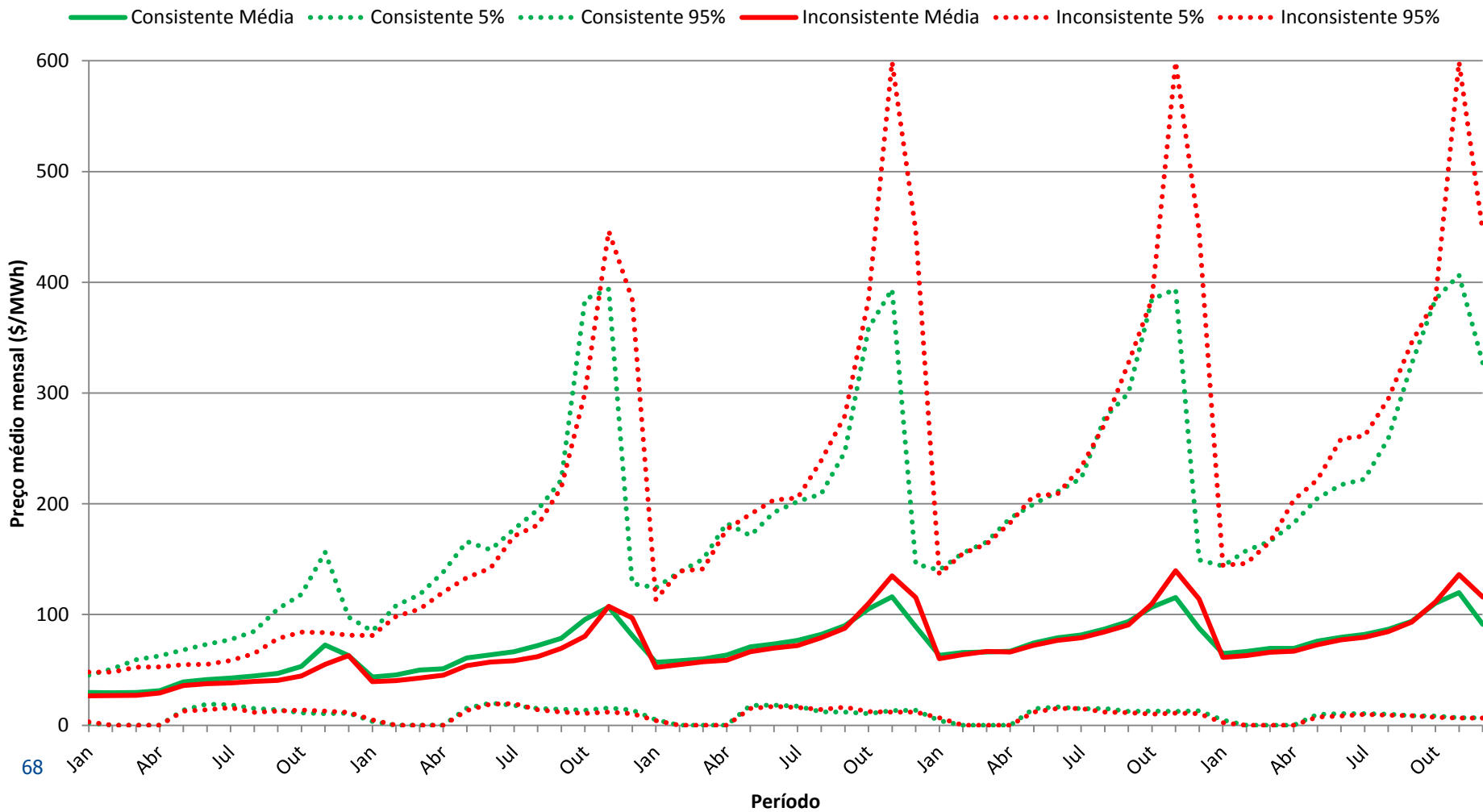
Custo Marginal de Operação - SE



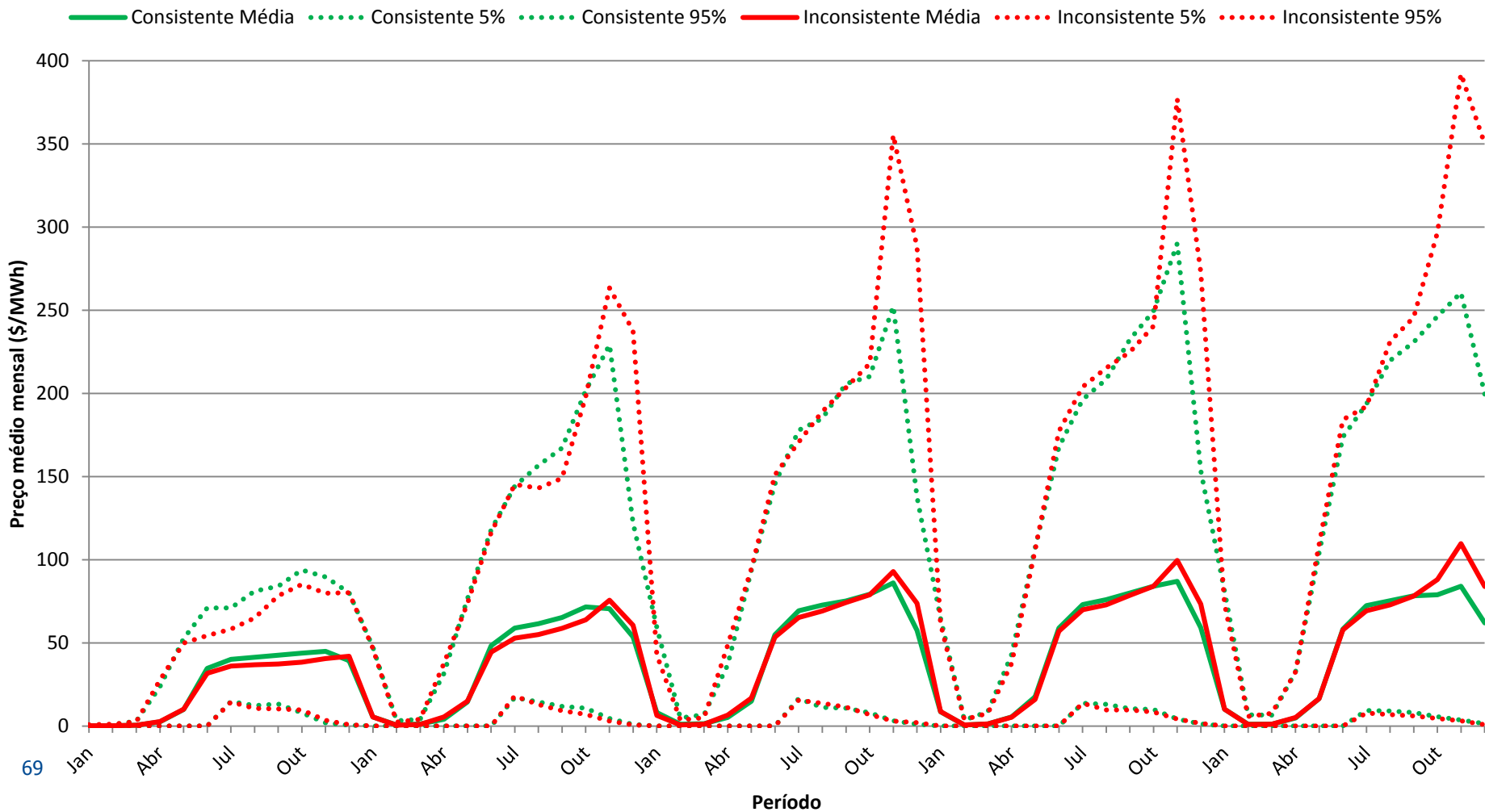
