

Modelo de Expansão da Geração Considerando Requisito de Reserva Probabilística Dinâmica

Weslly de Sousa Moraes



Setembro - 2018

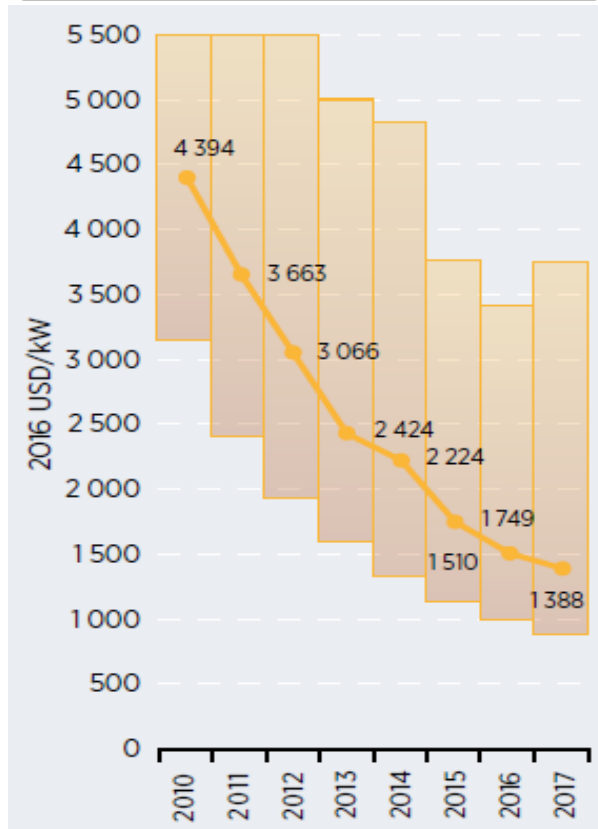


Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

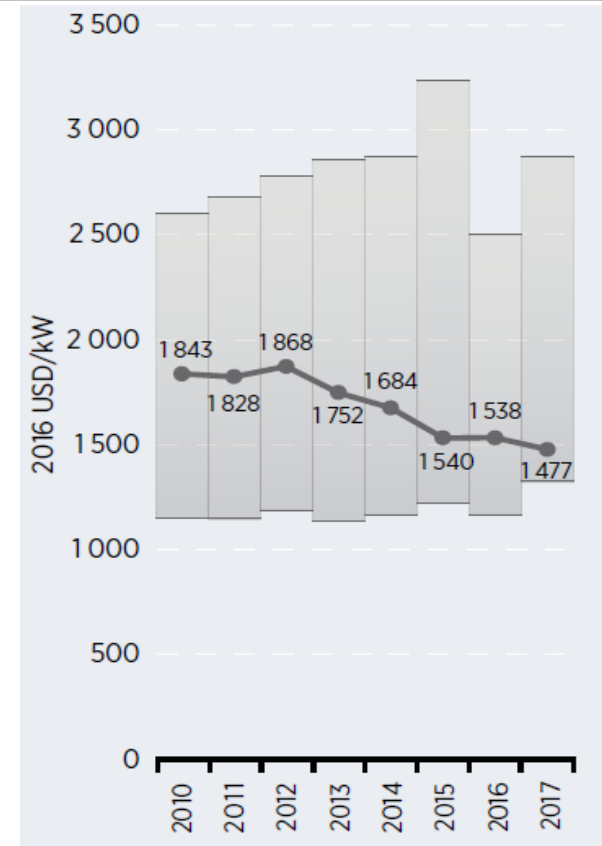
Motivação – Modelos de Expansão e a Inserção de Fontes Intermitentes

Fontes Intermitentes - Competitividade Econômica

Custos de Instalação - SFV



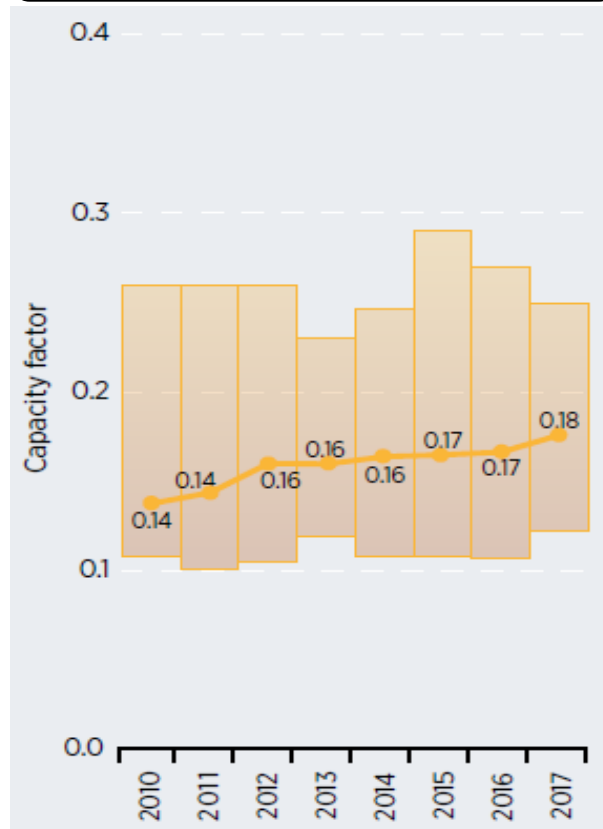
Custos de Instalação – Eólica *onshore*



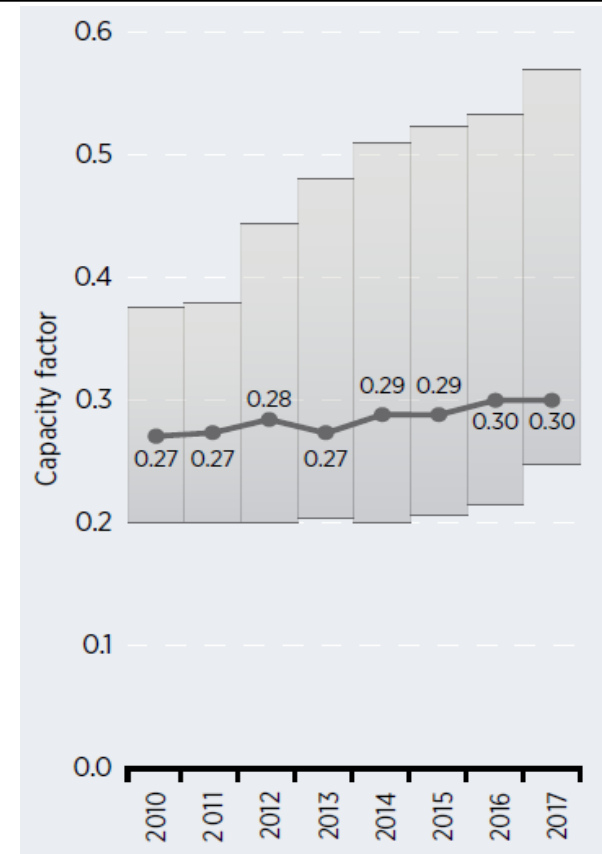
Fonte: International Renewable Agency (IRENA) – Power Costs 2018

Fontes Intermitentes - Competitividade Econômica

Fator de Capacidade - SFV



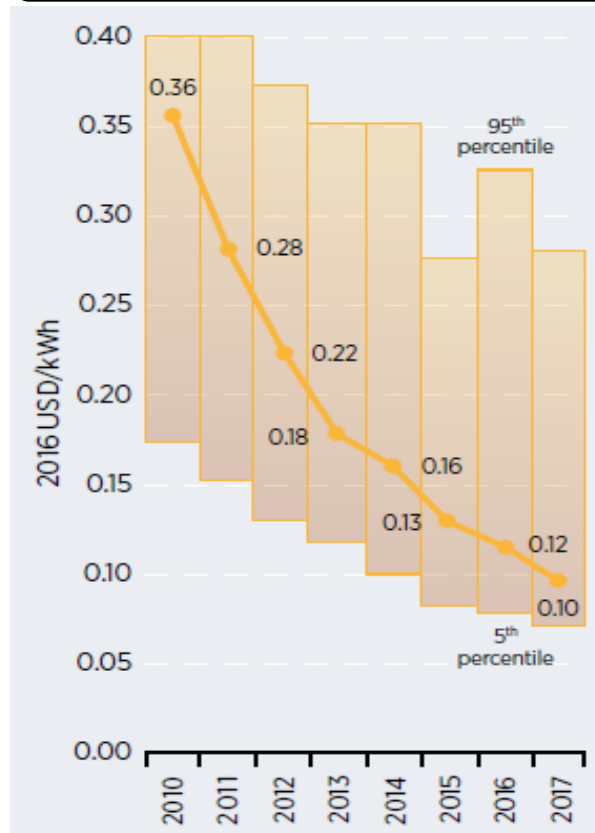
Fator de Capacidade – Eólica *onshore*



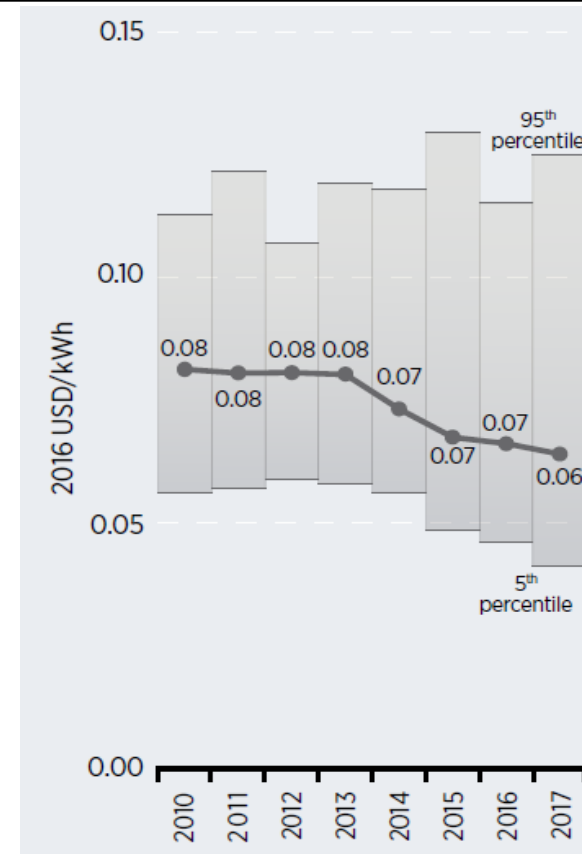
Fonte: International Renewable Agency (IRENA) – Power Costs 2018

Fontes Intermitentes - Competitividade Econômica

LCOE - SFV



LCOE – Eólica onshore



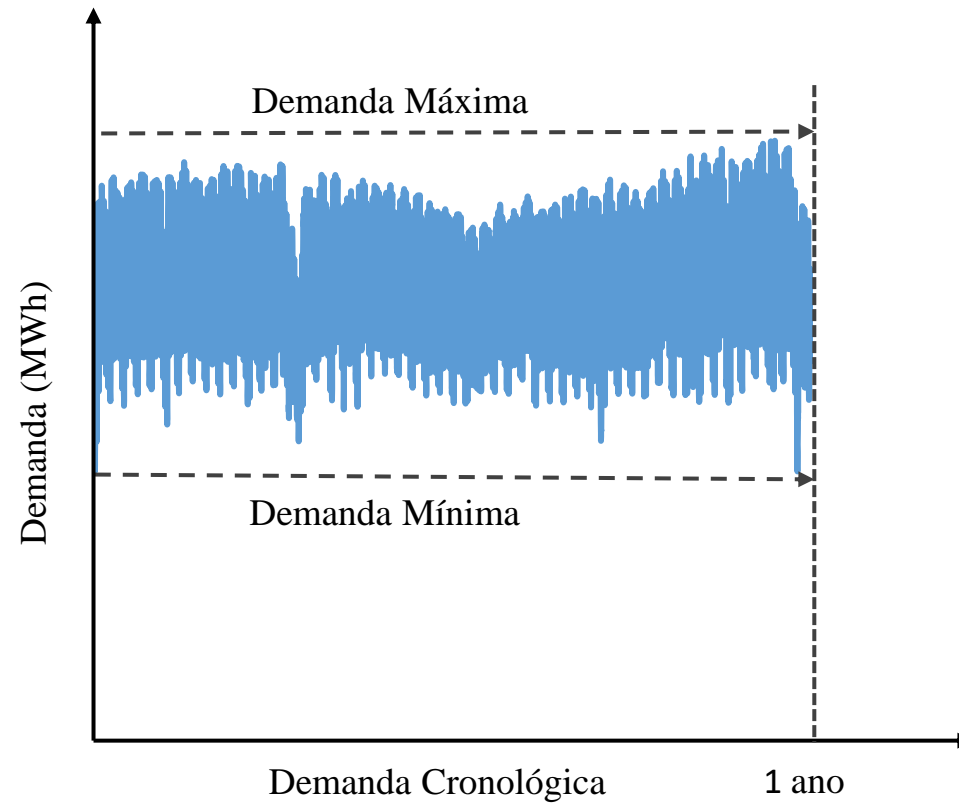
Fonte: International Renewable Agency (IRENA) – Power Costs 2018



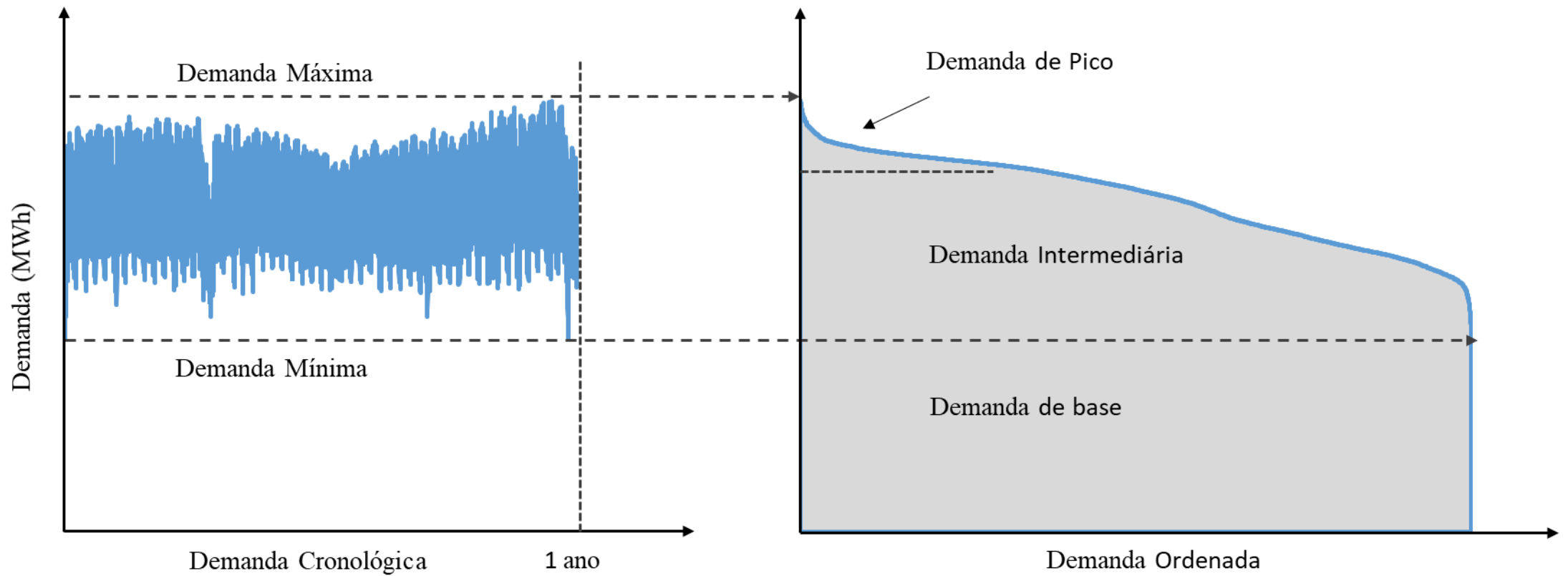
Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Planejamento da Expansão com Grande Inserção de Fontes Intermitentes

Perfil de Demanda em um Sistema Elétrico



Divisão em Patamares



Divisão em Classes de Geração

Geração de Base

- Alta custo de investimento
- Baixo custo de operativo
- Tipicamente provida por tecnologias com baixa flexibilidade
- Operam com alto fator de despacho

Geração intermediária

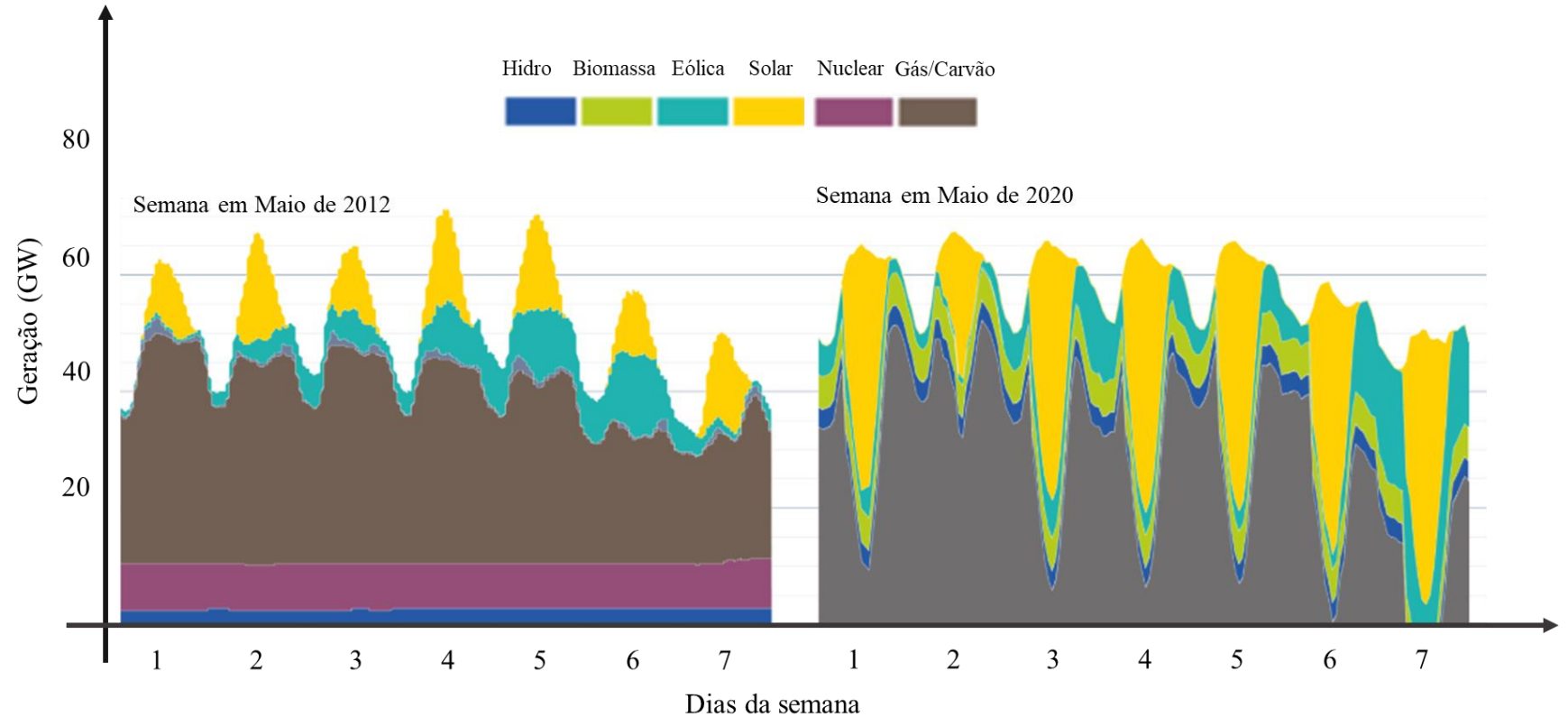
- Custos operativos maiores que Geração de Base
- Costumam apresentar maior flexibilidade
- Capacidade de modular carga ao longo do dia

Geração de Pico

- Maior custos de operação
- Menor custo de investimento
- Apresentam flexibilidade como umas das principais características

Mudança de Paradigma

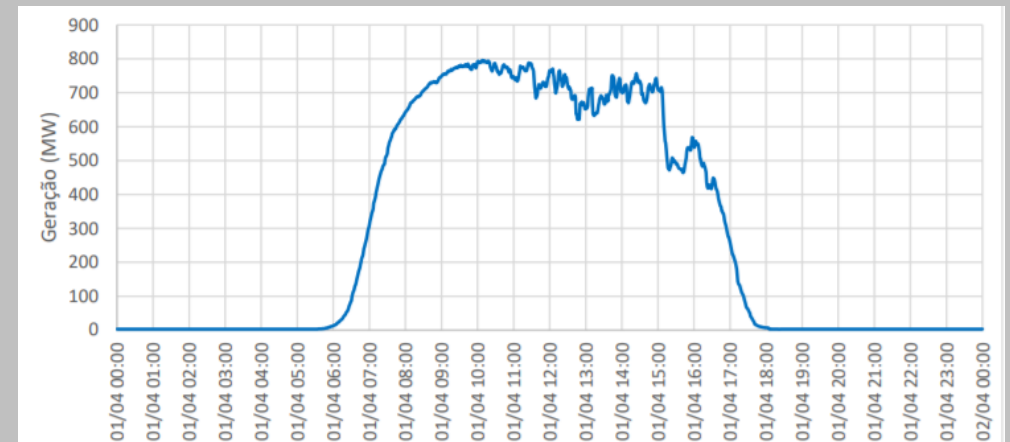
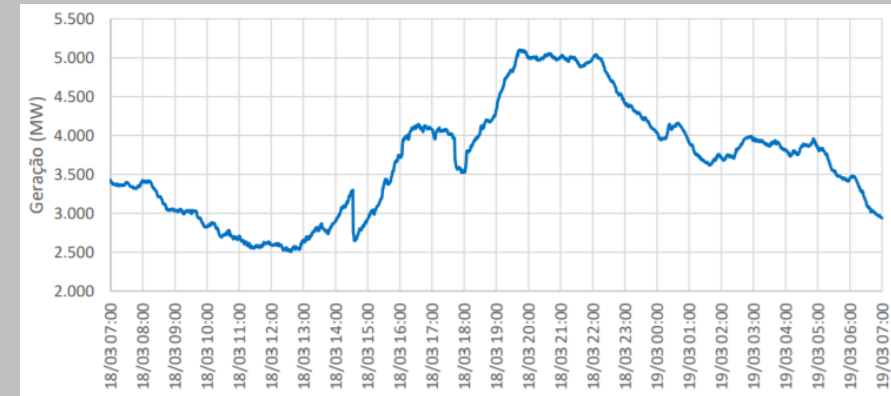
Fontes
intermitentes
substituindo
Geração de Base



