



# Despacho Hidrotérmico com Restrições de Segurança: Algoritmos e Estudos de Caso de Grande Escala

**Joaquim Dias Garcia**  
joaquim@psr-inc.com

# PSR

A principal característica da PSR é integrar estudos de consultoria, desenvolvimento de ferramentas analíticas avançadas e pesquisa de ponta em novas metodologias.



---

## Ferramentas Analíticas

Planejamento energético  
Simulação probabilística horária  
Otimização de portfólios físico-financeiros

---

## Consultoria

Avaliação e desenho de mercados  
“Valuation” econômico-financeira  
Estudos de planejamento e operação

---

## Inovação

Projetos de P&D  
Ensino e pesquisa acadêmica  
Arquiteturas computacionais avançadas

# PSR

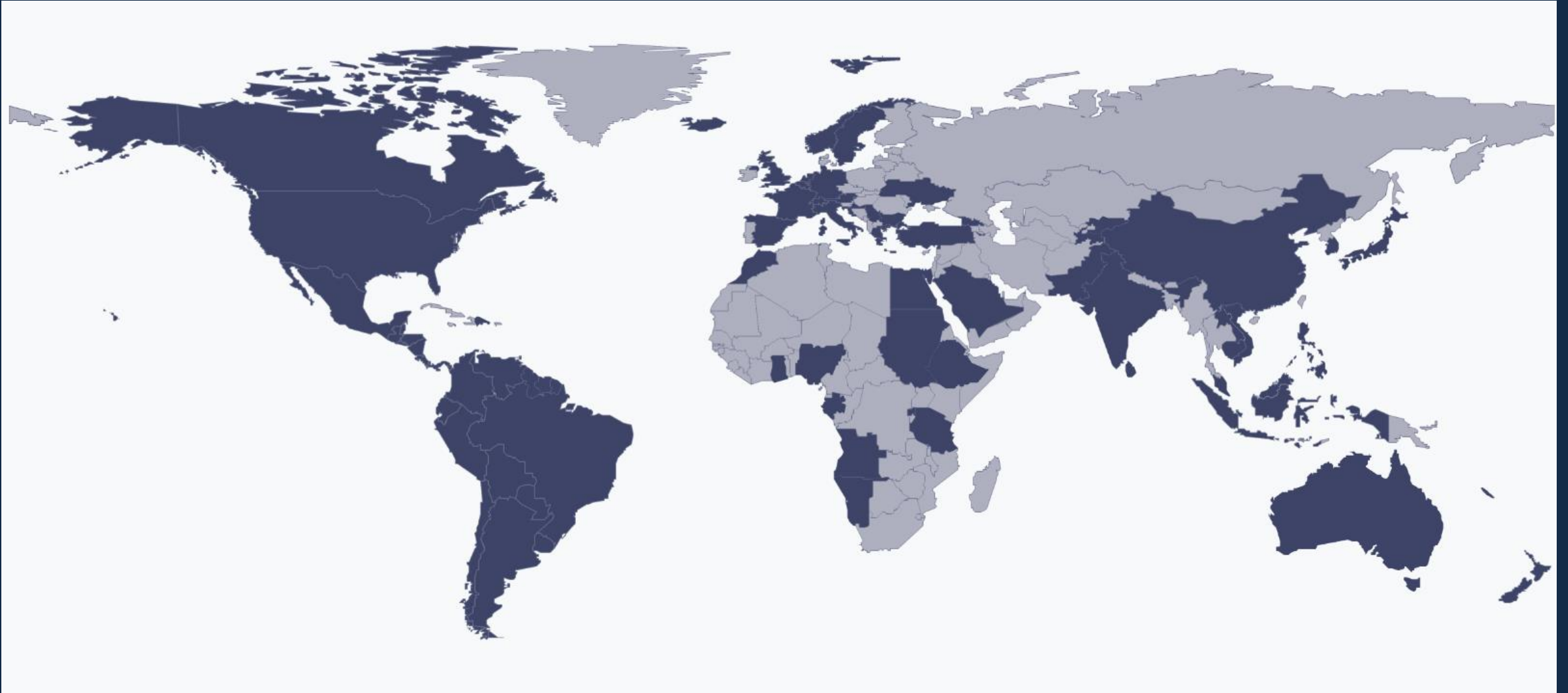
Nossa equipe é formada por 100 especialistas em várias áreas de conhecimento analítico, como otimização, estatística, sistemas de energia e ciência da computação.