Custo Marginal de Operação - S



Custo Marginal de Operação - NE

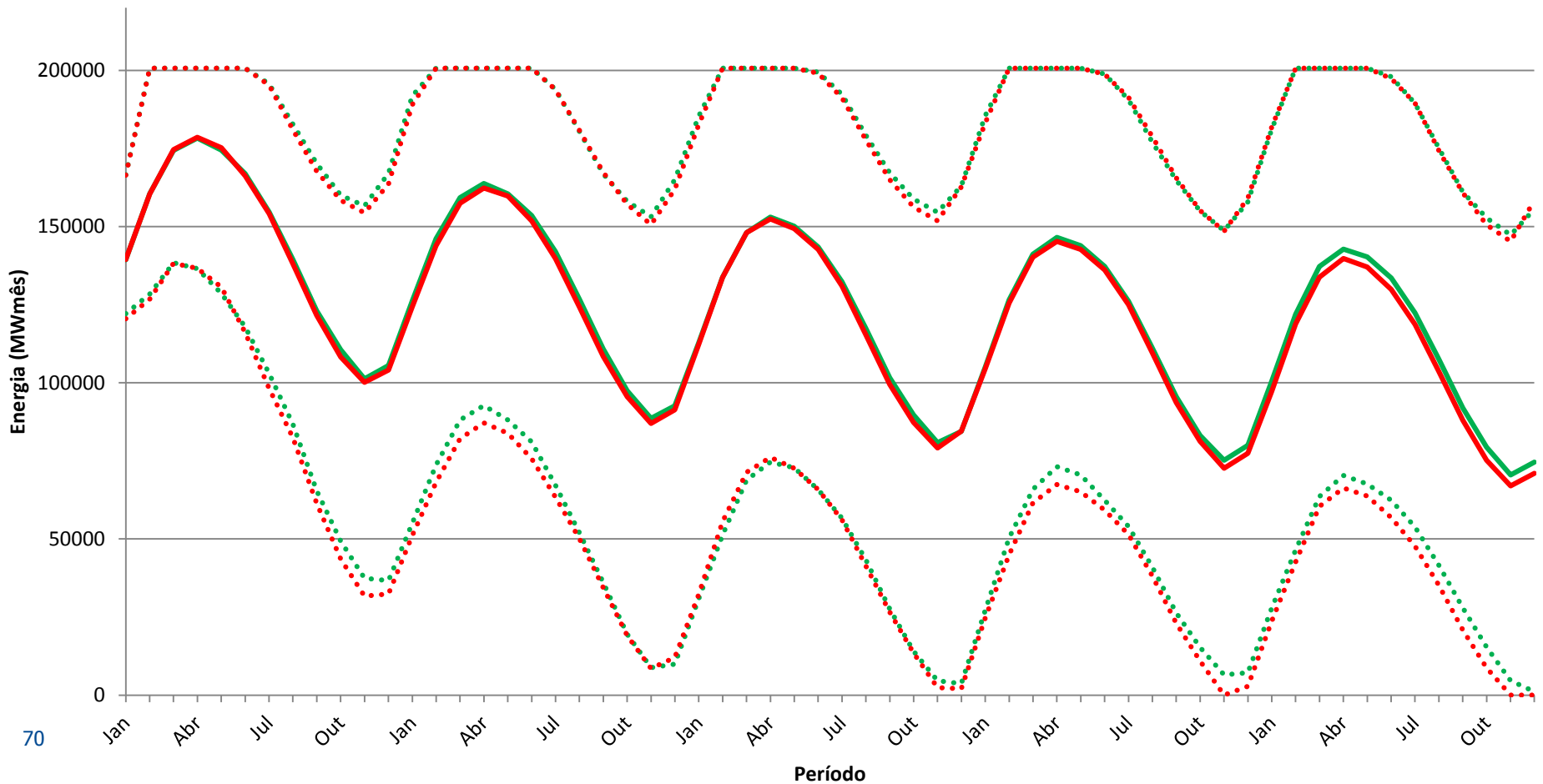