Fonte: Making a success of the energy transition – BMWi - 2015

Desafios na Integração – Impactos Operativos

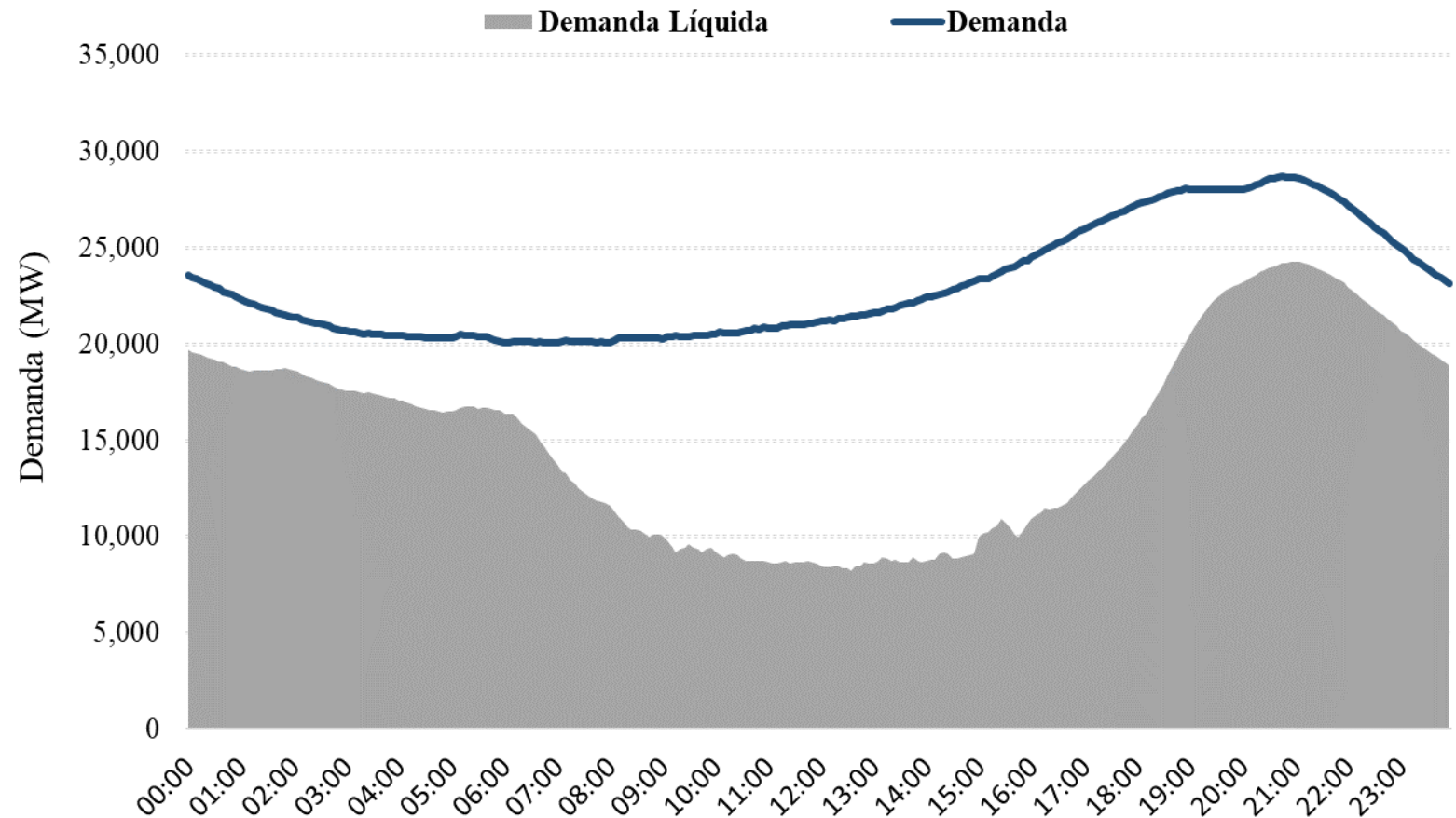
- Variabilidade e incerteza na oferta de energia
- Rampas acentuadas (subida e descida)
- Excesso/Falta de geração
- Aumento do número de ciclos térmicos



Fonte: Boletim de Operação Mensal – ONS - 2018

Flexibilidade de Geração

- Capacidade das usinas despacháveis de um sistema elétrico em ajustar sua geração para atender à demanda líquida, sob condições normais de operação
- Exemplo de curva de demanda líquida para o sistema da Califórnia



Flexibilidade por Meio de Outras Tecnologias e Serviços

- Uso de tecnologias de armazenamento



- Hidros reversíveis
- Baterias
- Carros elétricos

- Resposta da demanda

- Interconexões

Estabilidade e Reservas Operativas

- Capacidade de retornar a um estado normal de operação, após a ocorrência de uma contingência
- Uso de Reservas de Contingência
 - Reserva Primária
 - Reserva Secundária
 - Reserva Terciária

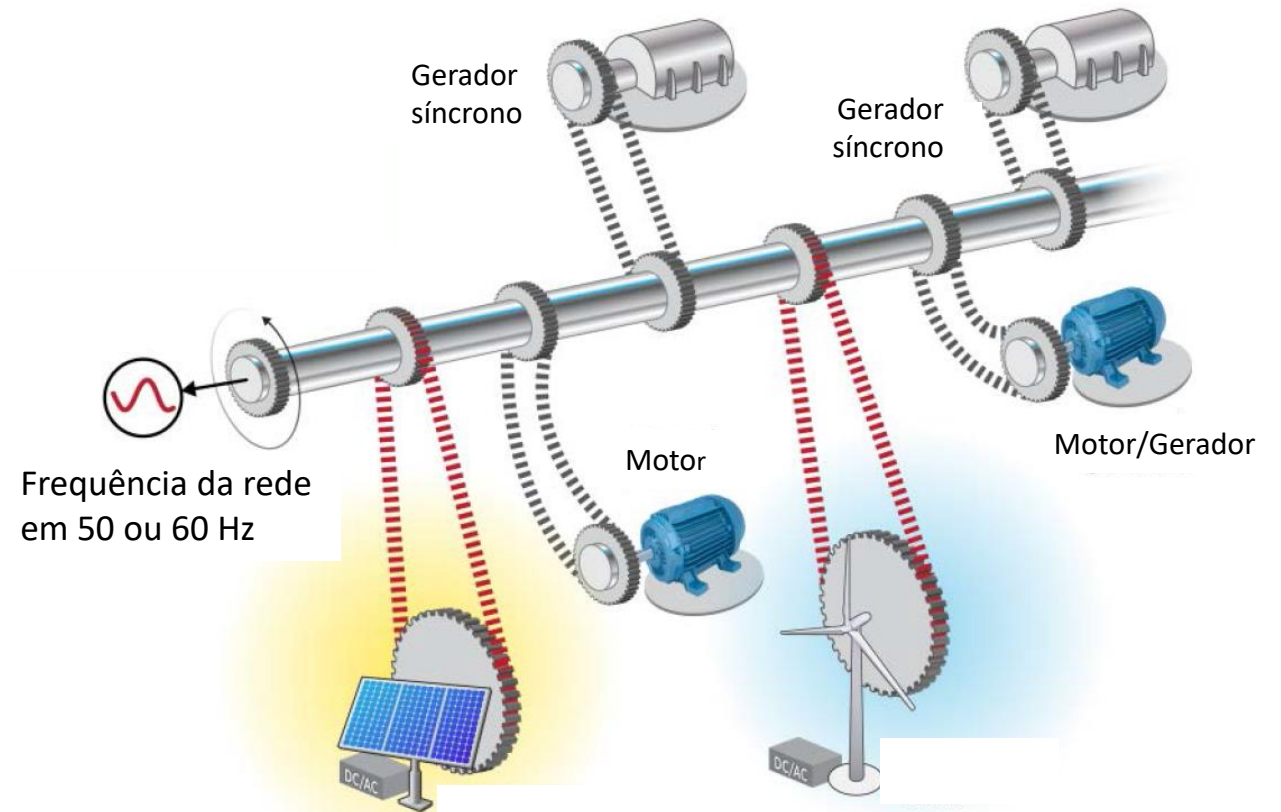
Duas grandezas podem ser verificadas para indicar a estabilidade de um sistema:

- Frequência: Indicativo do balanço de potência ativa gerada e consumida
- Tensão ao longo da rede: Indicativo do balanço de potência reativa gerada e consumida

Atuação das Reservas de Contingência

- Conceito de Inércia de uma Unidade Geradora:

$$H = \frac{E_C}{S_n} = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{0m}^2}{S_n}$$



Fonte: Integrating High Levels of Renewable Energy into Electric Power Systems – NREL/2017

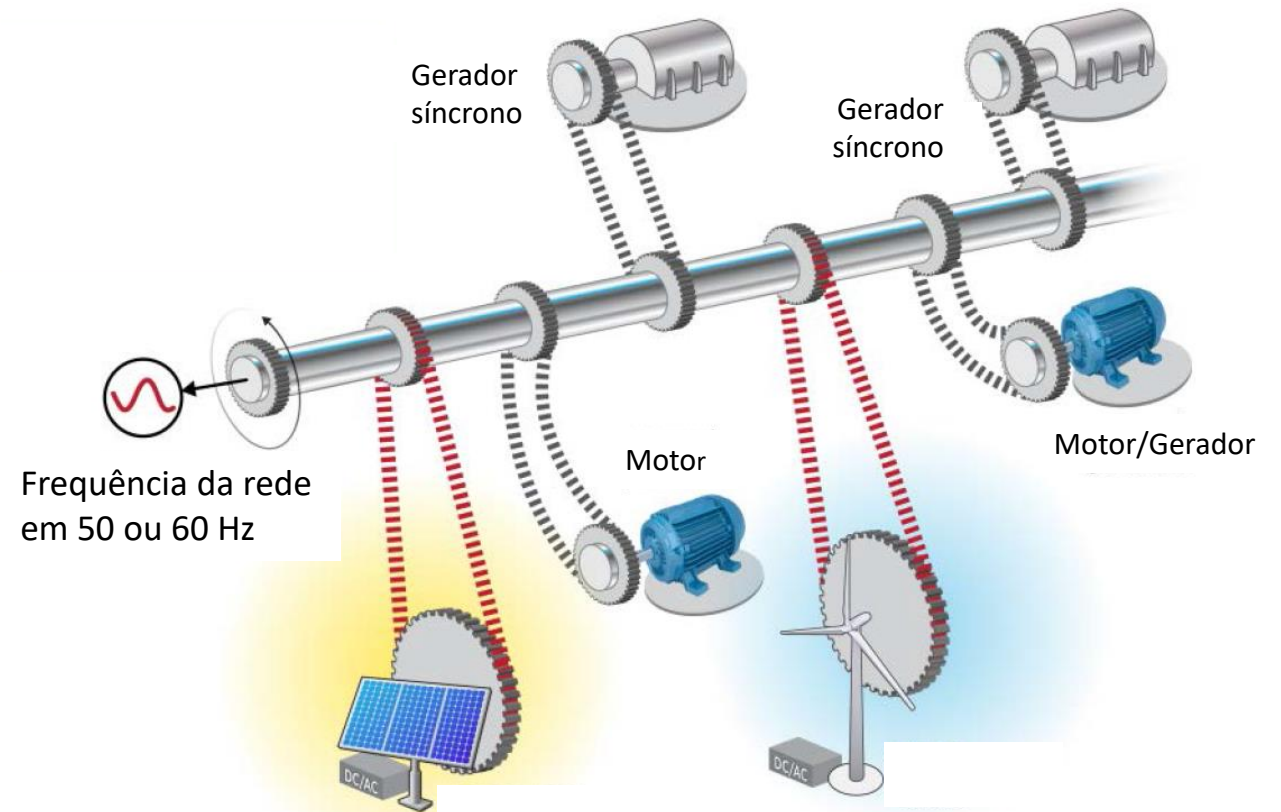
Atuação das Reservas de Contingência

- Dada a Segunda Lei de Newton na forma rotacional:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

- É possível derivar a Equação de *Swing*:

$$\overline{P}_m - \overline{P}_e = 2H \frac{d\bar{\omega}}{dt}$$



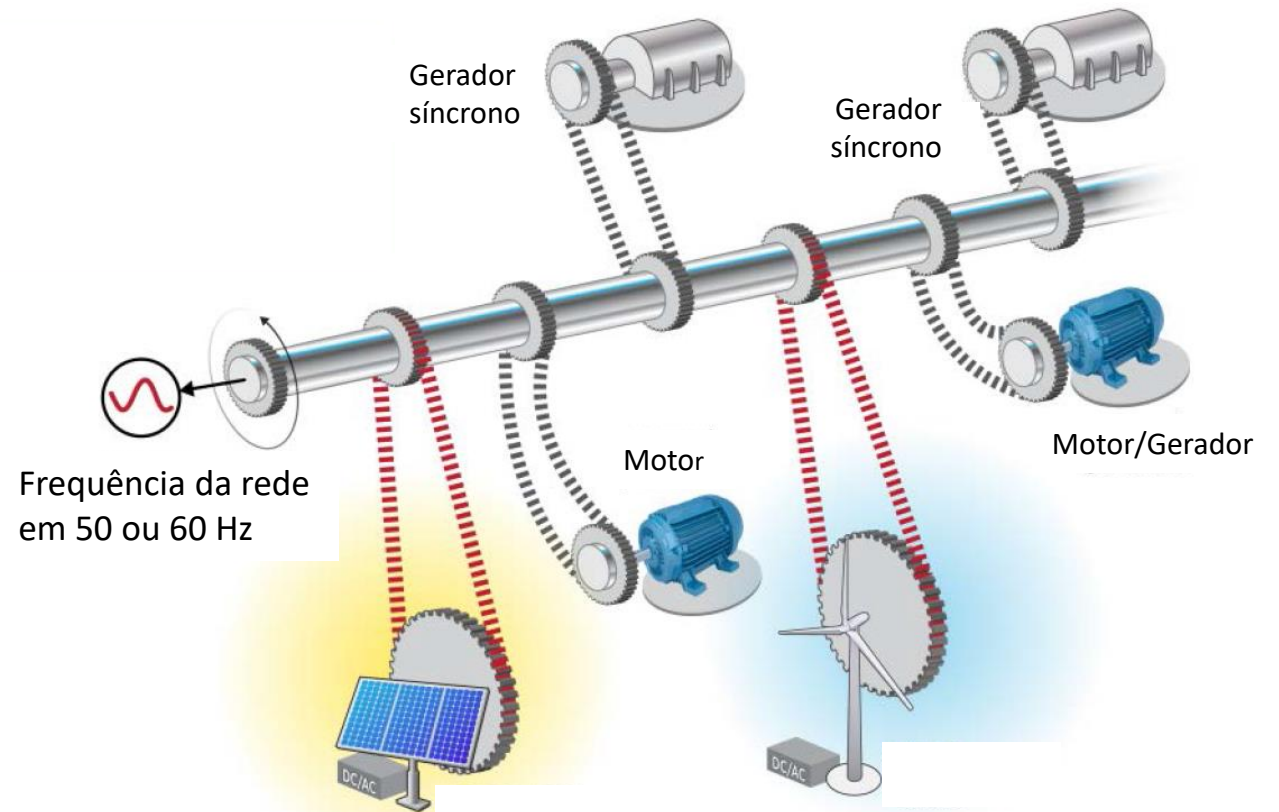
Fonte: Integrating High Levels of Renewable Energy into Electric Power Systems – NREL/2017

Atuação das Reservas de Contingência

- É possível derivar a Equação de *Swing*:

$$\overline{P}_m - \overline{P}_e = 2H \frac{d\overline{\omega}}{dt}$$

- $\overline{P}_m > \overline{P}_e$: Aceleração ou aumento da frequência do sistema
- $\overline{P}_m < \overline{P}_e$: Desaceleração ou redução da frequência do sistema
- $\overline{P}_m = \overline{P}_e$: Sistema em equilíbrio



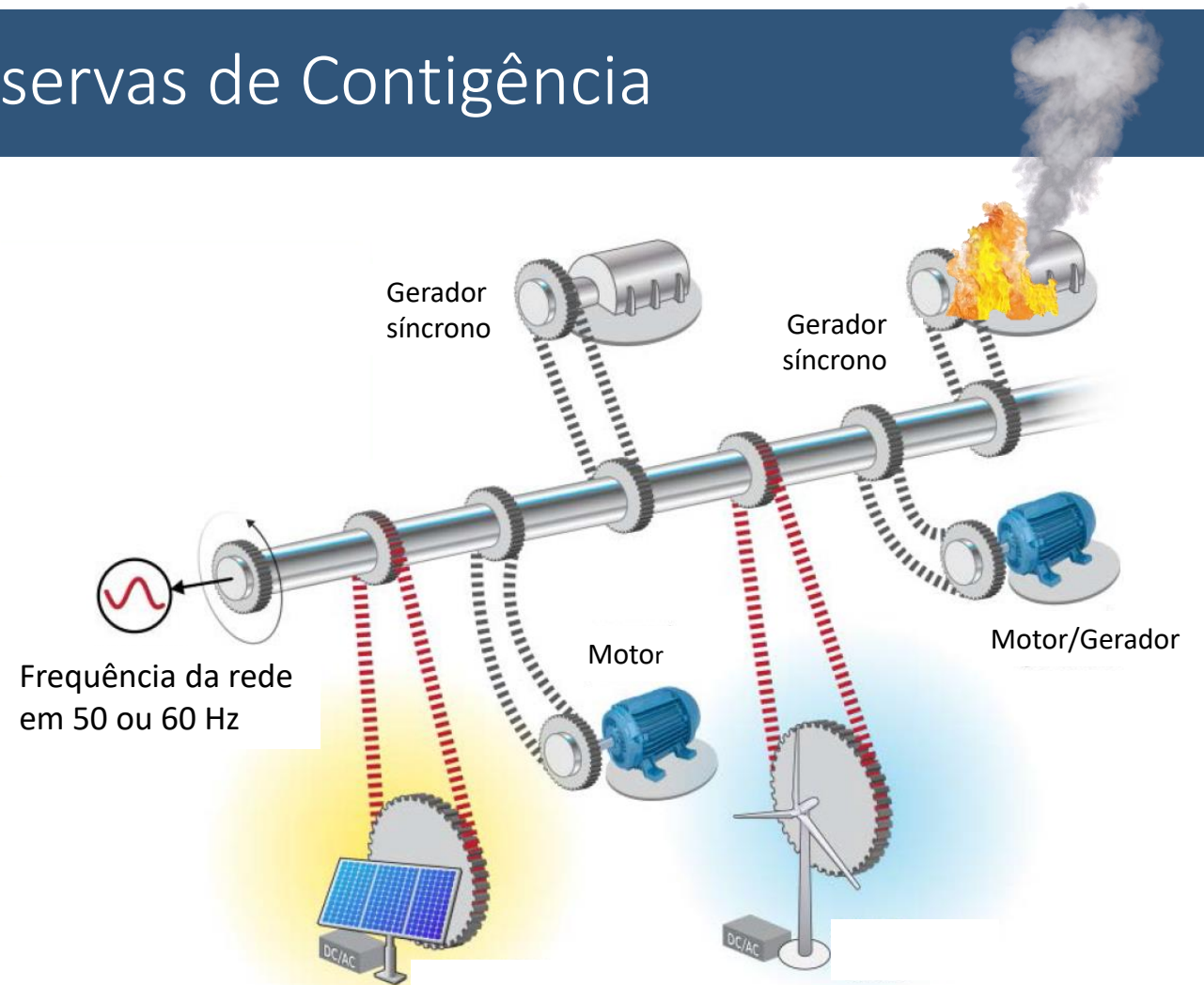
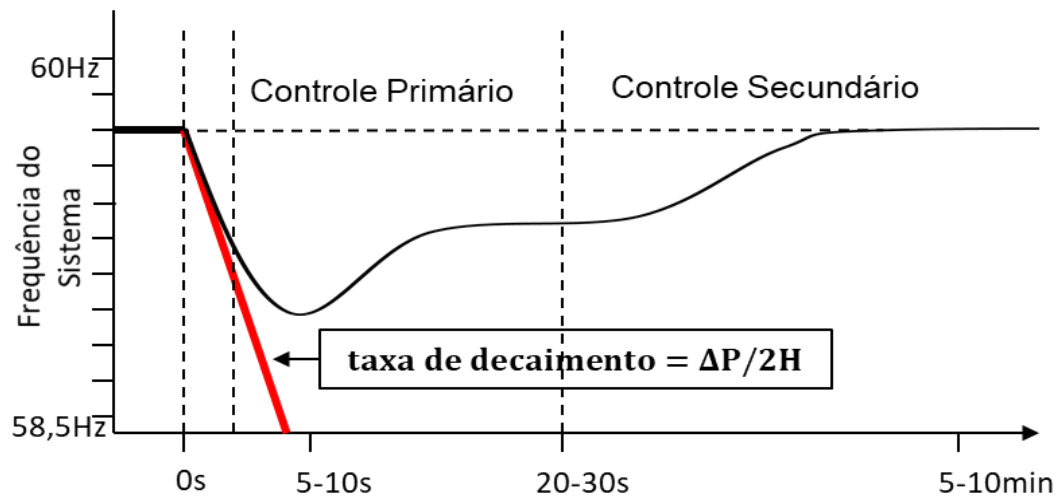
Fonte: Integrating High Levels of Renewable Energy into Electric Power Systems – NREL/2017

Atuação das Reservas de Contingência

- É possível derivar a Equação de *Swing*:

$$\overline{P}_m - \overline{P}_e = 2H \frac{d\bar{\omega}}{dt}$$

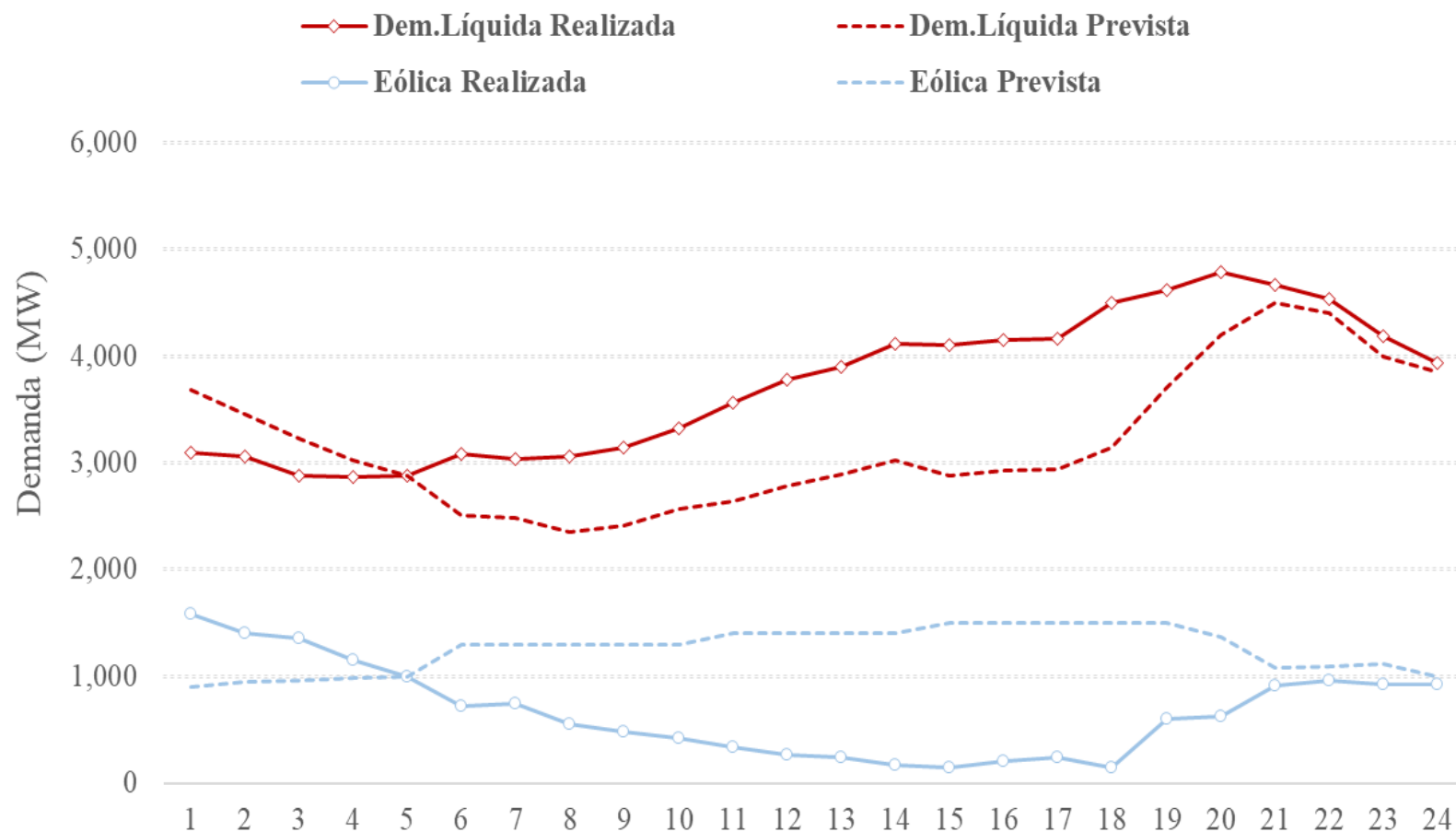
- $\overline{P}_m < \overline{P}_e$: Desaceleração ou redução da frequência do sistema