# PSR

Onde atuamos?



# PSR

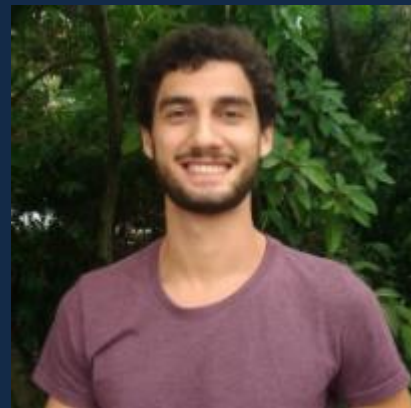
Um trabalho conjunto com:



Raphael Sampaio



Thiago Novaes



Iago Leal



Rafael Benchimol



Tiago Andrade

# PSR

## Mas... It takes a village ...

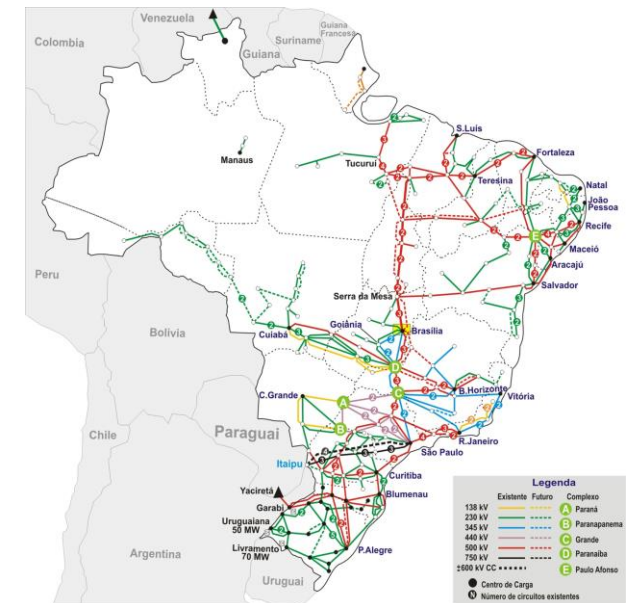
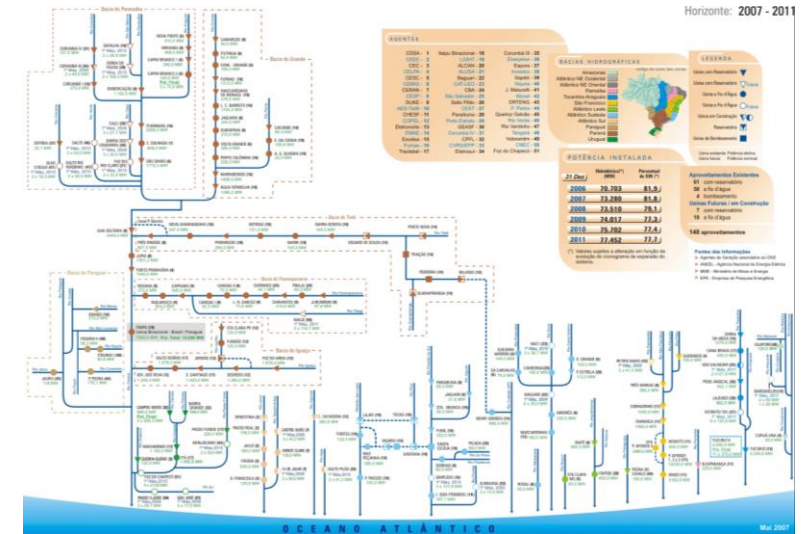
**SDDP:** Mario Veiga, Luiz Carlos, Julio Alberto, André Dias, Raphael Chabar, Ricardo Perez, Luiz Rafael, Sergio Granville, **PSRCloud:** Marcelo Cruz, Fabricio Rodrigues, Geovane Santos, **Dados:** Maynara Aredes, Lucas Okamura, João Vilela, Bruno Bernhardt, Igor Carvalho, Silvio Binato, Daniela Bayma, **E Muito Mais...**





# Despacho Hidro-Térmico com Restrições de Segurança - Desafios

- ▶ Despacho estocástico multi-estágio em topologias complexas
  - SDDP
  - Pereira, Mario VF, and Leontina MVG Pinto. "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning." *Mathematical programming* 52.1 (1991): 359-375.
- ▶ Redes elétricas grandes e restrições de segurança
  - Specialized Cutting Planes
  - Stott, Brian, and J. L. Marinho. "Linear programming for power-system network security applications." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 3 (1979): 837-848.