Custo Marginal de Operação - N

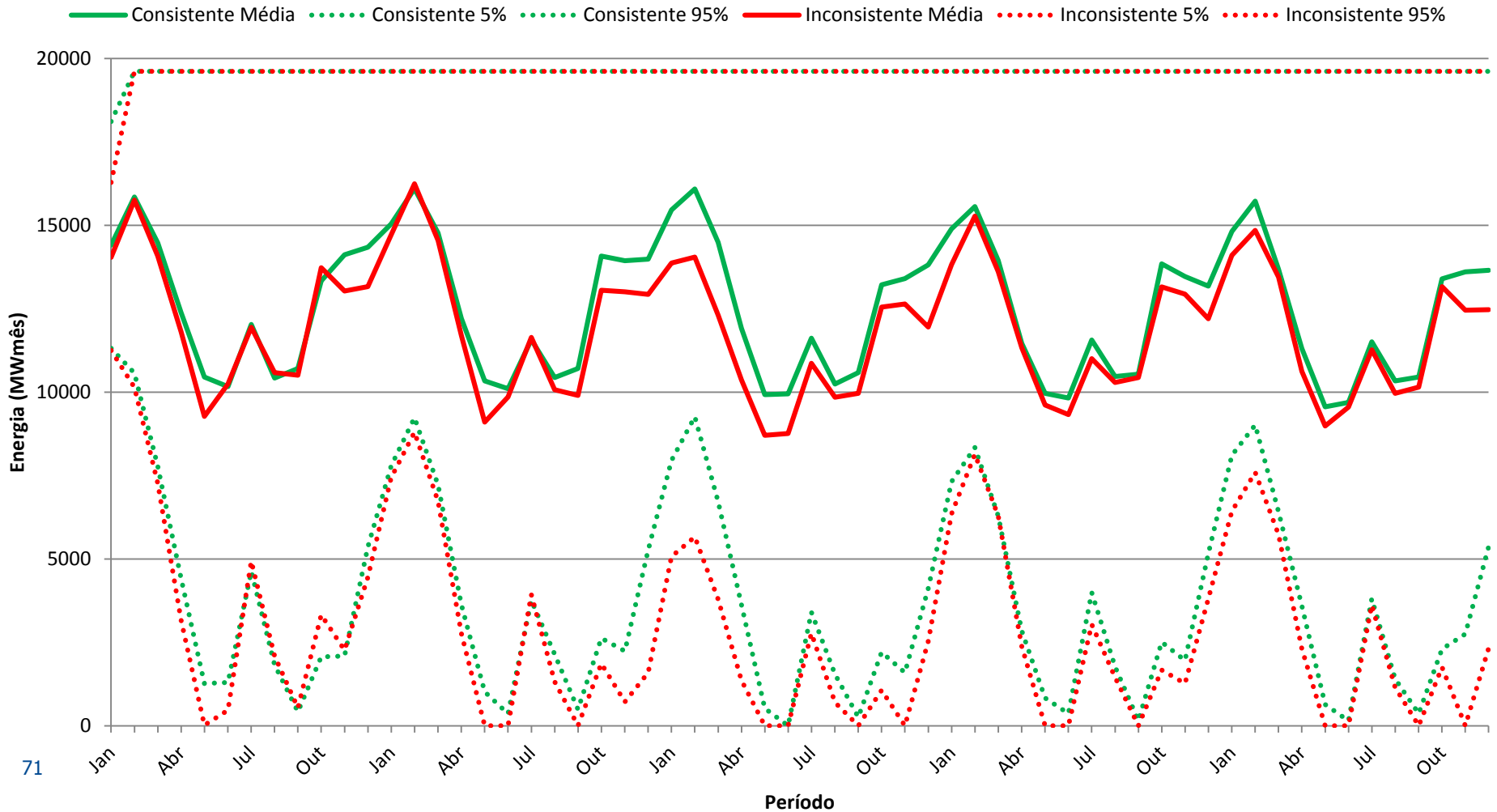


Reservatório SE

— Consistente Média Consistente 5% Consistente 95% — Inconsistente Média Inconsistente 5% Inconsistente 95%