Fonte: Integrating High Levels of Renewable Energy into Electric Power Systems – NREL/2017

Reserva de Rampa

- Variabilidade da geração intermitente não é tão rápida a ponto de ser considerada como Contigência
- Reserva utilizada para compensar erros na previsão da geração intermitente





Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Modelo de Otimização do Planejamento da Expansão da Geração

Formulação Geral do Problema de Expansão da Geração

- Problema de otimização que visa minimizar os custos associados à expansão
- Sujeito a um conjunto de restrições que modelam o sistema

$$\min_{x,g,q,v} \sum_{t \in \mathbb{T}} \left[\sum_{j \in T} (I_j x_{j,t} + c_j g_{j,t}) + \sum_{i \in H} I_{i,t} x_{i,t} + \sum_{l \in R} I_{l,t} x_{l,t} \right]$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{j \in T} g_{j,t} + \sum_{i \in H} \rho_i q_{i,t} + \sum_{l \in R} g_{l,t} + r_t &= d_t \\ v_{i,t+1} &= v_{i,t} + a_{i,t} - q_{i,t} - w_{i,t} + \sum_{j \in M(i)} (q_{j,t} + w_{j,t}) \\ v_{i,t} &\leq \bar{v}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau} \\ q_{i,t} &\leq \bar{q}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau} \\ g_{j,t} &\leq \bar{g}_j \sum_{\tau=1}^t x_{j,\tau} \\ g_{l,t} &\leq \bar{g}_l \sum_{\tau=1}^t x_{l,\tau} \\ \sum_{t \in \mathbb{T}} x_{i,t} &\leq 1 \\ \sum_{t \in \mathbb{T}} x_{j,t} &\leq 1 \\ \sum_{t \in \mathbb{T}} x_{l,t} &\leq 1 \end{aligned}$$

Formulação Geral do Problema de Expansão da Geração

- Restrição que garante o balanço entre geração e demanda ao longo do horizonte de estudo

$$\min_{x,g,q,v} \sum_{t \in \mathbb{T}} \left[\sum_{j \in T} (I_j x_{j,t} + c_j g_{j,t}) + \sum_{i \in H} I_{i,t} x_{i,t} + \sum_{l \in R} I_{l,t} x_{l,t} \right]$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in T} g_{j,t} + \sum_{i \in H} \rho_i q_{i,t} + \sum_{l \in R} g_{l,t} + r_t = d_t$$

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + a_{i,t} - q_{i,t} - w_{i,t} + \sum_{j \in M(i)} (q_{j,t} + w_{j,t})$$

$$v_{i,t} \leq \bar{v}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau}$$

$$q_{i,t} \leq \bar{q}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau}$$

$$g_{j,t} \leq \bar{g}_j \sum_{\tau=1}^t x_{j,\tau}$$

$$g_{l,t} \leq \bar{g}_l \sum_{\tau=1}^t x_{l,\tau}$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{i,t} \leq 1$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{j,t} \leq 1$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{l,t} \leq 1$$

Formulação Geral do Problema de Expansão da Geração

- Balanço hídrico dos reservatórios

$$\min_{x,g,q,v} \sum_{t \in \mathbb{T}} \left[\sum_{j \in T} (I_j x_{j,t} + c_j g_{j,t}) + \sum_{i \in H} I_{i,t} x_{i,t} + \sum_{l \in R} I_{l,t} x_{l,t} \right]$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in T} g_{j,t} + \sum_{i \in H} \rho_i q_{i,t} + \sum_{l \in R} g_{l,t} + r_t = d_t$$

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + a_{i,t} - q_{i,t} - w_{i,t} + \sum_{j \in M(i)} (q_{j,t} + w_{j,t})$$

$$v_{i,t} \leq \bar{v}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau}$$

$$q_{i,t} \leq \bar{q}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau}$$

$$g_{j,t} \leq \bar{g}_j \sum_{\tau=1}^t x_{j,\tau}$$

$$g_{l,t} \leq \bar{g}_l \sum_{\tau=1}^t x_{l,\tau}$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{i,t} \leq 1$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{j,t} \leq 1$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{l,t} \leq 1$$

Formulação Geral do Problema de Expansão da Geração

- Restrições de acoplamento entre investimento e operação

$$\min_{x,g,q,v} \sum_{t \in \mathbb{T}} \left[\sum_{j \in T} (I_j x_{j,t} + c_j g_{j,t}) + \sum_{i \in H} I_{i,t} x_{i,t} + \sum_{l \in R} I_{l,t} x_{l,t} \right]$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in T} g_{j,t} + \sum_{i \in H} \rho_i q_{i,t} + \sum_{l \in R} g_{l,t} + r_t = d_t$$

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + a_{i,t} - q_{i,t} - w_{i,t} + \sum_{j \in M(i)} (q_{j,t} + w_{j,t})$$

$$v_{i,t} \leq \bar{v}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau}$$

$$q_{i,t} \leq \bar{q}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau}$$

$$g_{j,t} \leq \bar{g}_j \sum_{\tau=1}^t x_{j,\tau}$$

$$g_{l,t} \leq \bar{g}_l \sum_{\tau=1}^t x_{l,\tau}$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{i,t} \leq 1$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{j,t} \leq 1$$

$$\sum_{t \in \mathbb{T}} x_{l,t} \leq 1$$

Formulação Geral do Problema de Expansão da Geração

- Restrições de investimento

$$\min_{x,g,q,v} \sum_{t \in \mathbb{T}} \left[\sum_{j \in T} (I_j x_{j,t} + c_j g_{j,t}) + \sum_{i \in H} I_{i,t} x_{i,t} + \sum_{l \in R} I_{l,t} x_{l,t} \right]$$

Sujeito a:

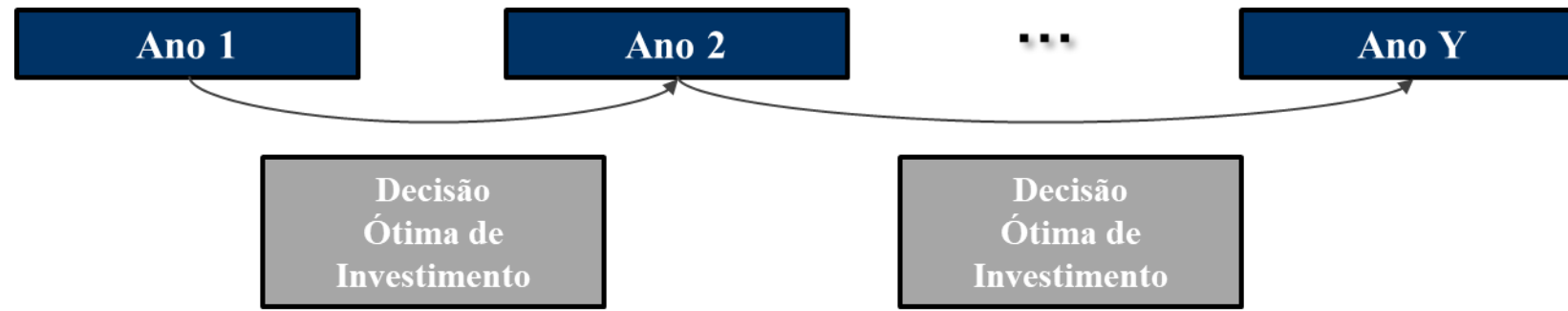
$$\begin{aligned} \sum_{j \in T} g_{j,t} + \sum_{i \in H} \rho_i q_{i,t} + \sum_{l \in R} g_{l,t} + r_t &= d_t \\ v_{i,t+1} &= v_{i,t} + a_{i,t} - q_{i,t} - w_{i,t} + \sum_{j \in M(i)} (q_{j,t} + w_{j,t}) \\ v_{i,t} &\leq \bar{v}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau} \\ q_{i,t} &\leq \bar{q}_i \sum_{\tau=1}^t x_{i,\tau} \\ g_{j,t} &\leq \bar{g}_j \sum_{\tau=1}^t x_{j,\tau} \\ g_{l,t} &\leq \bar{g}_l \sum_{\tau=1}^t x_{l,\tau} \\ \sum_{t \in \mathbb{T}} x_{i,t} &\leq 1 \\ \sum_{t \in \mathbb{T}} x_{j,t} &\leq 1 \\ \sum_{t \in \mathbb{T}} x_{l,t} &\leq 1 \end{aligned}$$

Problema com Grande Número de Restrições

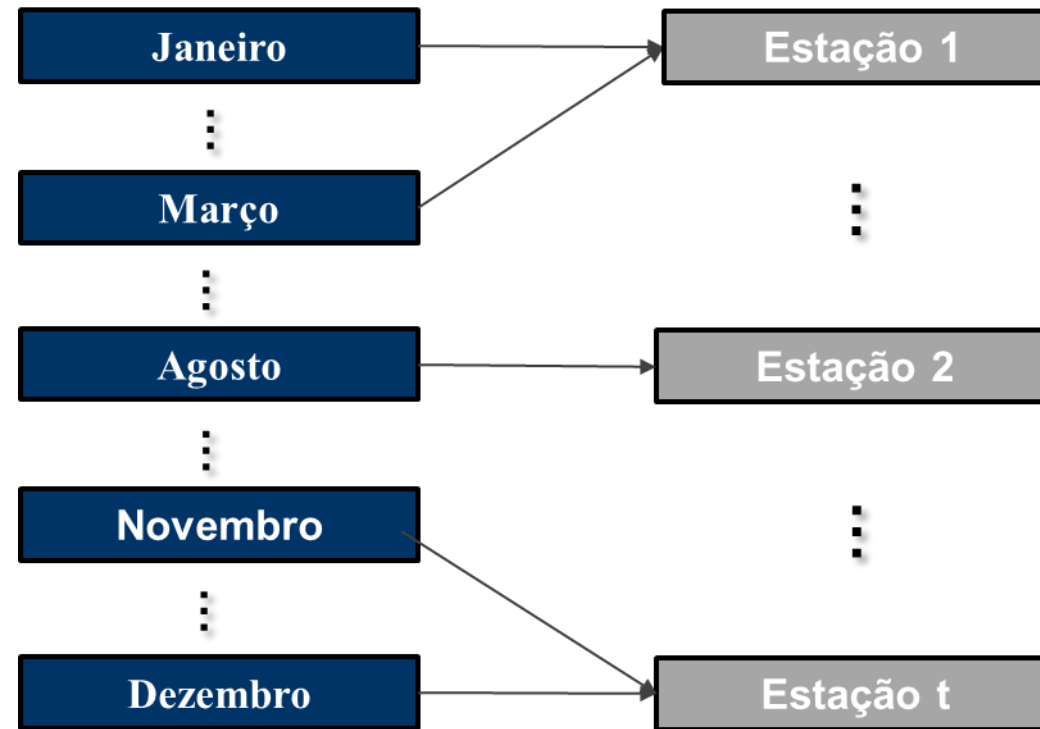
- Supõe-se um sistema genérico, em que não há rede de transmissão
- Além disso, há apenas um cenário de hidrologia, disponibilidade de recursos renováveis e demanda
- Restrições devem ser atendidas com discretização horária
- Problema resolvido para um ano apenas

Tipo da Usina	Usinas Existentes	Usinas Candidatas	Total de Agentes	Restrições operativas associadas
Hidrelétrica	5	5	10	350.400
Térmica	25	25	50	876.000
Renovável	15	15	30	525.600
			Total de restrições	1.752.000

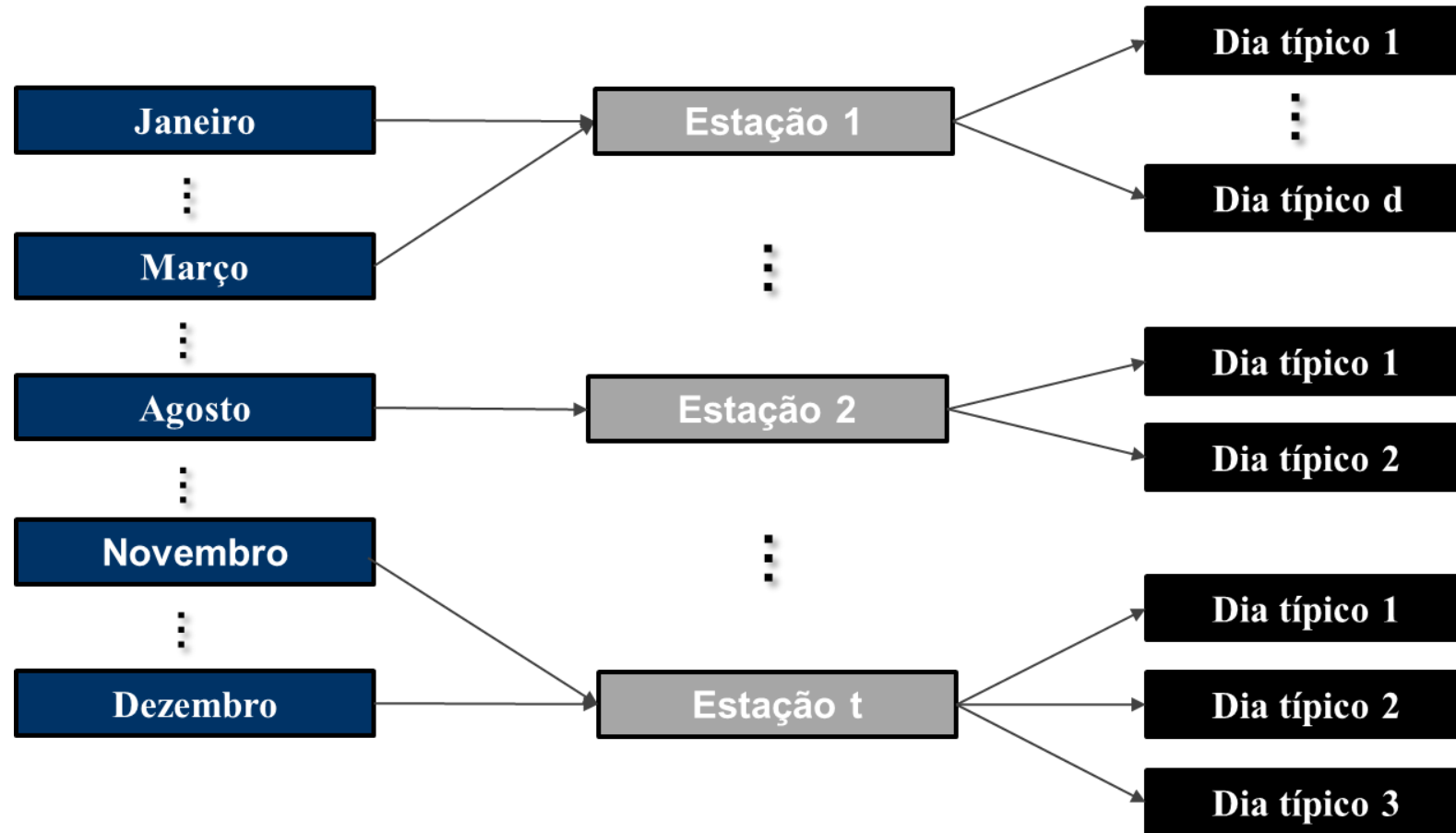
Estratégia de Solução – Etapas Anuais de Investimento

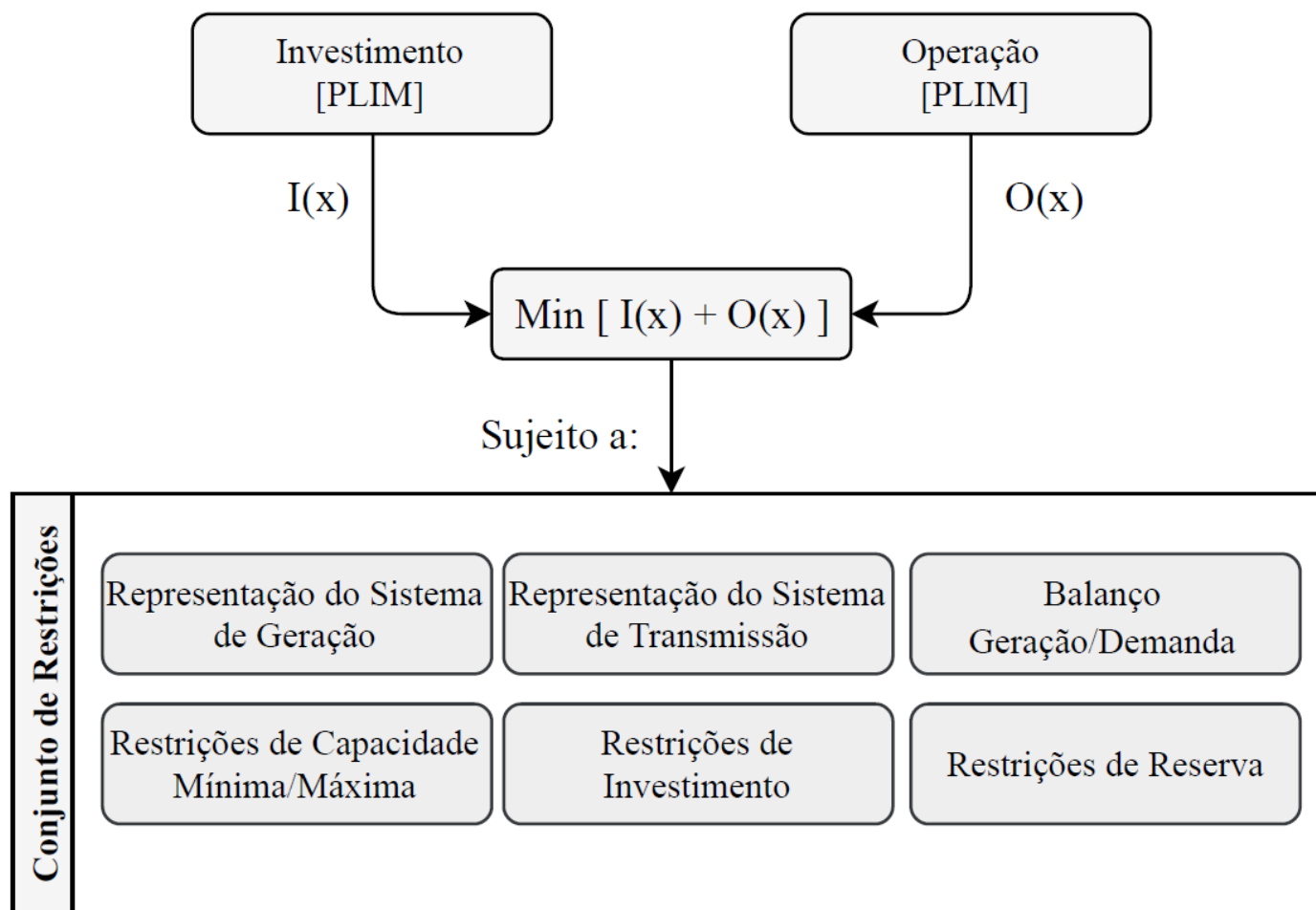


Estratégia de Solução – Agrupamento dos Meses em Estações



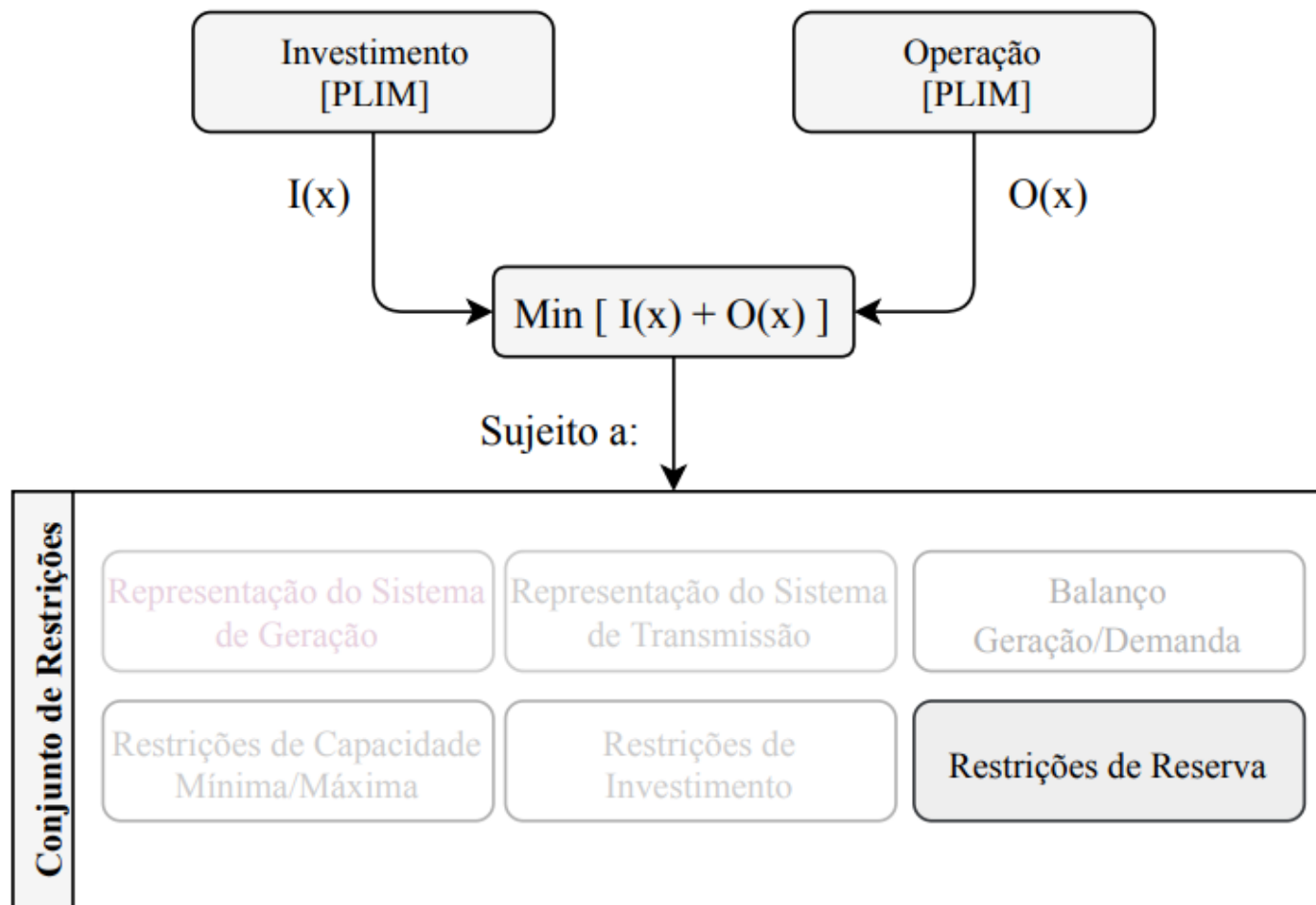
Estratégia de Solução – Estimação de Dias Típicos





Modelagem da Expansão com Granularidade horária

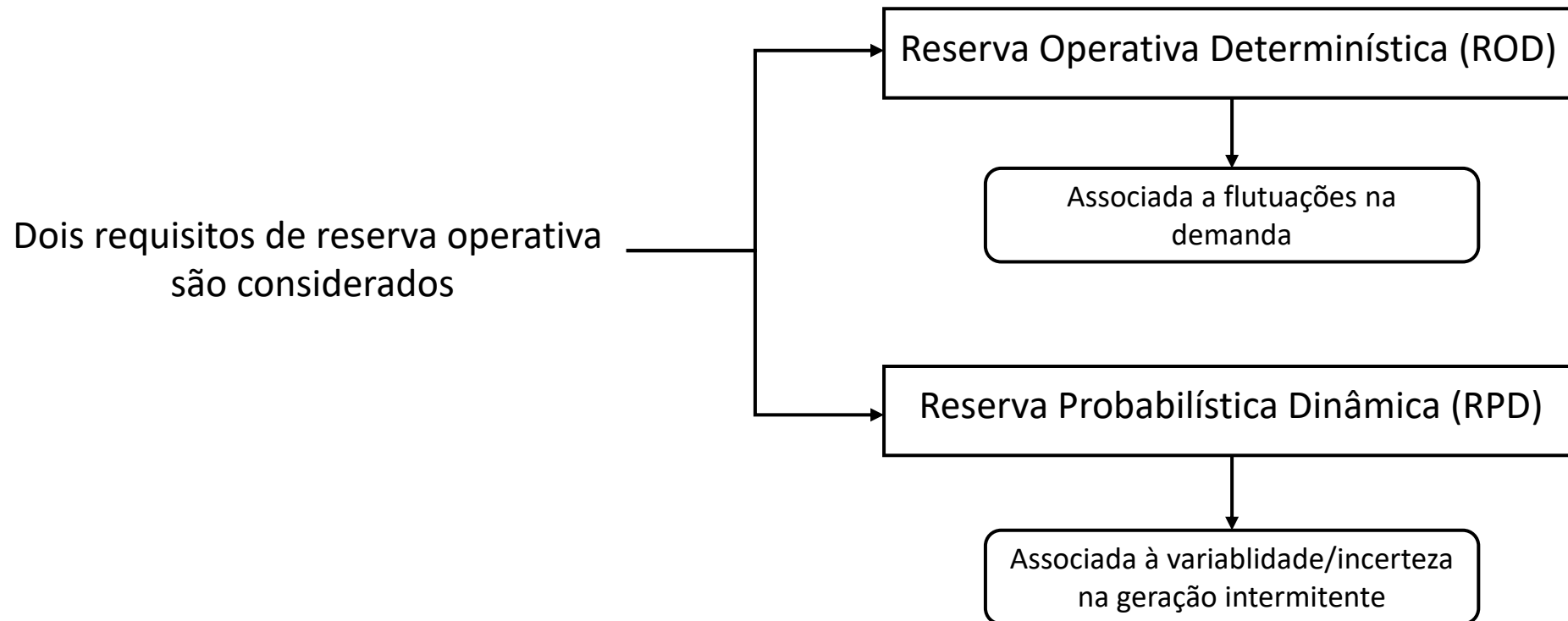
- Resolução de um problema de programação linear inteira mista (PLIM)
- Possibilidade de representação da dinâmica de operação, via problema de *unit commitment*
- Co-otimização da expansão e requisitos de reserva operativa



Modelagem da Expansão com Granularidade horária

- Resolução de um problema de programação linear inteira mista (PLIM)
- Possibilidade de representação da dinâmica de operação, via problema de *unit commitment*
- Co-otimização da expansão e requisitos de reserva operativa

Restrições de Reserva Operativa



Reserva Probabilística Dinâmica

- A introdução deste requisito tem por objetivo encontrar um plano de expansão capaz compensar a variabilidade e incerteza inerentes às fontes intermitentes
- Cálculo realizado em quatro etapas

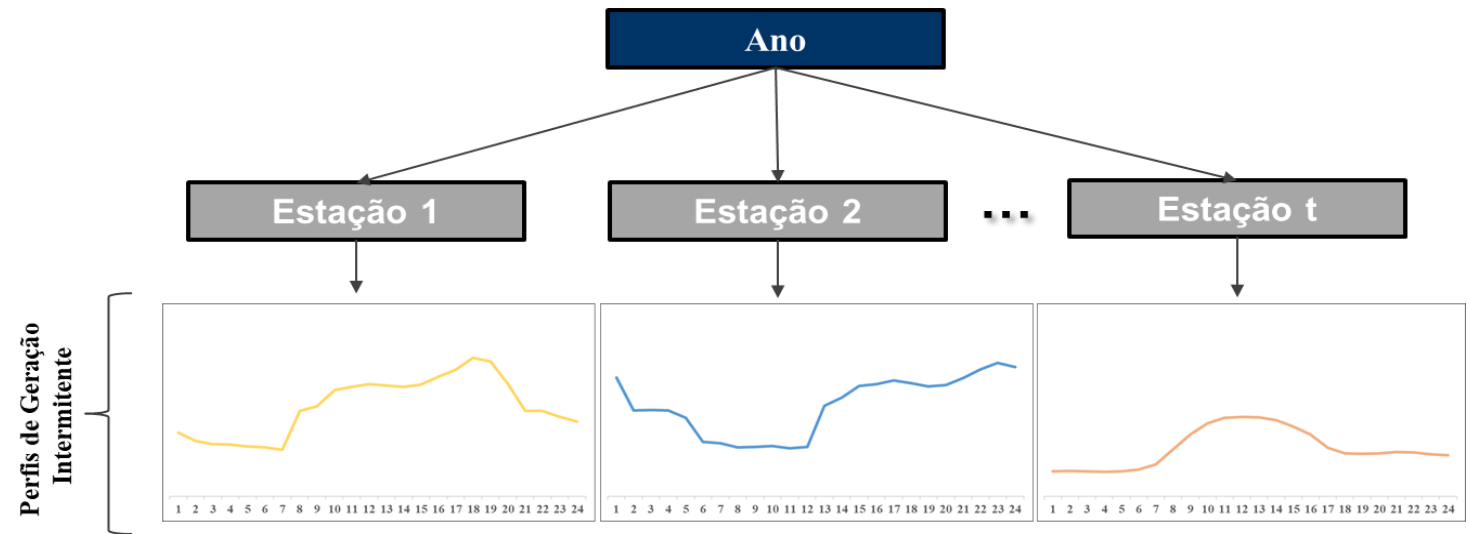
$$\text{Etapa 1: } \hat{v}_{l,t,h_d} = \frac{1}{|T_t||H_{h_d}||S|} \sum_{m \in T_t} \sum_{h \in H_{h_d}} \sum_{s \in S} g_{l,m,h}^s$$

$$\text{Etapa 2: } \delta_{a,t,d,h}^s = \sum_{l \in A_l^a} (g_{l,t,d,h}^s - \hat{v}_{l,t,h}) x_{l,\tau}$$

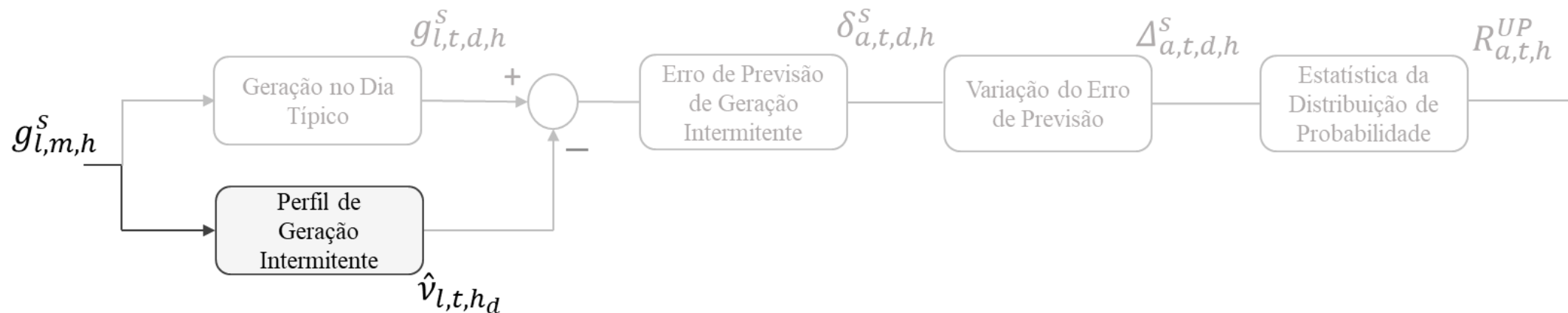
$$\text{Etapa 3: } \Delta_{a,t,d,h}^s \geq \delta_{a,t,d,h}^s - \delta_{a,t,d,h-1}^s$$

$$\text{Etapa 4: } R_{a,t,h}^{UP} \geq \Delta_{a,t,d,h}^s$$

Reserva Probabilística Dinâmica

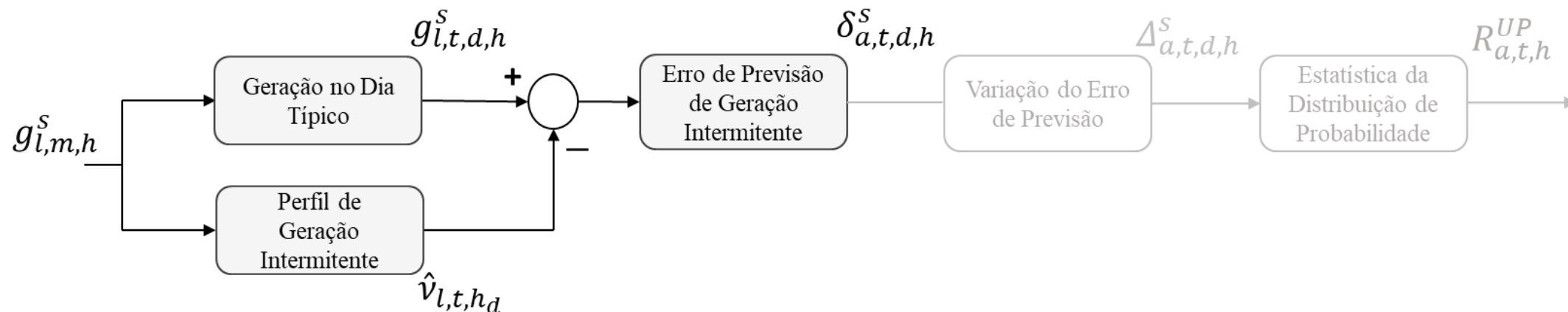
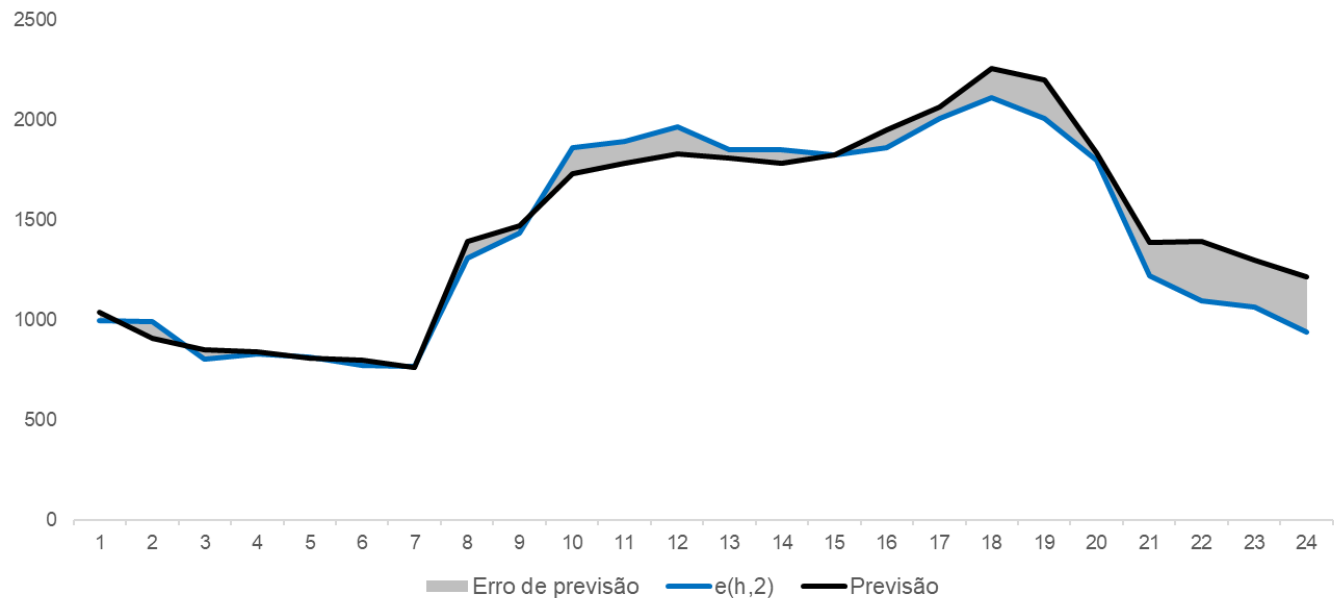


Etapa 1: $\hat{v}_{l,t,h_d} = \frac{1}{|T_t||H_{h_d}||S|} \sum_{m \in T_t} \sum_{h \in H_{h_d}} \sum_{s \in S} g_{l,m,h}^s$



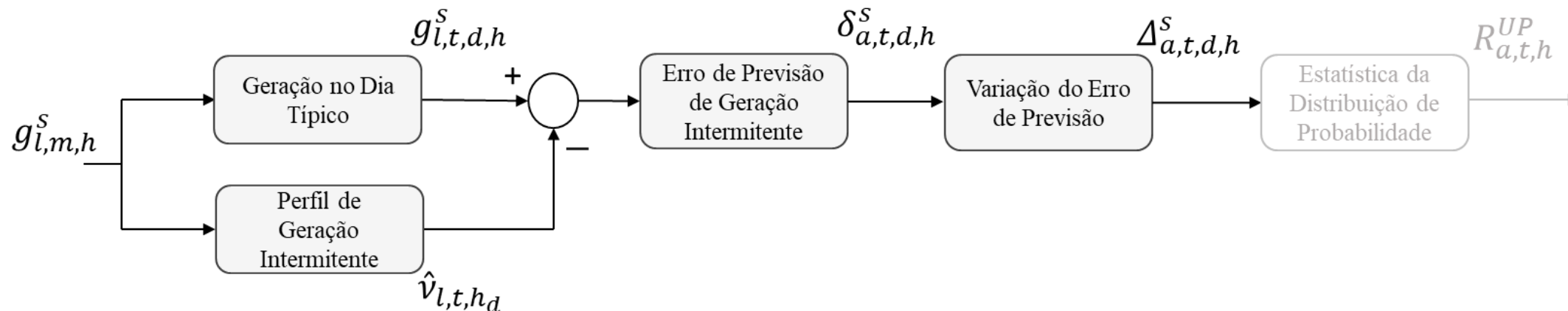
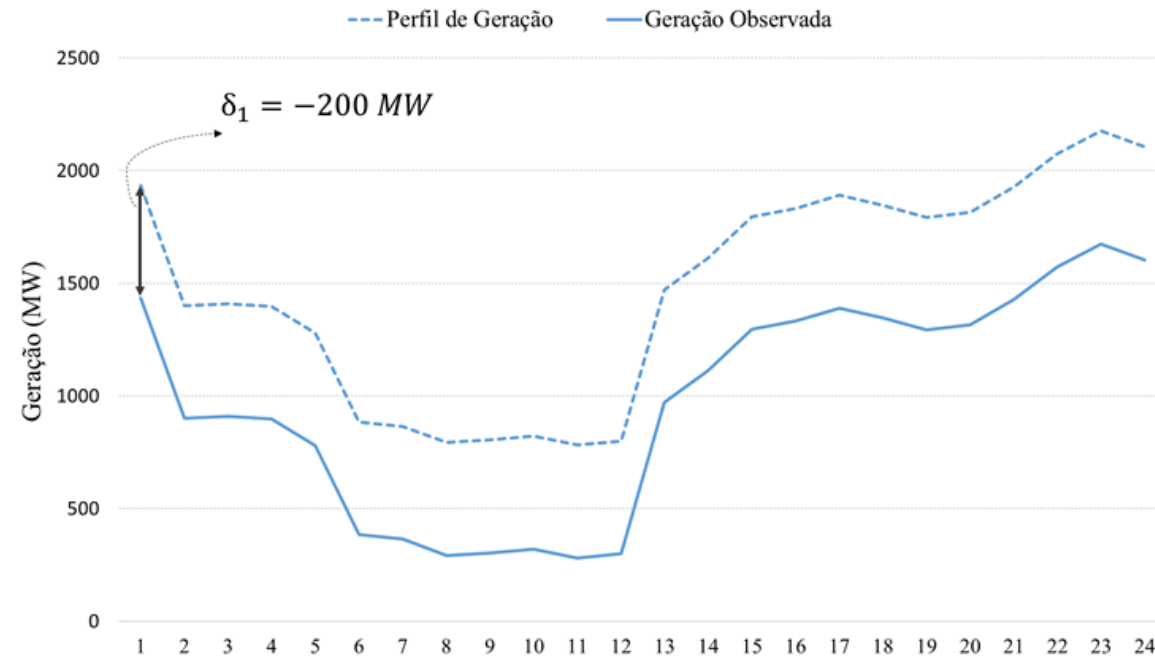
Reserva Probabilística Dinâmica

Etapa 2: $\delta_{a,t,d,h}^s = \sum_{l \in A_l^a} (g_{l,t,d,h}^s - \hat{v}_{l,t,h}) x_{l,\tau}$



Reserva Probabilística Dinâmica

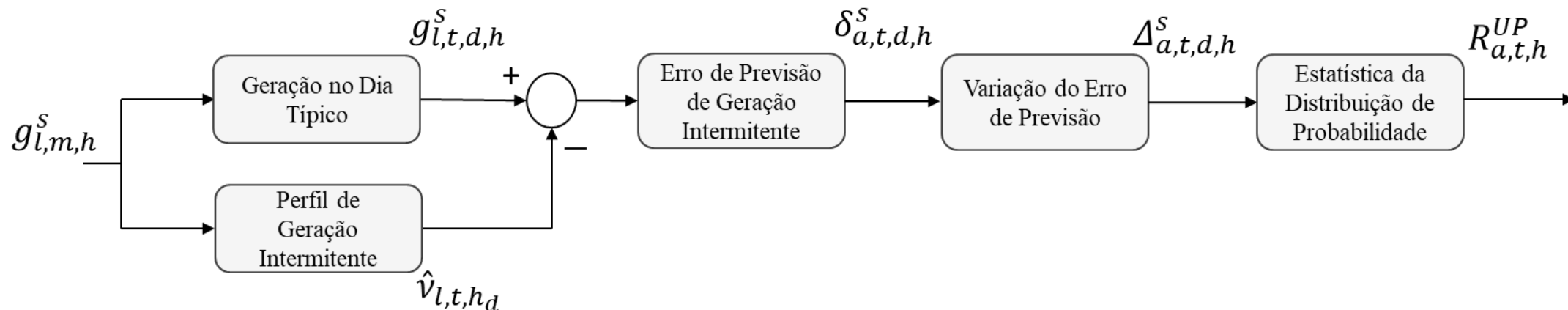
Etapa 3: $\Delta_{a,t,d,h}^s \geq \delta_{a,t,d,h}^s - \delta_{a,t,d,h-1}^s$



Reserva Probabilística Dinâmica

Etapa 4: $R_{a,t,h}^{UP} \geq \Delta_{a,t,d,h}^s$

Hora do Dia	$\Delta(h,1)$	$\Delta(h,2)$	$\Delta(h,3)$	RPD
6	9	44	2	44
7	127	72	44	127
8	82	198	135	198
9	176	192	54	192
10	122	248	86	248
11	29	53	95	95
12	19	42	7	42
13	40	78	36	78
14	40	24	13	40
15	42	48	41	48