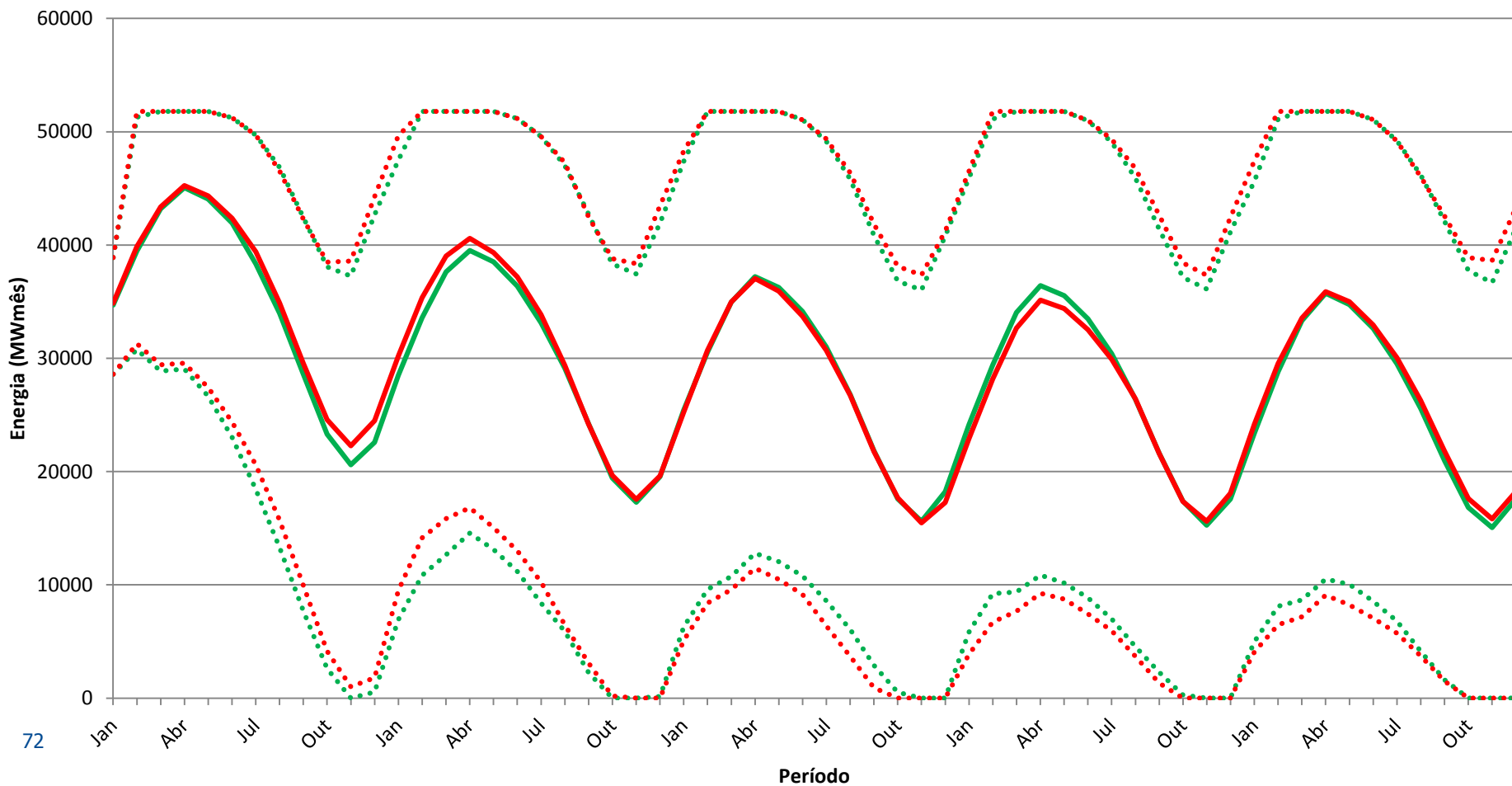


Reservatório S



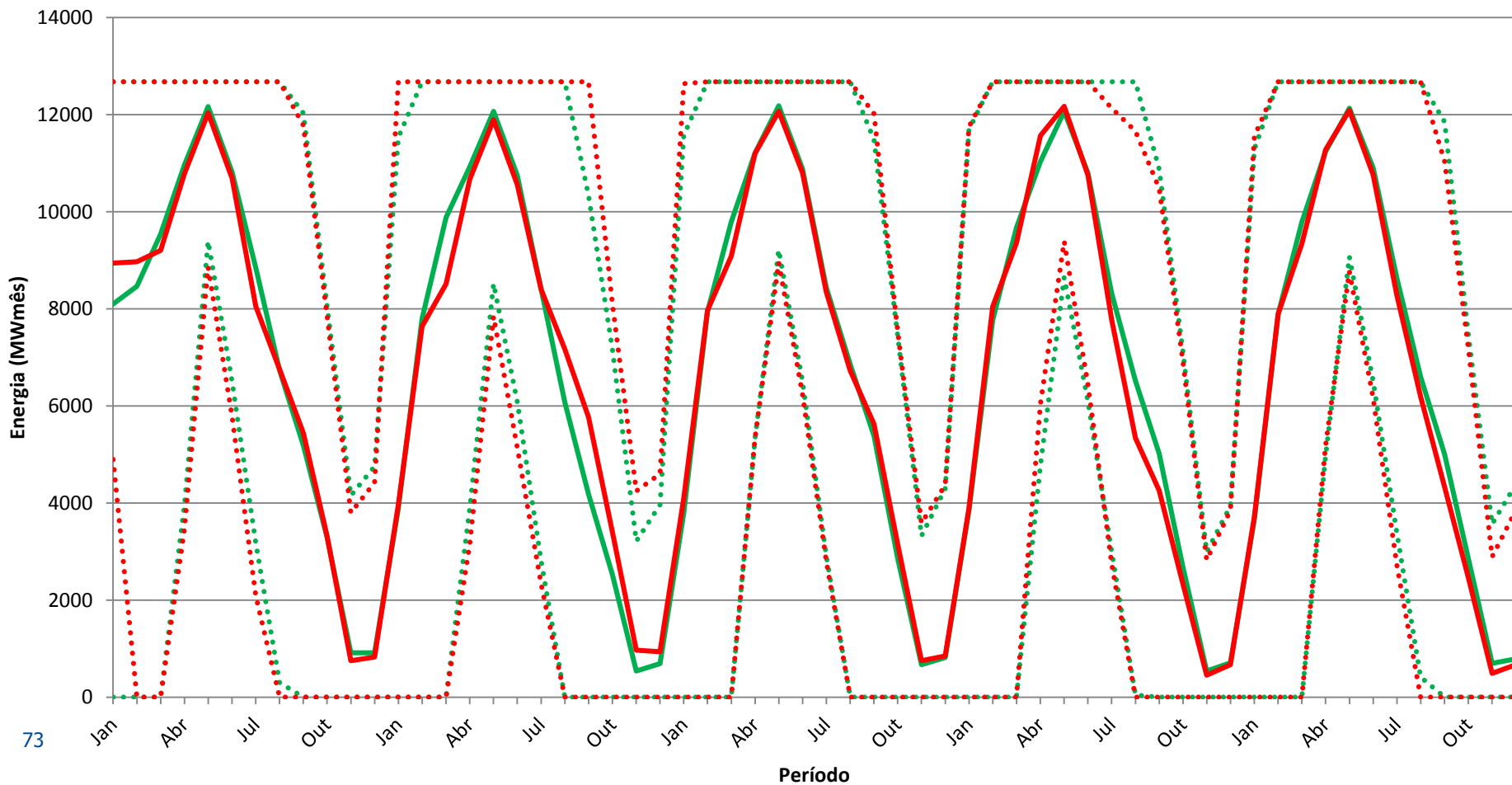
Reservatório NE

— Consistente Média Consistente 5% Consistente 95% — Inconsistente Média Inconsistente 5% Inconsistente 95%



Reservatório N

— Consistente Média Consistente 5% Consistente 95% — Inconsistente Média Inconsistente 5% Inconsistente 95%



Conclusões

Além de fornecer resultados temporalmente consistentes, o planejamento da operação utilizando uma estrutura decision-hazard tem como efeitos:

- Diminuição do despacho das termelétricas mais caras
- Menor volatilidade no preço da energia
- Redução do custo total de operação
- Uso mais racional dos reservatórios hídricos



fgvenergia.fgv.br

André Lawson
andre.sampaio@fgv.br