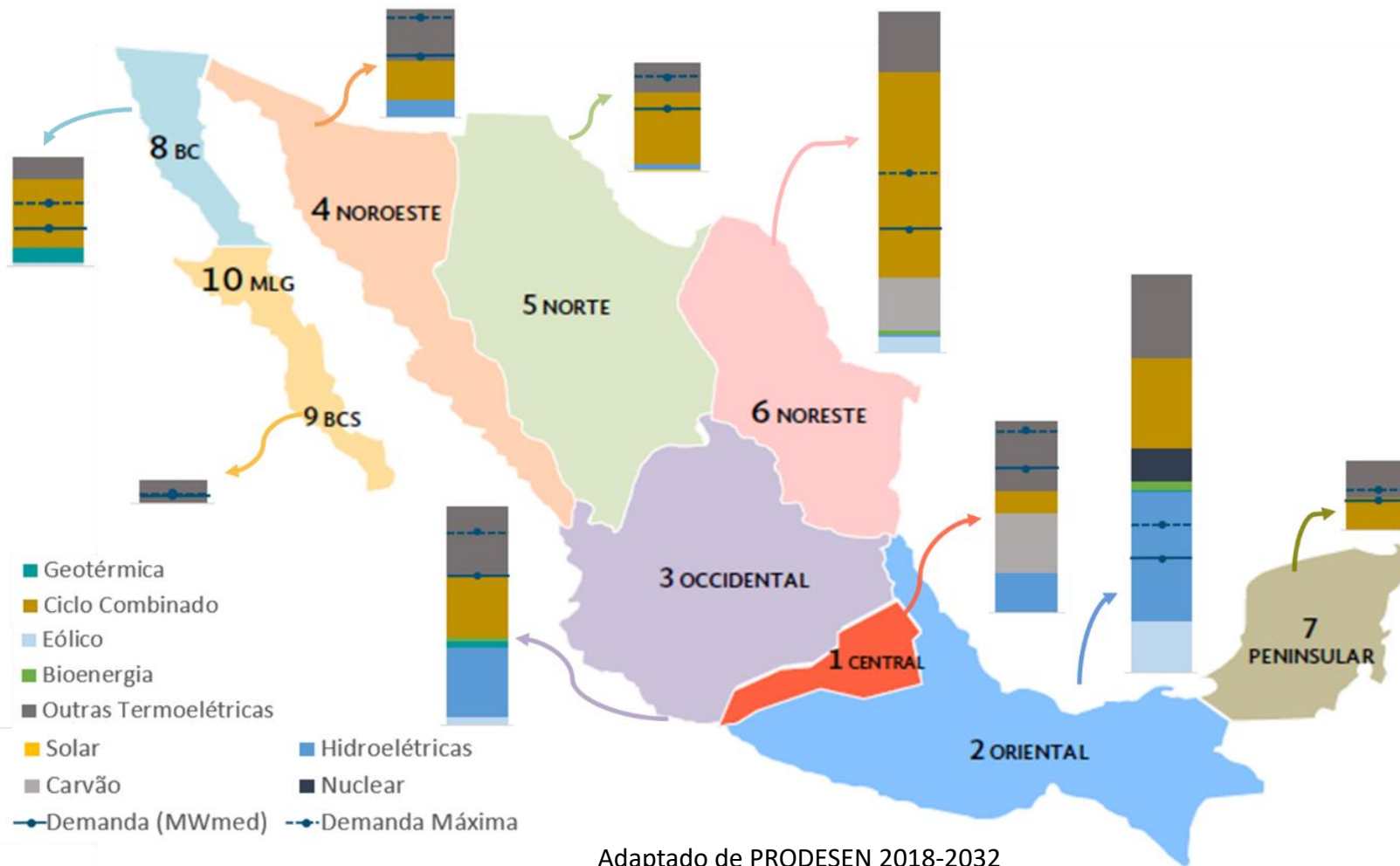




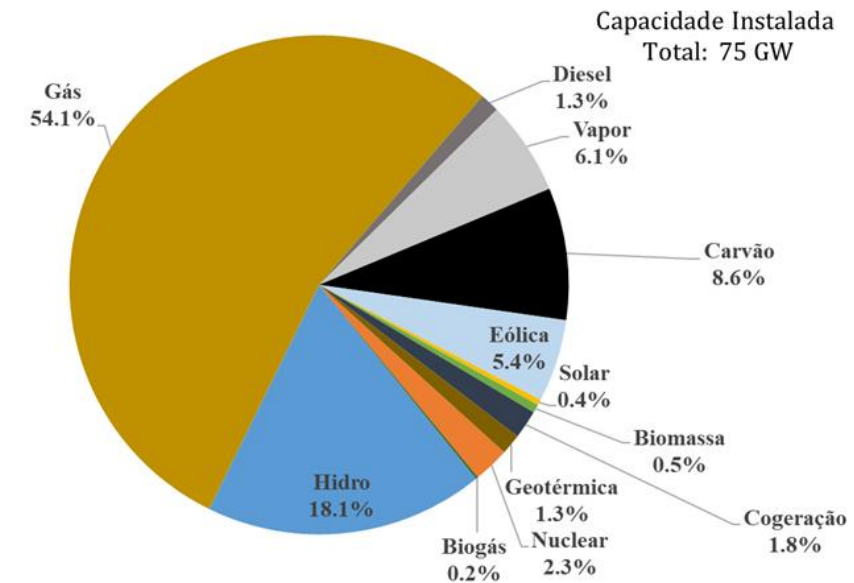
Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Estudo de Caso

Sistema Mexicano – Matriz de Geração em 2018



Adaptado de PRODESEN 2018-2032

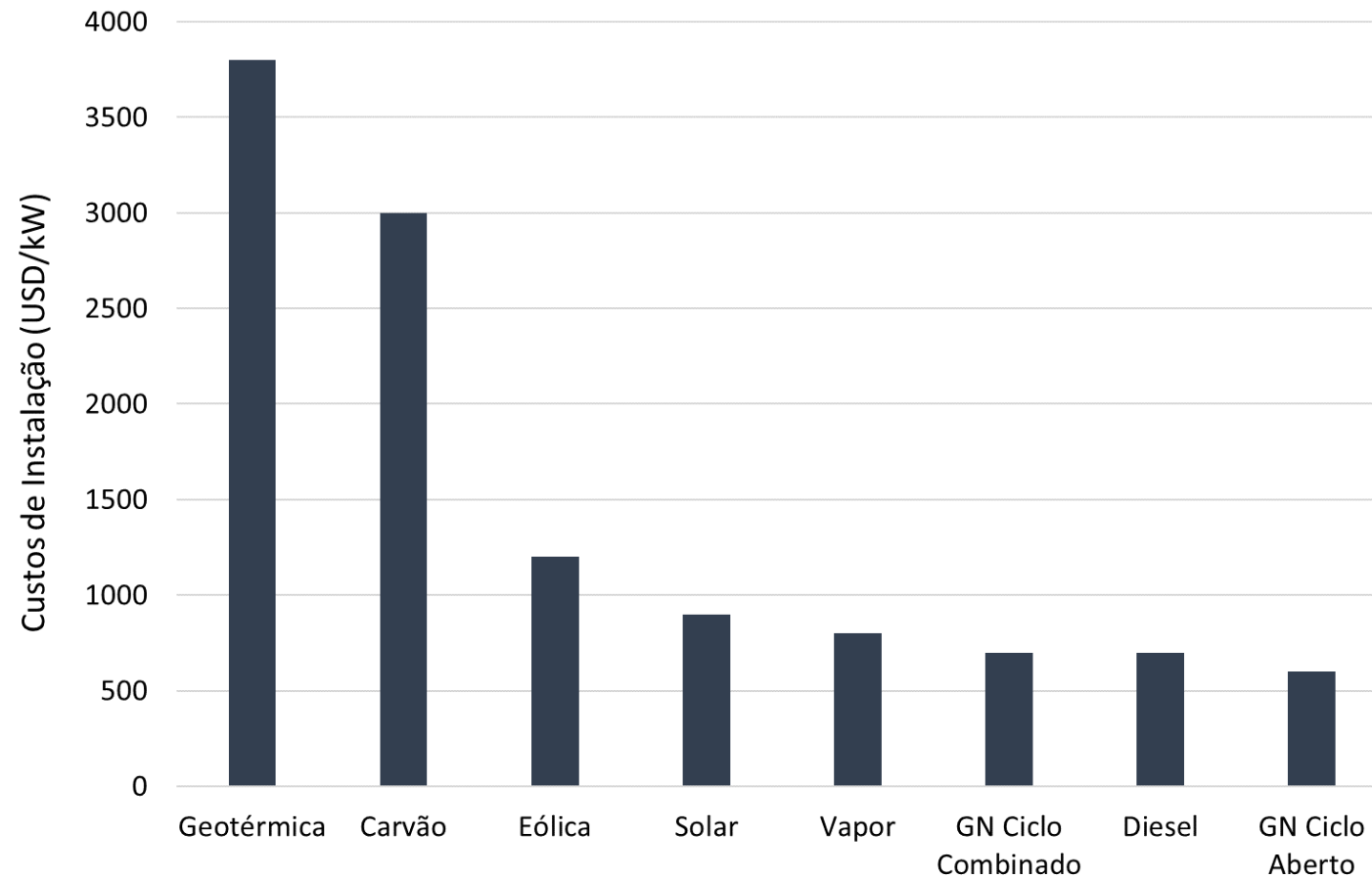


Sistema Mexicano – Divisão em Regiões de Transmissão



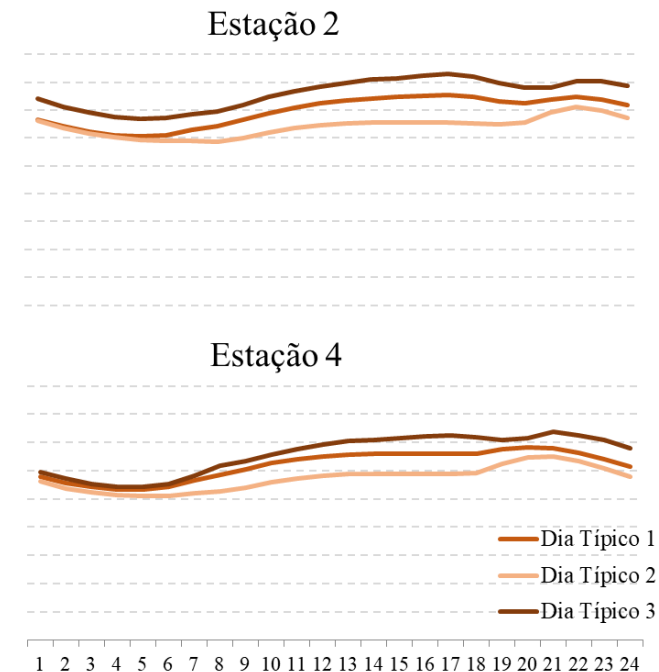
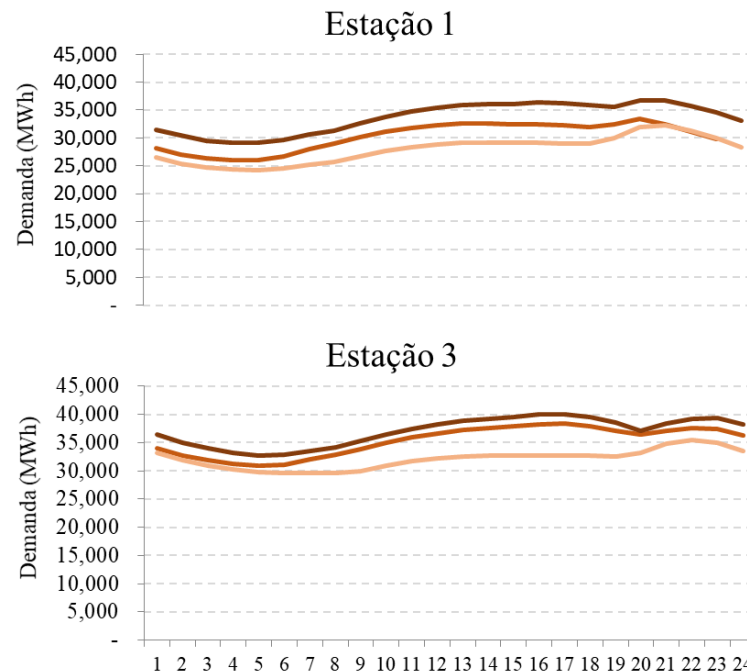
Fonte: PRODESEN 2018-2032

Candidatos a Expansão Considerados no Estudo de Caso



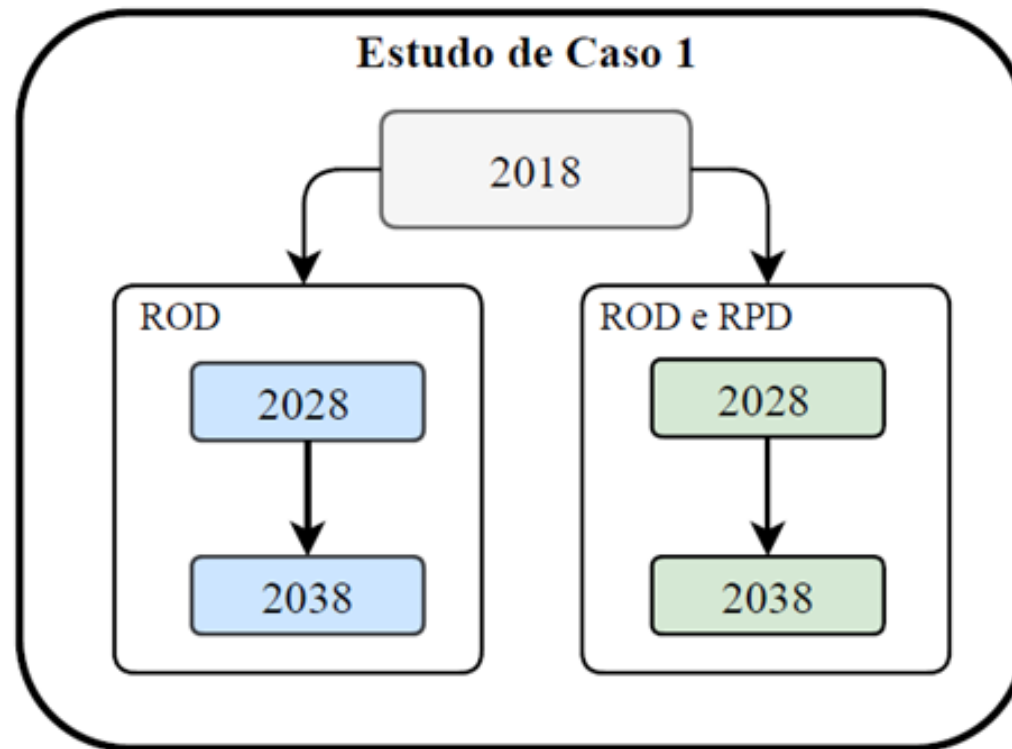
Estimação dos Dias Típicos

- Três dias típicos por temporada
 - Dia típico 1: Média dos cinco dias de maior demanda de cada estação
 - Dia típico 2: Média dos dois dias de menor demanda de cada estação
 - Dia típico 3: Dia que apresenta a demanda máxima dentro de cada estação



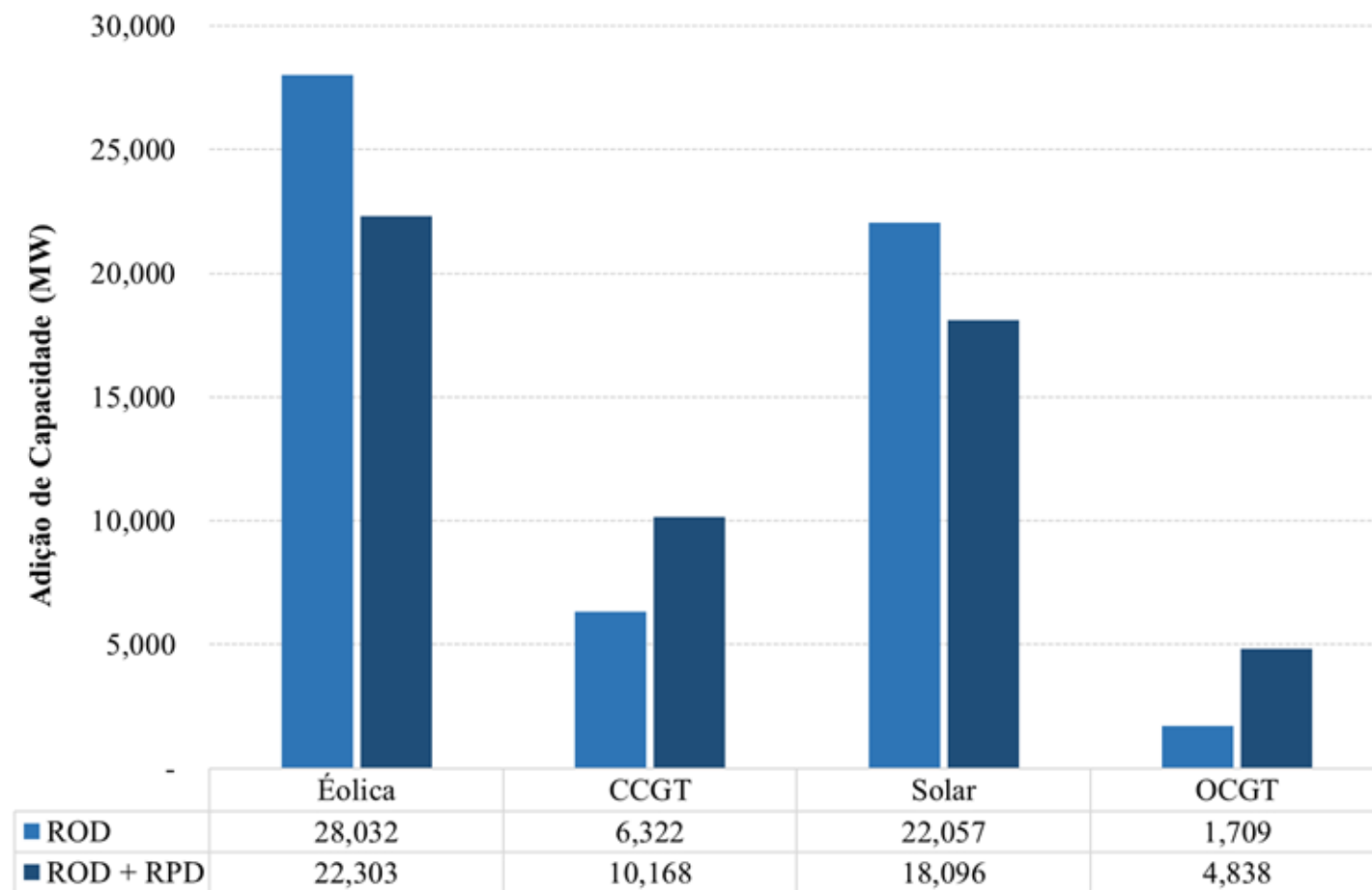
Estudo de Caso 1

- Conjunto de dois casos
- O primeiro considera apenas a reserva para flutuações/erros de previsão de demanda. Essa reserva é definida como 5% da demanda, em cada hora
- O segundo considera tanto o requisito anterior quanto o requisito relativo à variabilidade da geração intermitente



Estudo de Caso 1 Resultados

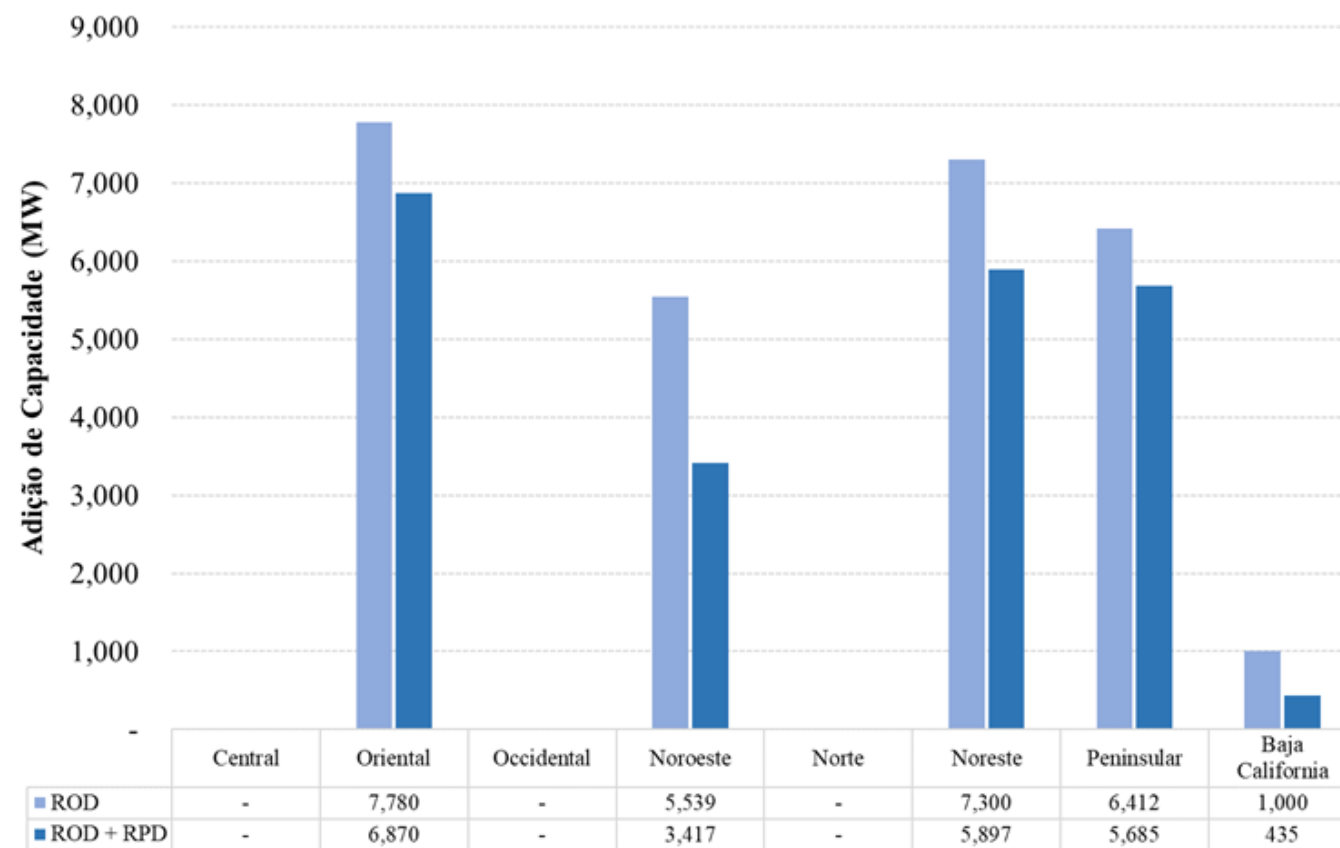
- Observa-se aumento da capacidade despachável no sistema ao introduzir a restrição de RPD
- Redução do investimento em fontes intermitentes
- Indicativo de que os custos para absorver a expansão de fontes intermitentes do caso ROD aumentaria muito quando há RPD



Estudo de Caso 1

Expansão Eólica Regional

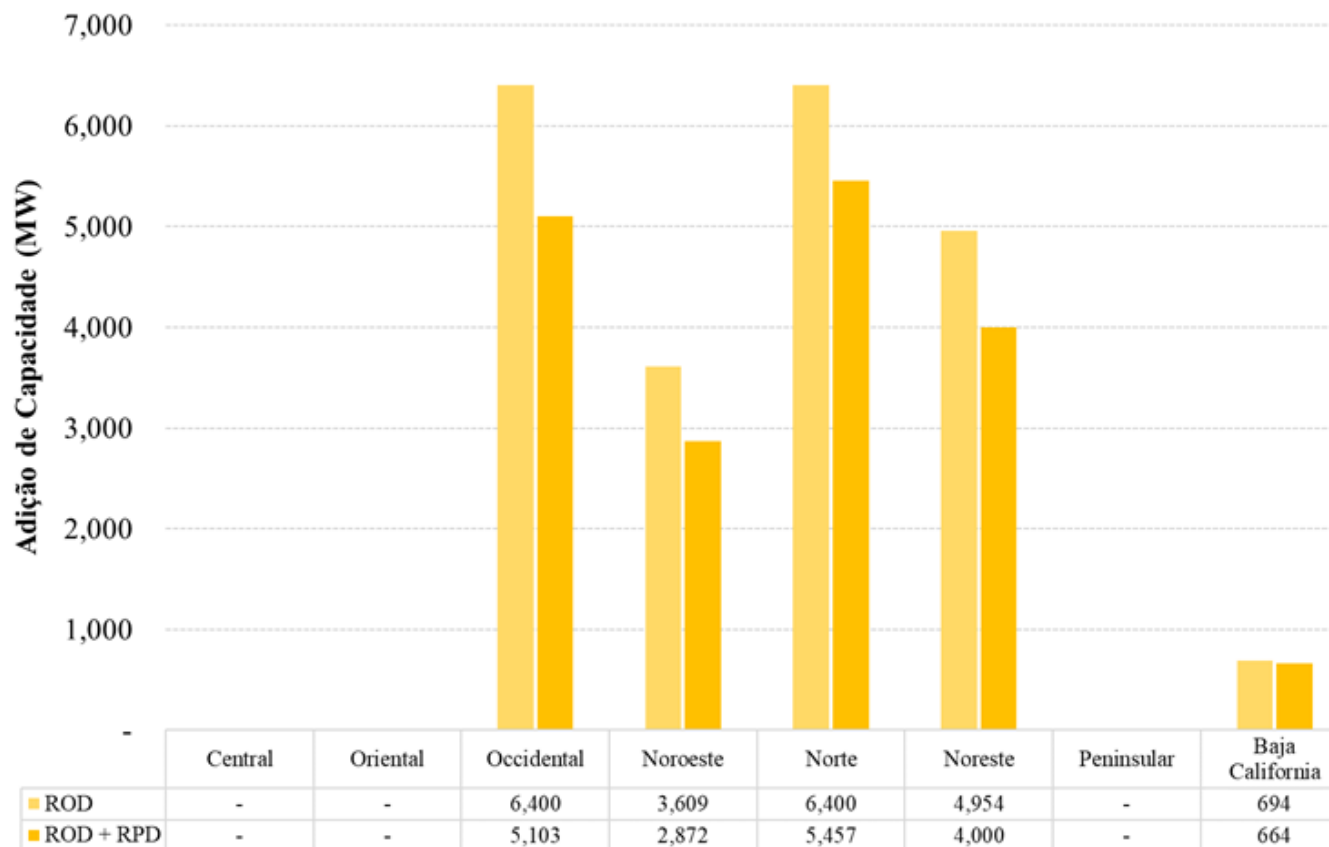
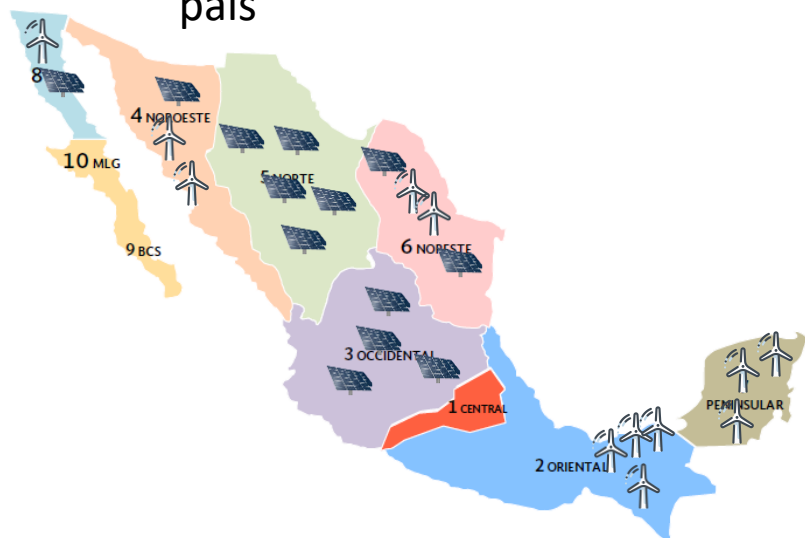
- Expansão eólica ao sul do país



Estudo de Caso 1

Expansão SFV Regional

- Expansão SFV ao norte do país

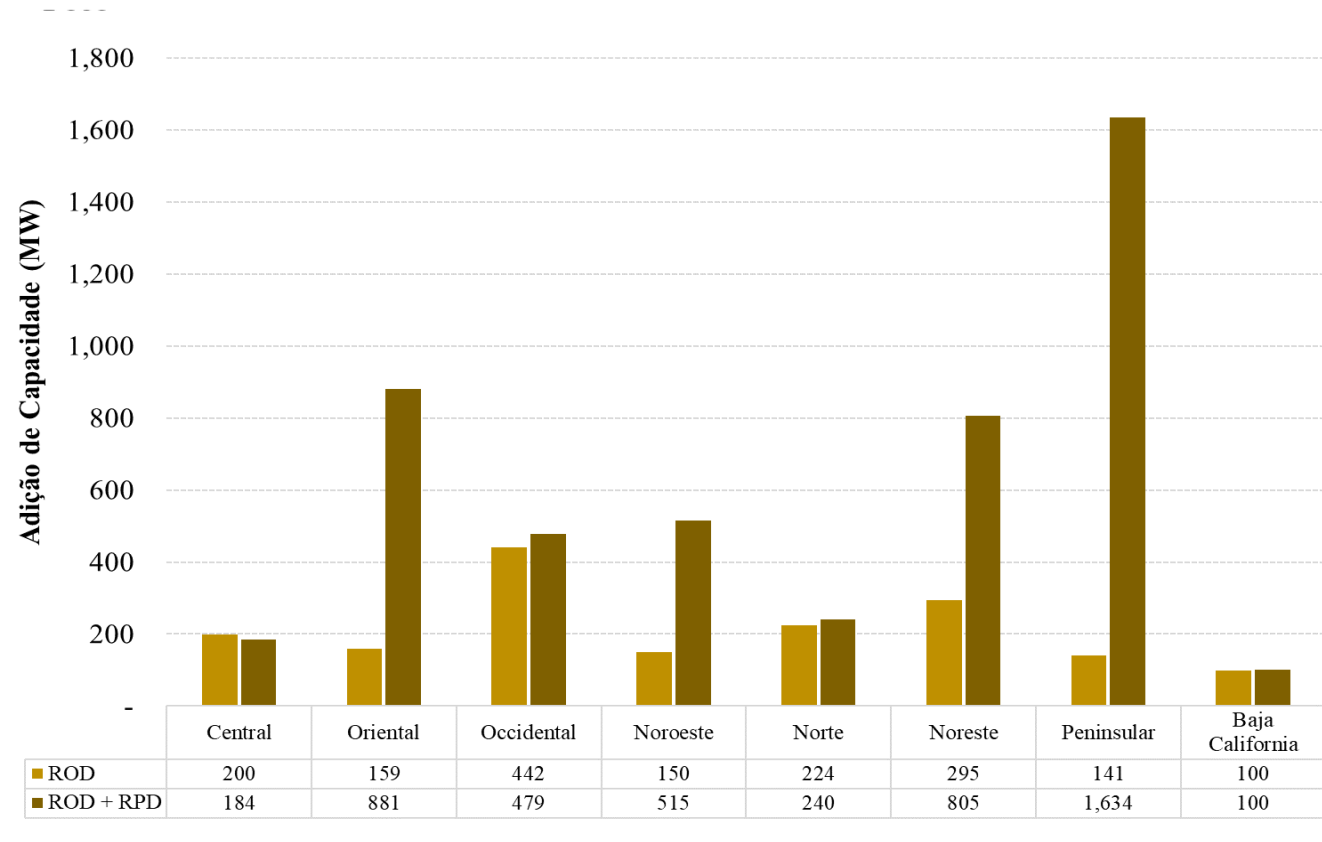
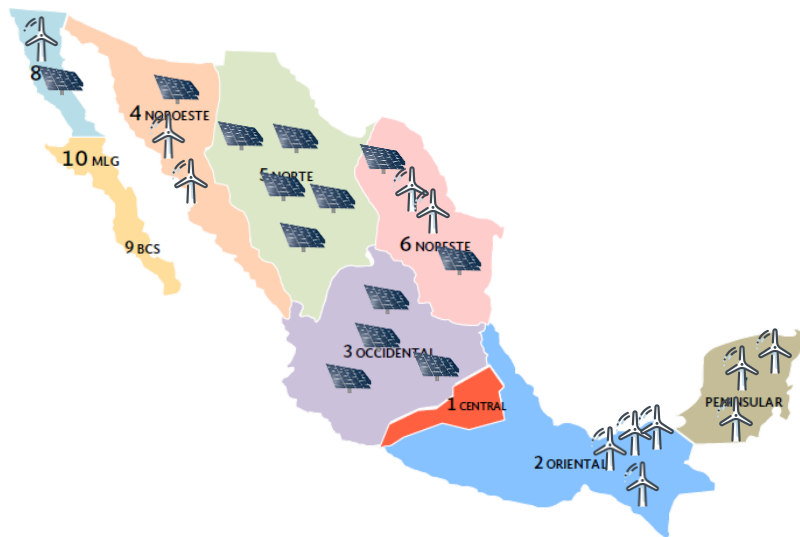


Estudo de Caso 1

Expansão

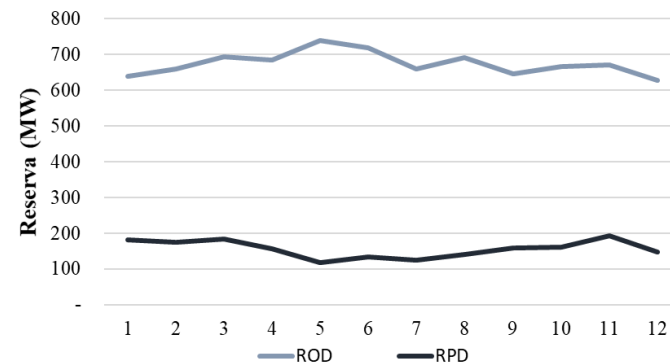
GN Ciclo Aberto

Regional

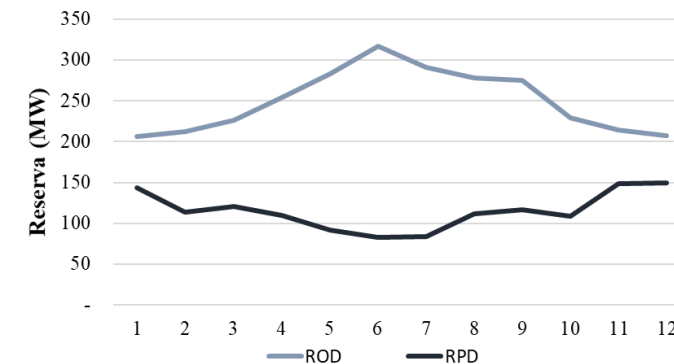


Comparação dos Requisitos de Reserva

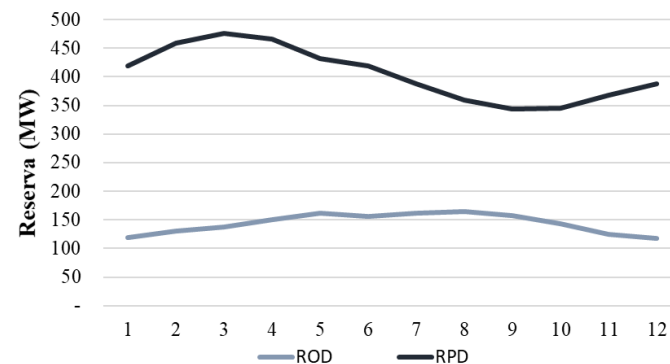
- Regiões (a) *Occidental* e (b) Norte apresentam baixa intermitência na oferta de energia. Não houve necessidade de aumentar a capacidade despachável
- Regiões (c) Peninsular e (d) Noreste apresentam alta intermitência na oferta de energia. Aumento da necessidade de capacidade despachável



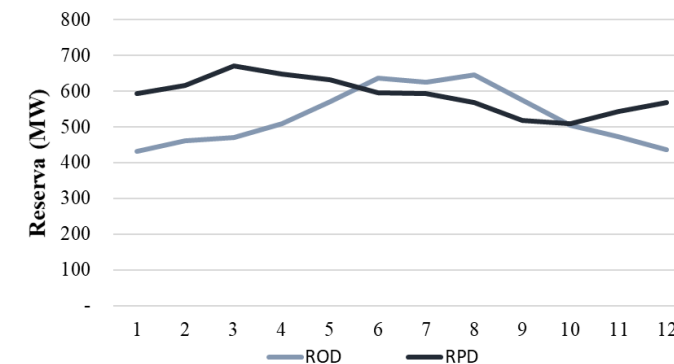
(a)



(b)



(c)



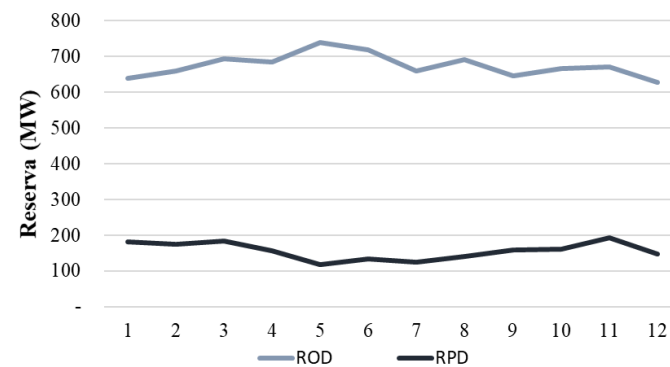
(d)

Comparação dos Requisitos de Reserva

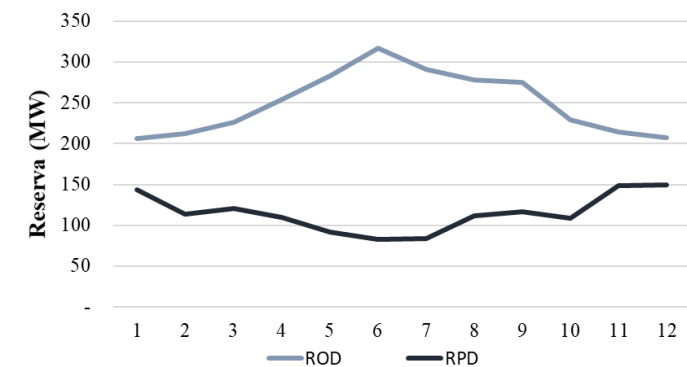
- Regiões (a) *Occidental* e (b) Norte apresentam baixa intermitência na oferta de energia. Não houve necessidade de aumentar a capacidade despachável
- Regiões (c) Peninsular e (d) Noreste apresentam alta intermitência na oferta de energia. Aumento da necessidade de capacidade despachável

$$\sum_{j \in A_j^a} r_{j,t,d,h}^s + \sum_{i \in A_i^a} r_{i,t,d,h}^s + \delta r_{a,t,d,h}^s \geq R_{a,t,h}$$

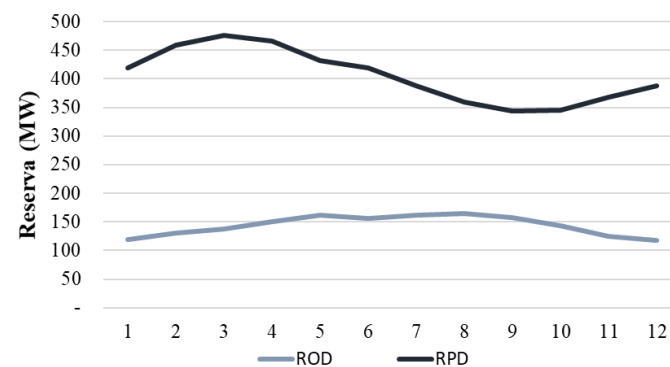
$$\sum_{j \in A_j^a} r_{j,t,d,h}^s + \sum_{i \in A_i^a} r_{i,t,d,h}^s + \delta r_{a,t,d,h}^s \geq R_{a,t,h}^{UP}$$



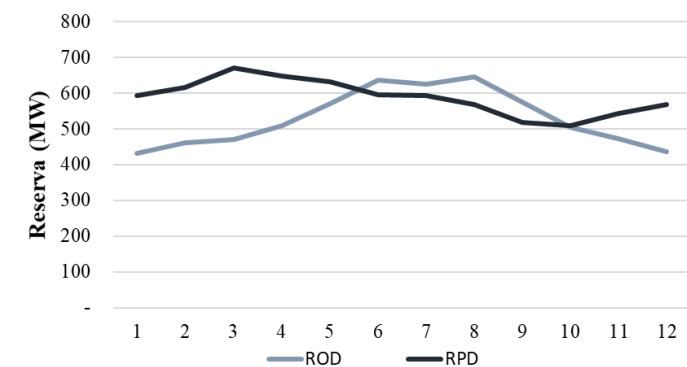
(a)



(b)



(c)



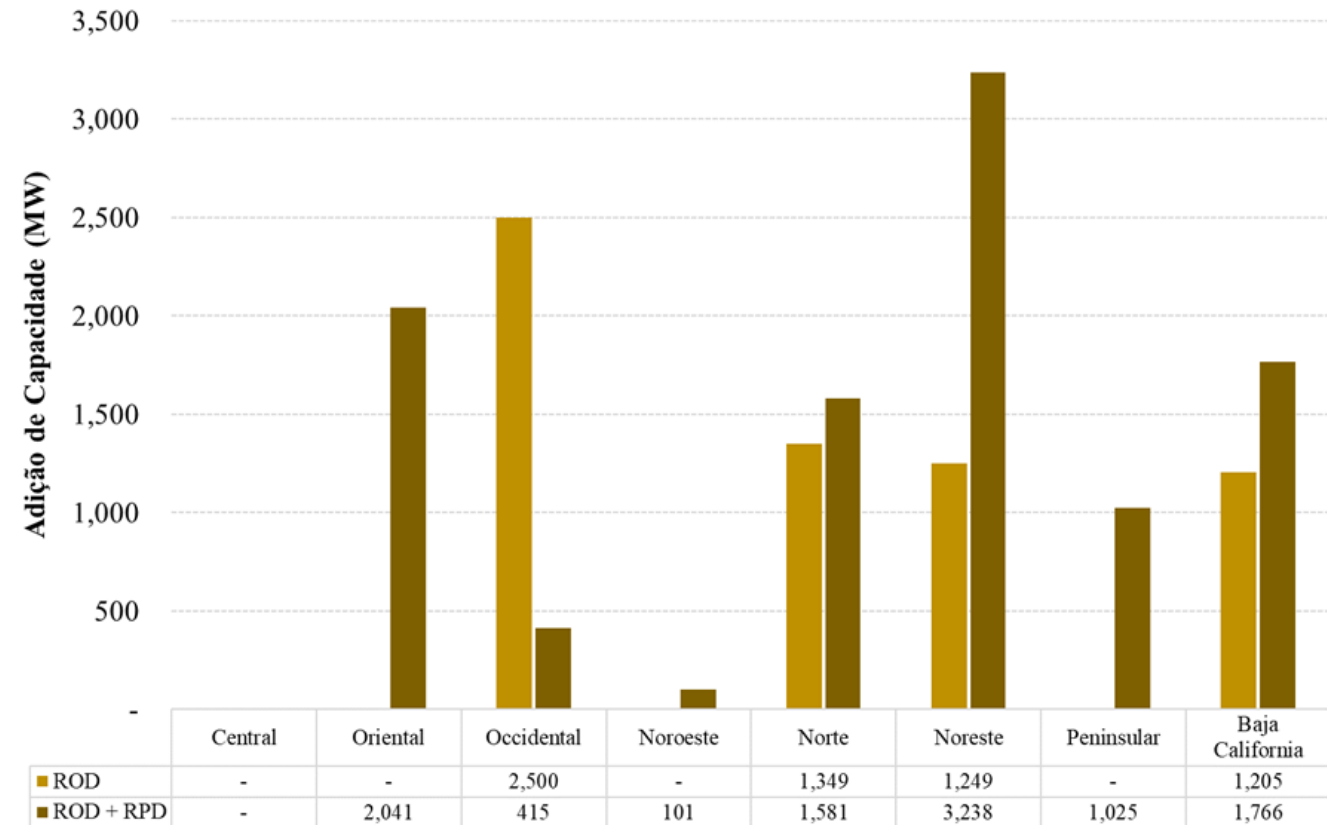
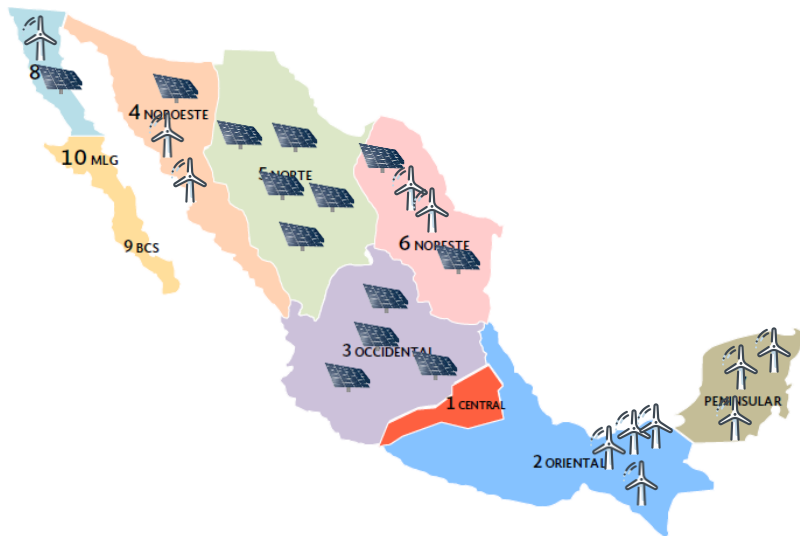
(d)

Estudo de Caso 1

Expansão

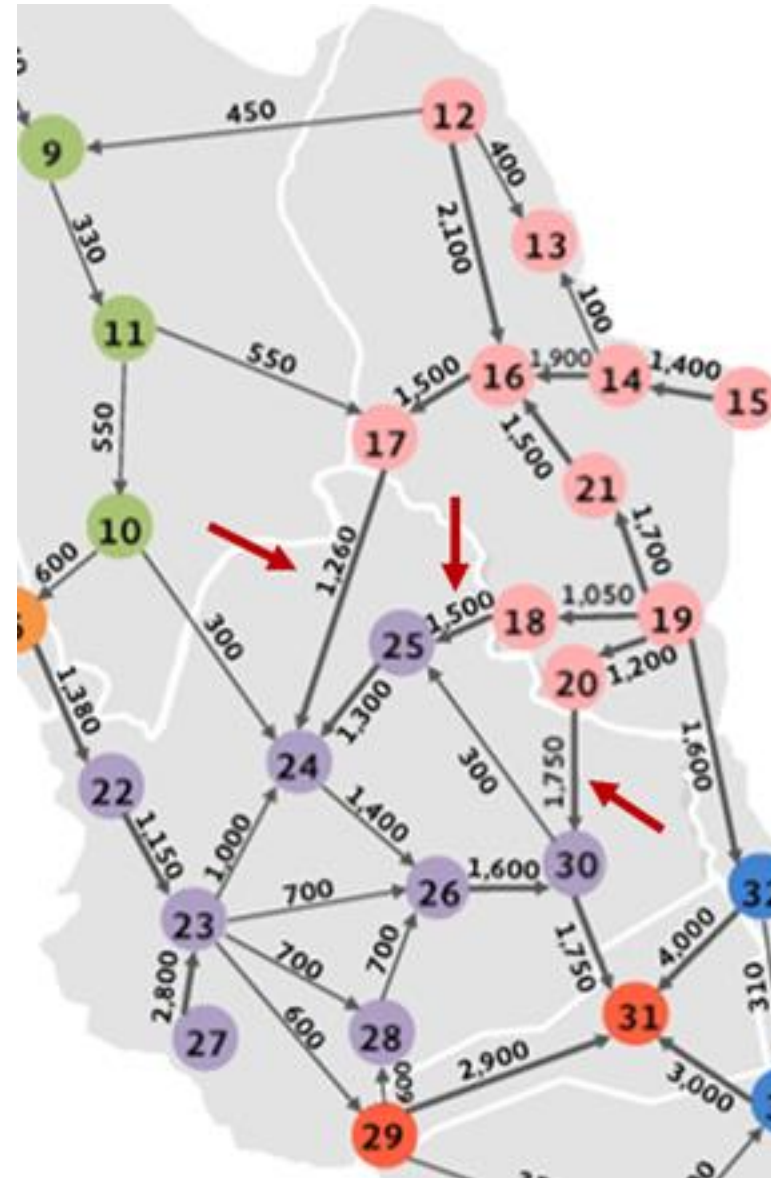
GN Ciclo Combinado

Regional



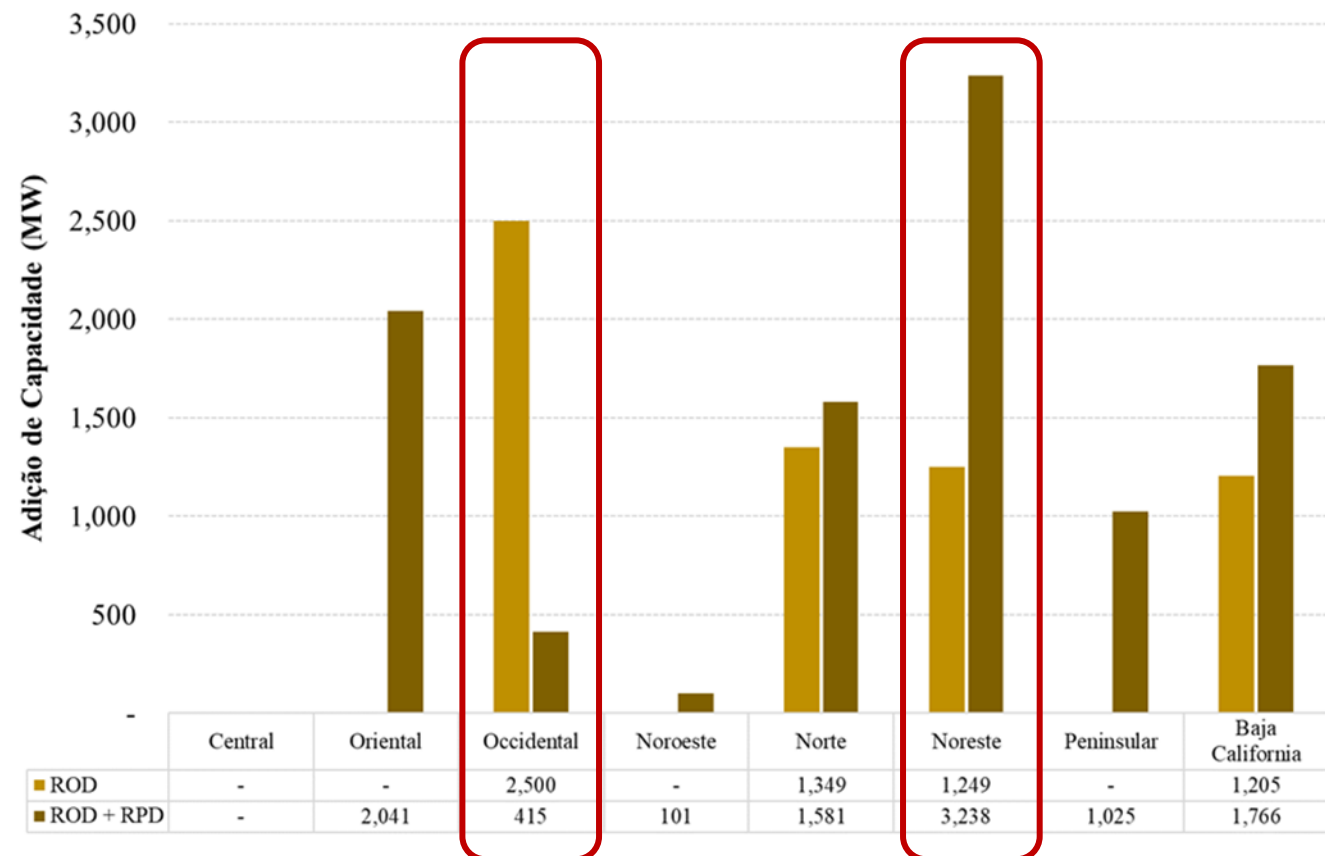
Análise das Interconexões entre *Occidental* e Noreste

- Regiões conectadas por meio de três interconexões



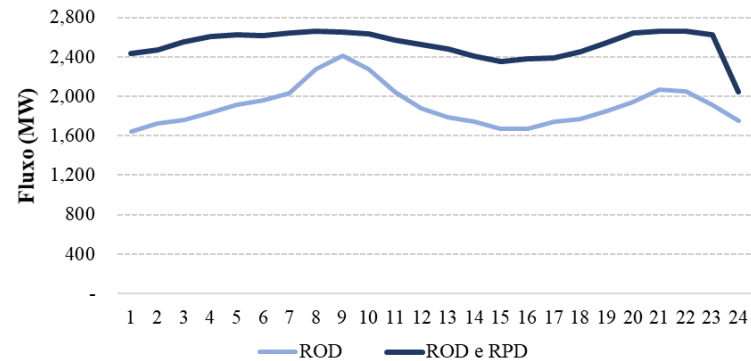
Análise das Interconexões entre *Occidental* e Noreste

- Regiões conectadas por meio de três interconexões
- Aumento de aproximadamente 2000 MW em usinas ciclo combinado na região Noreste e redução equivalente em *Occidental*
- Esse aumento é motivado pela combinação SFV e Eólica da região Noreste

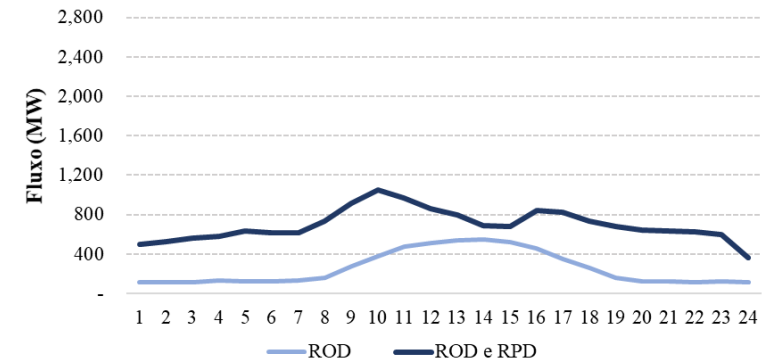


Análise das Interconexões entre *Occidental* e Noreste

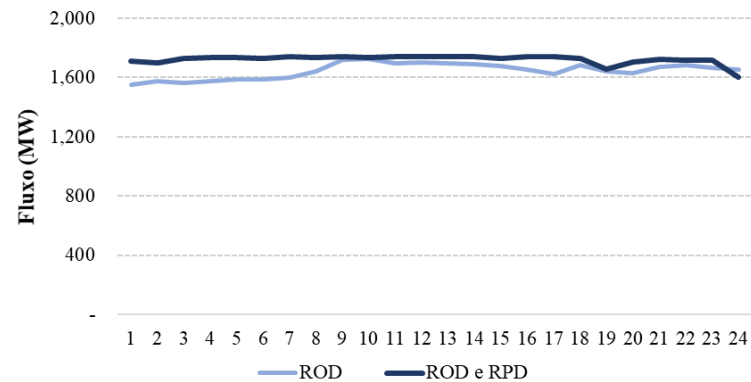
- Regiões conectadas por meio de três interconexões
- Aumento de aproximadamente 2000 MW em usinas ciclo combinado na região Noreste e redução equivalente em *Occidental*
- Aumento da importação de energia da região Noreste pela região *Occidental*



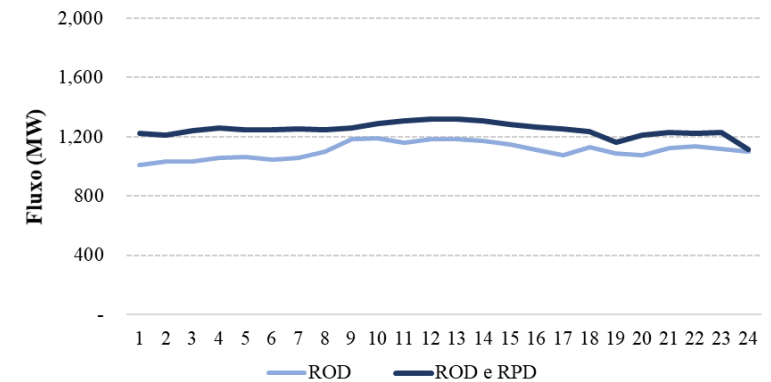
(17-24)



(18-25)



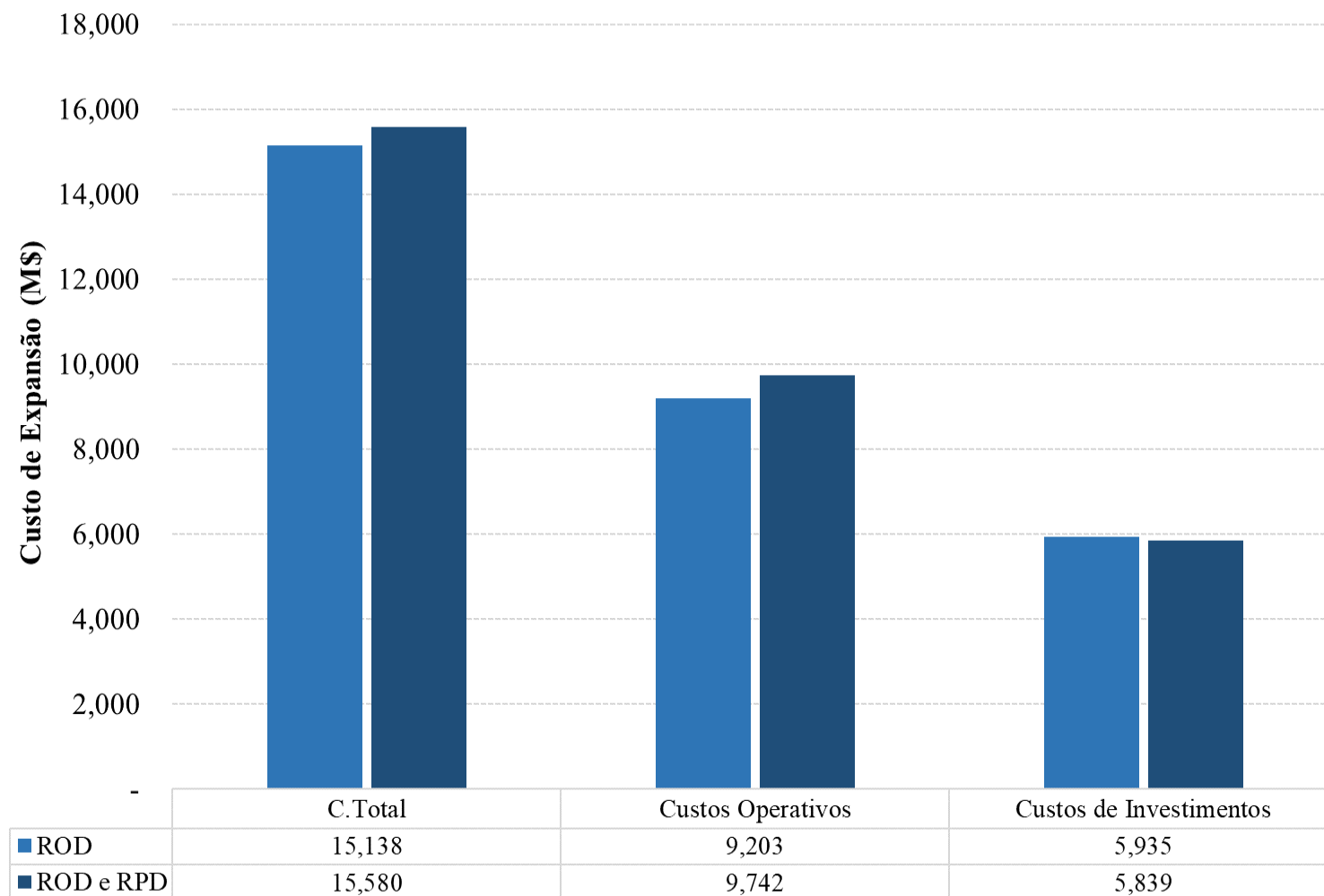
(20-30)



(19-20)

Comparação dos Custos de Expansão

- Aumento de 3% no custo total
- Causado por um aumento de 6% nos custos operativos médios do sistema





Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

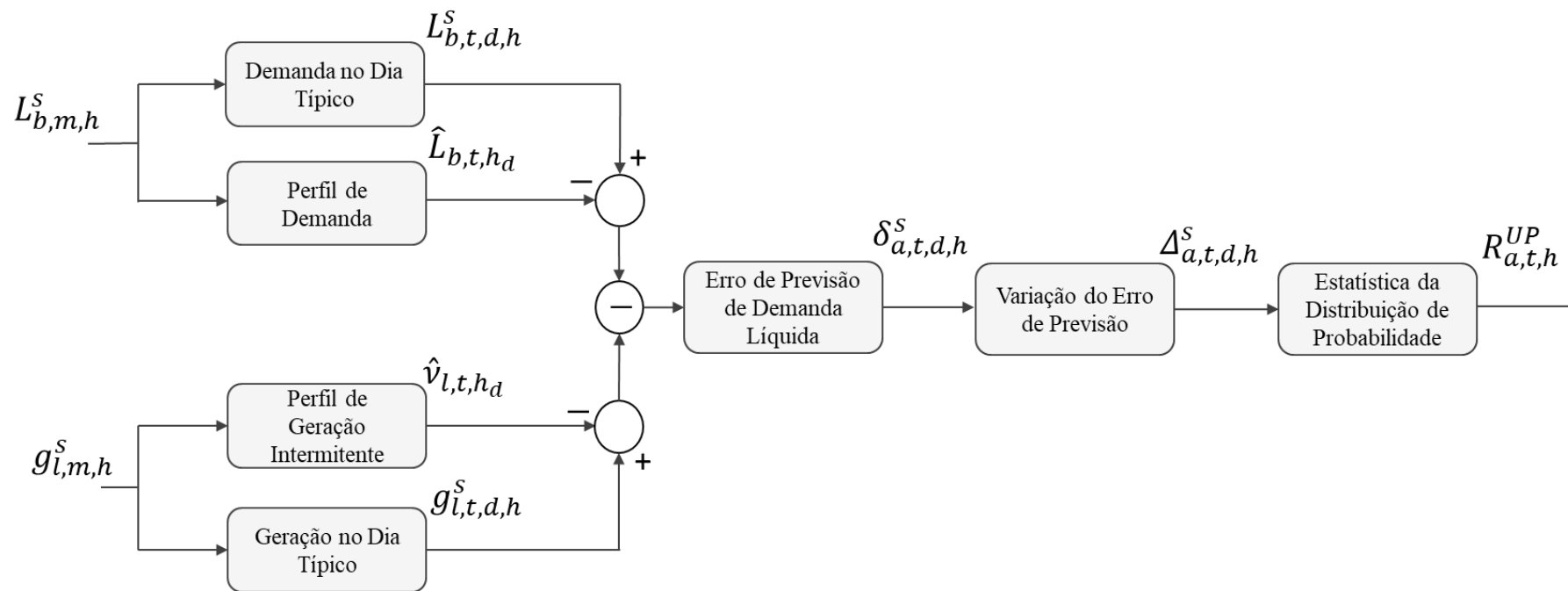
Conclusão

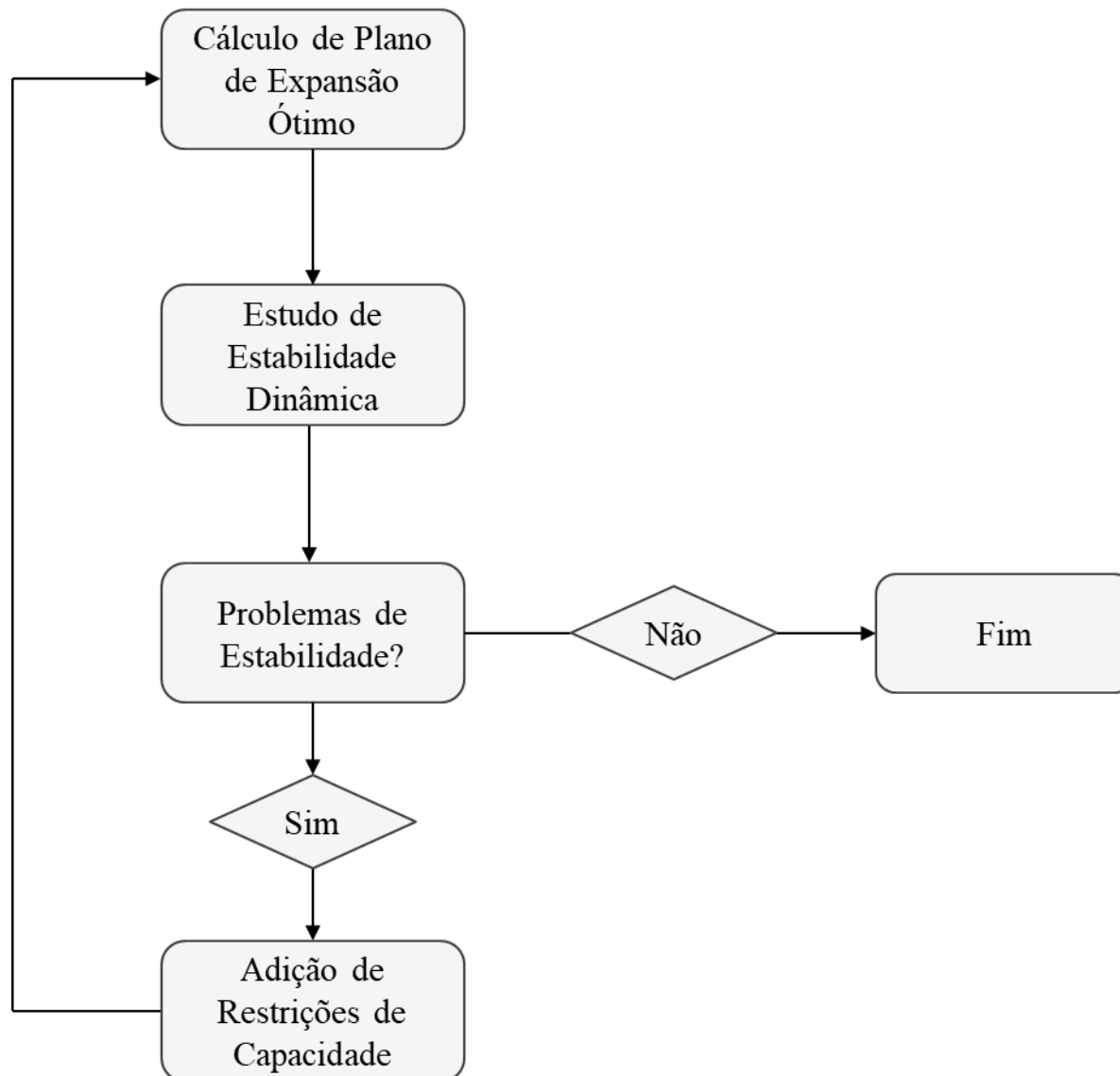
Considerações Finais

- O requisito de RPD pode causar uma realocação geográfica da expansão do sistema
- Algumas mudanças no sistema de transmissão também são observadas, uma vez que realocar as usinas, o perfil de exportação/importação de uma região pode ser alterado
- Aumento de custos relacionado ao aumento de confiabilidade no suprimento de energia

Trabalhos Futuros

- Alteração na metodologia da cálculo da RPD
- Cálculo do erro de previsão da demanda líquida e não apenas da geração intermitente





Trabalhos Futuros

- Estudo de estabilidade dinâmica com base no plano de expansão ótimo calculado.



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Obrigado!
Perguntas?



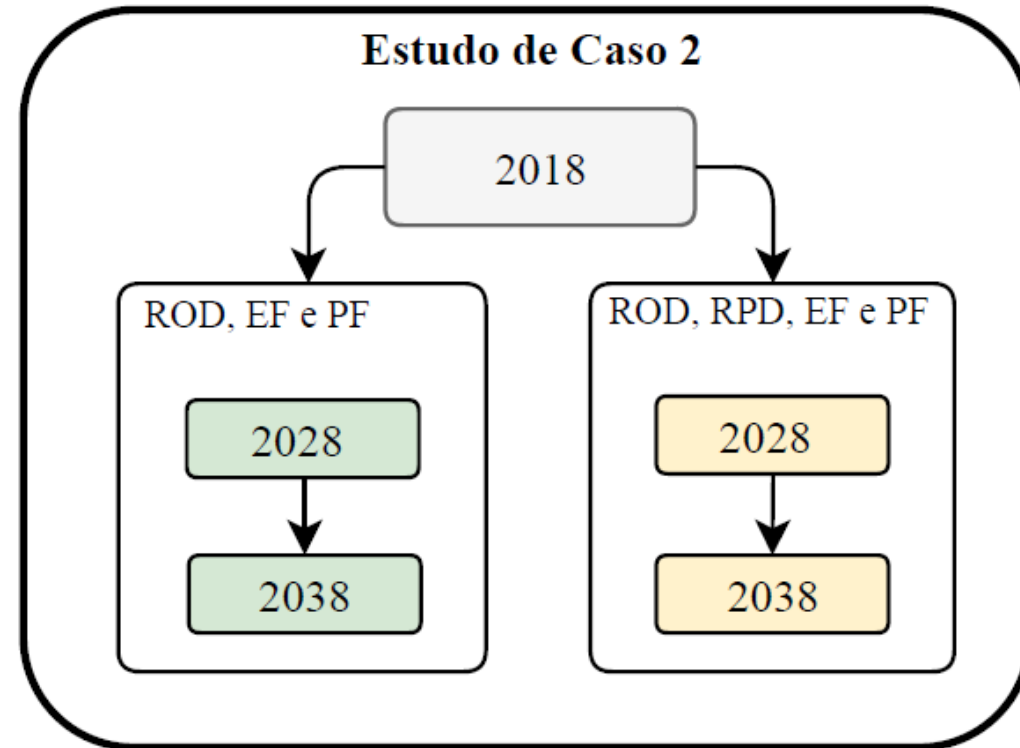
Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Anexo

Estudo de Caso 2

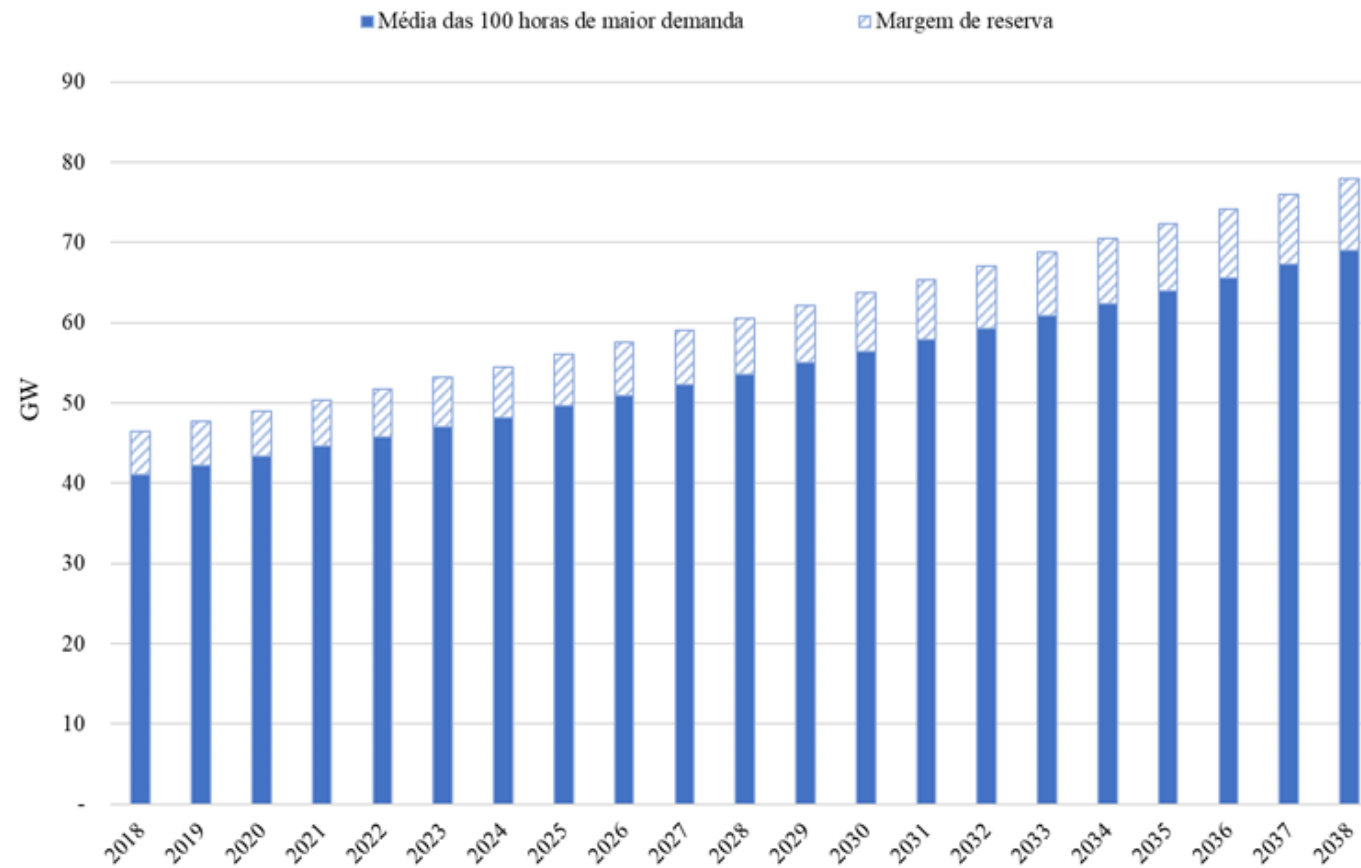
Estudo de Caso 2

- Adição de duas restrições que refletem metas definidas pelo agente planejador do México



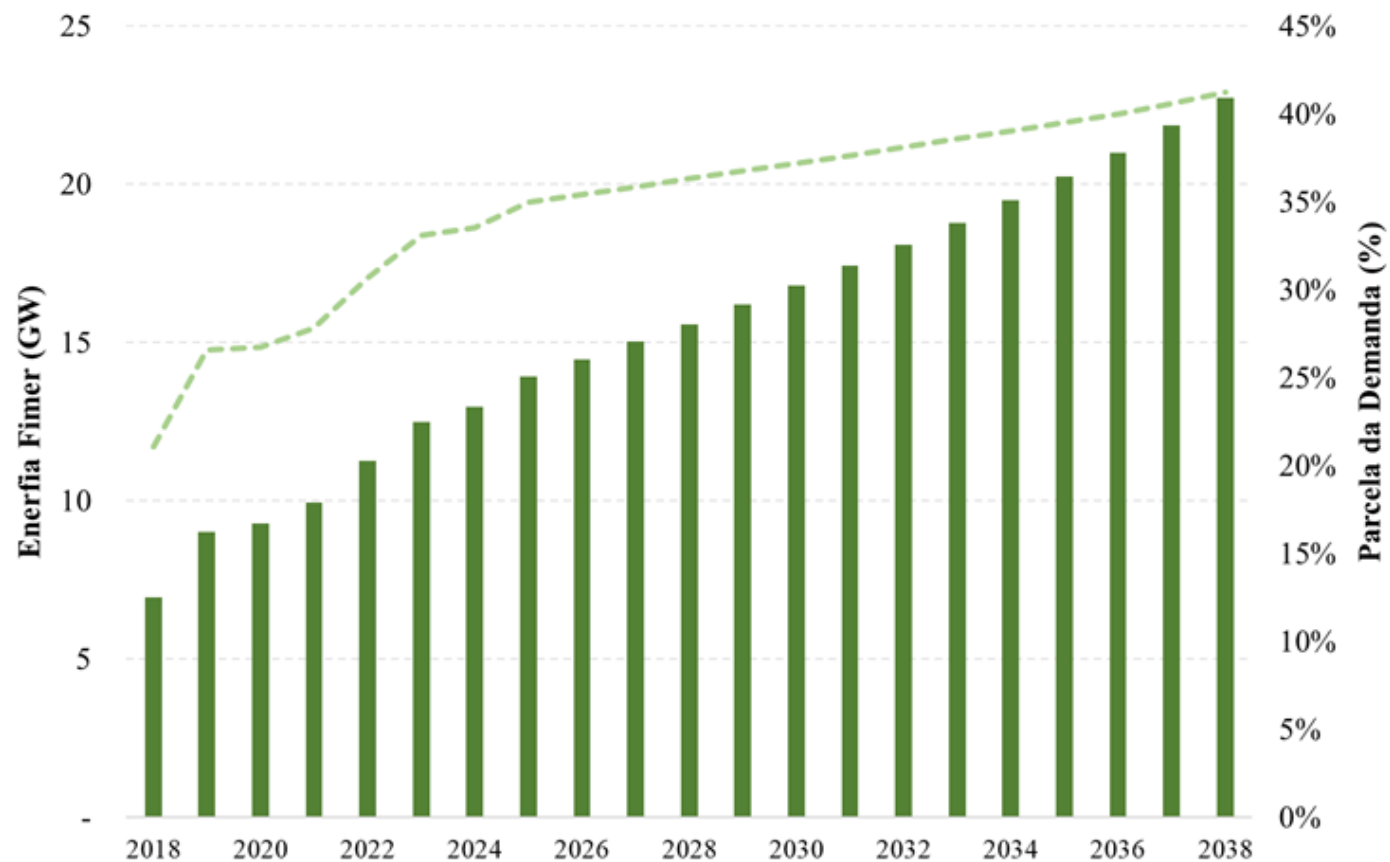
Margem de Reserva

Capacidade firme
13% acima da média
das 100 horas de
maior demanda



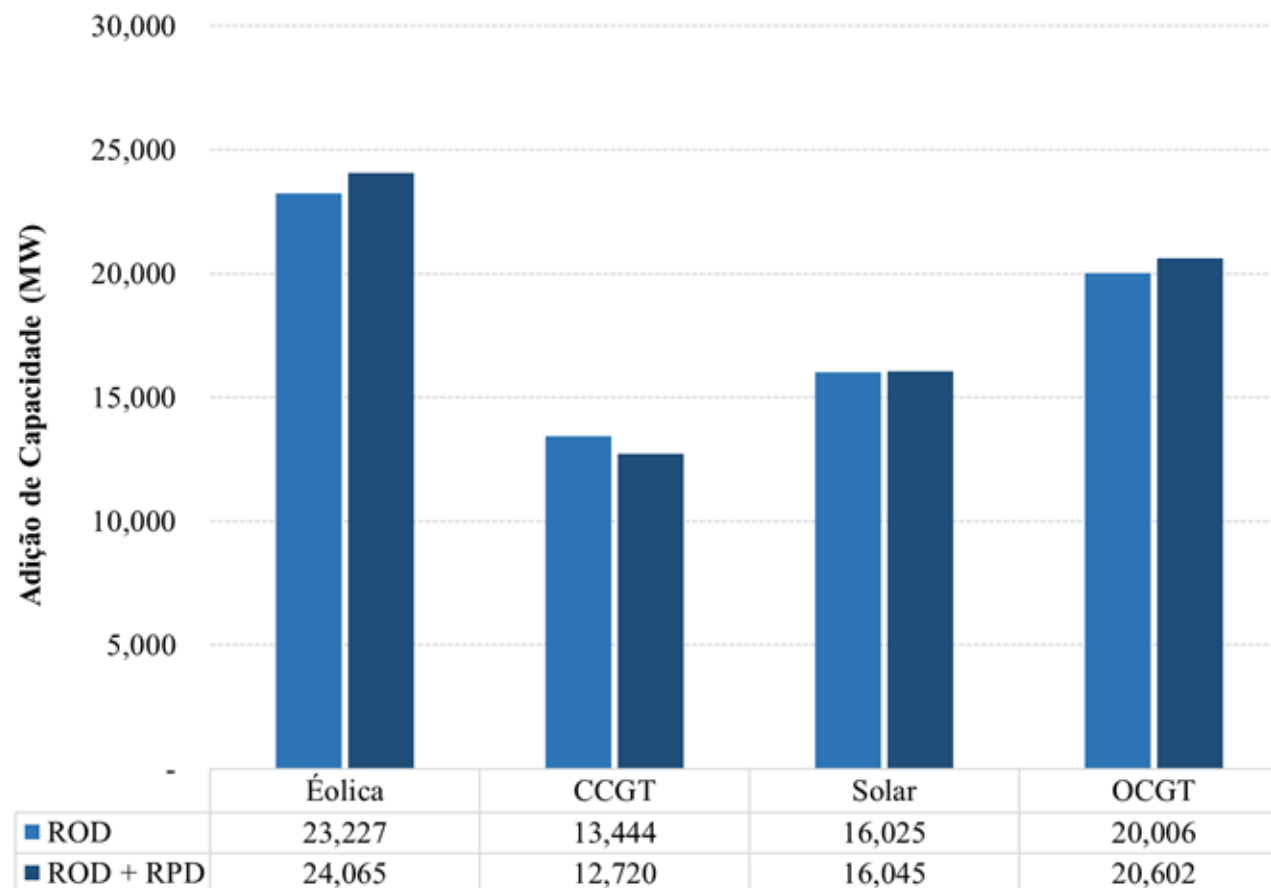
Metas de “Geração Limpa”

Atendimento de um
percentual da
demanda via fontes
limpas de energia



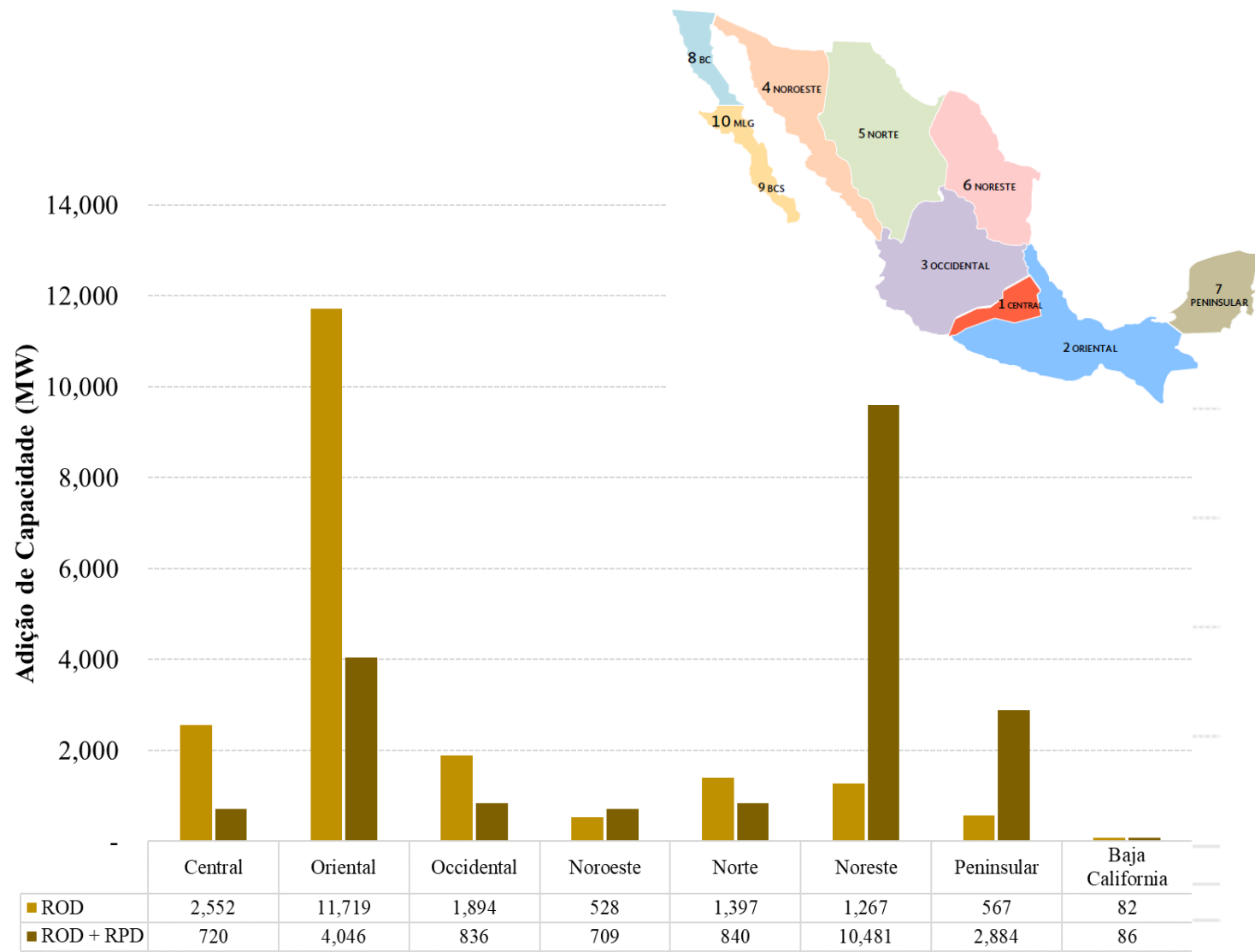
Estudo de Caso 2 Resultados

- Nesse caso, a introdução do requisito de RPD não causou mudanças significativas no montante de capacidade adicionada ao sistema, comparado ao caso ROD



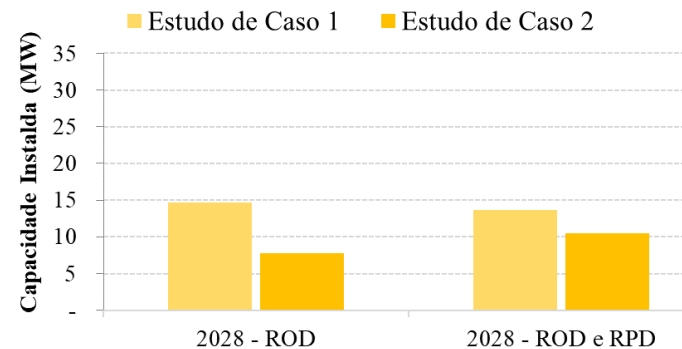
Estudo de Caso 2 Resultados

- No entanto, houve uma realocação geográfica das usinas GN Ciclo aberto
- Posicionamento dessas usinas na região Noreste, onde além de compensar a variabilidade das fontes intermitentes da região, há a possibilidade de exportar energia para as regiões *Occidental* e *Oriental*

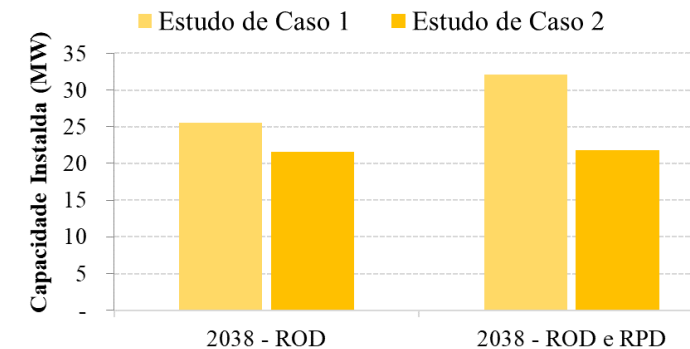


Estudo de Caso 2 Resultados

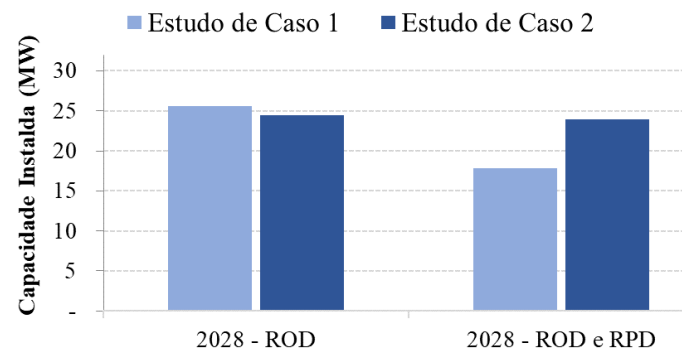
- Expansão eólica para os dois estudos de caso
- (a) e (b) – SFVs
- (c) e (d) – Eólicas



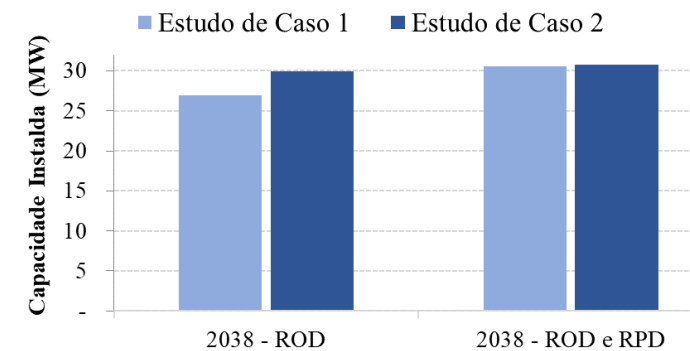
(a)



(b)



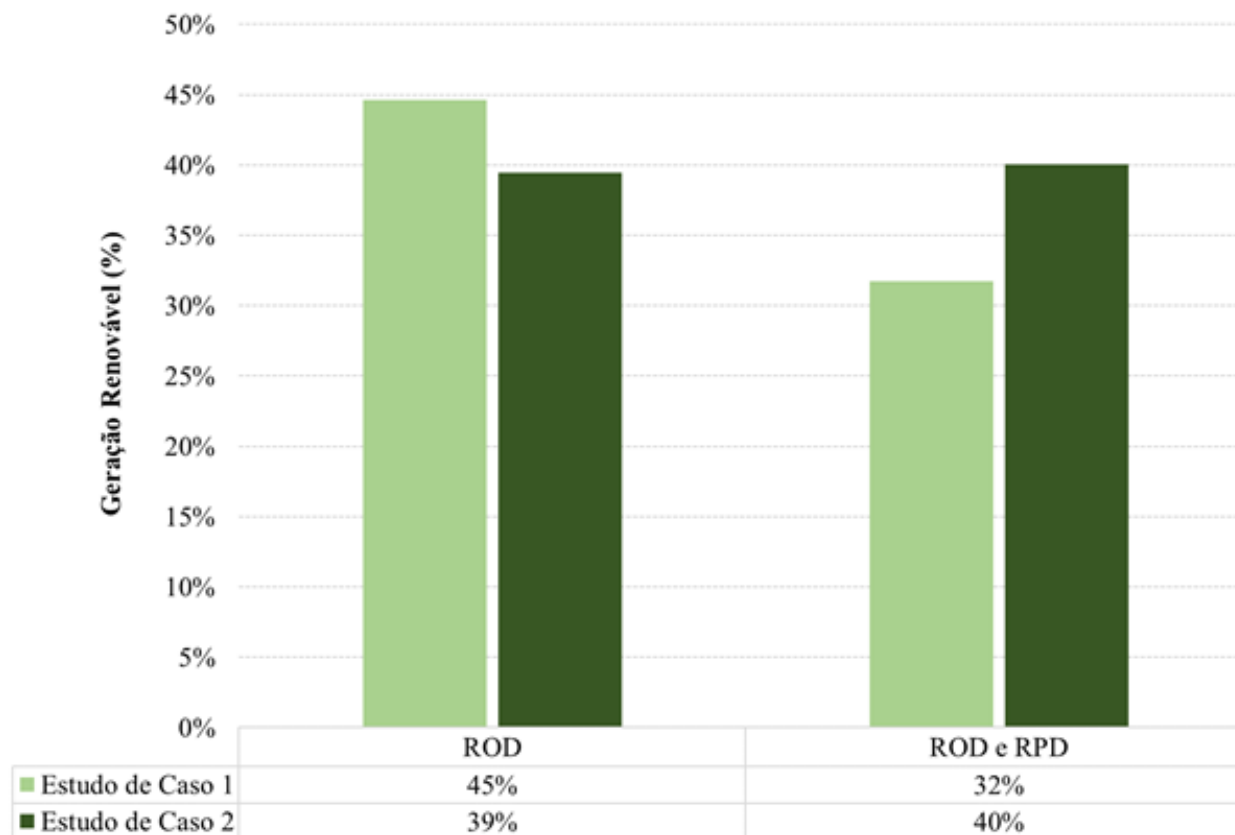
(c)



(d)

Estudo de Caso 2 Resultados

- No Estudo de Caso 1, quando não havia a restrição de metas de energia limpa, a geração não conseguia atingir a meta de 41% quando há o requisito de RPD



Comparação dos Custos Totais em EC1 e EC2

- Aumento de custos nas alternativas de expansão do EC2 em relação ao EC1
- Esse sobre-custo reflete o valor pago pela confiabilidade de suprimento de energia e o alcance de metas de inserção de determinadas fontes de energia

Alternativas de Expansão	Investimento (M\$)	Operação (M\$)	Total (M\$)
ROD – EC 1	5,935	9,203	15,138
ROD e RPD - EC 1	5,839	9,742	15,580
ROD - EC 2	6,406	10,230	16,636
ROD e RPD – EC 2	6,480	10,184	16,664