# Mais sobre restrições de segurança

- ▶ Buscar iterativamente restrições de rede violadas
- ▶ Stott, Brian, and J. L. Marinho. "Linear programming for power-system network security applications." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 3 (1979): 837-848.
- ▶ Outras referências
  - Stott, Brian, Jorge Jardim, and Ongun Alsaç. "DC power flow revisited." *IEEE Transactions on Power Systems* 24.3 (2009): 1290-1300.
  - Ardakani, Ali Jahanbani, and François Bouffard. "Identification of umbrella constraints in DC-based security-constrained optimal power flow." *IEEE Transactions on Power Systems* 28.4 (2013): 3924-3934.
  - Thomé, Fernanda S., et al. "Decomposition approach for generation and transmission expansion planning with implicit multipliers evaluation." *Pesquisa Operacional* 33.3 (2013): 343-359.
  - Modelo Em Código Aberto De Ootimização Da Energia E Reservas Com Restrição De Unit Commitment Para A Programação Diária Da Operação Sob Critério N-k, Dissertação de mestrado, Eros Carvalho e Alexandre Street (2019)

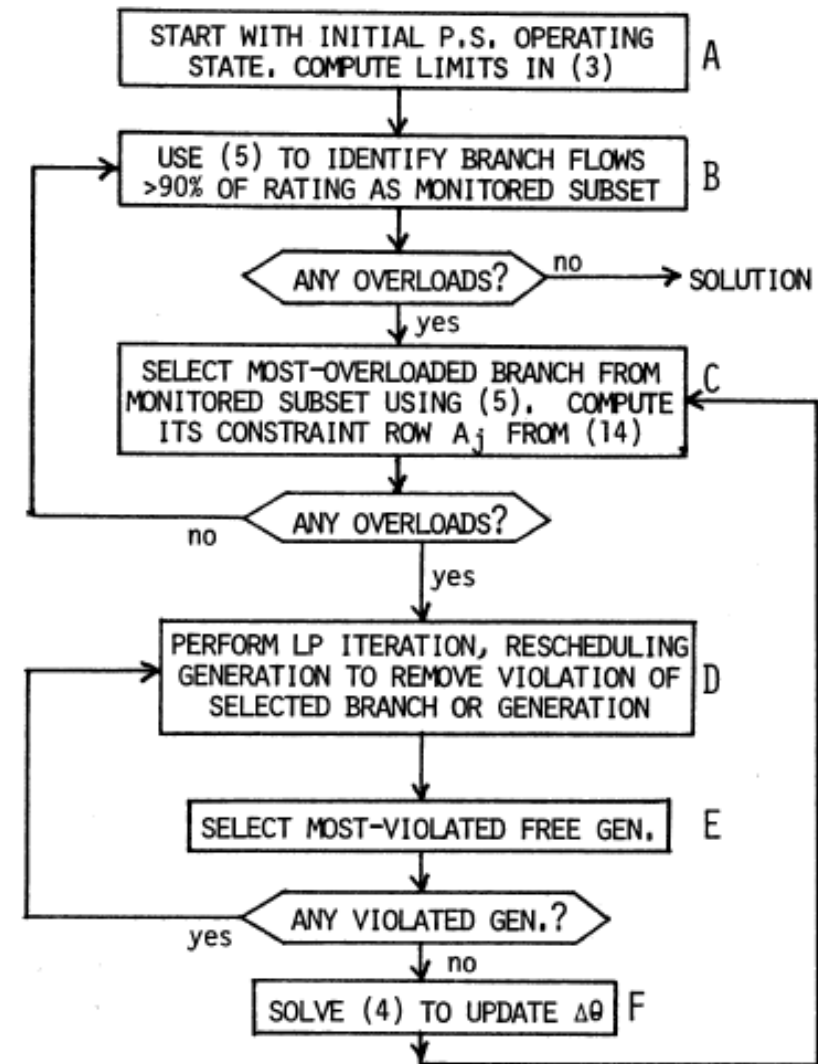
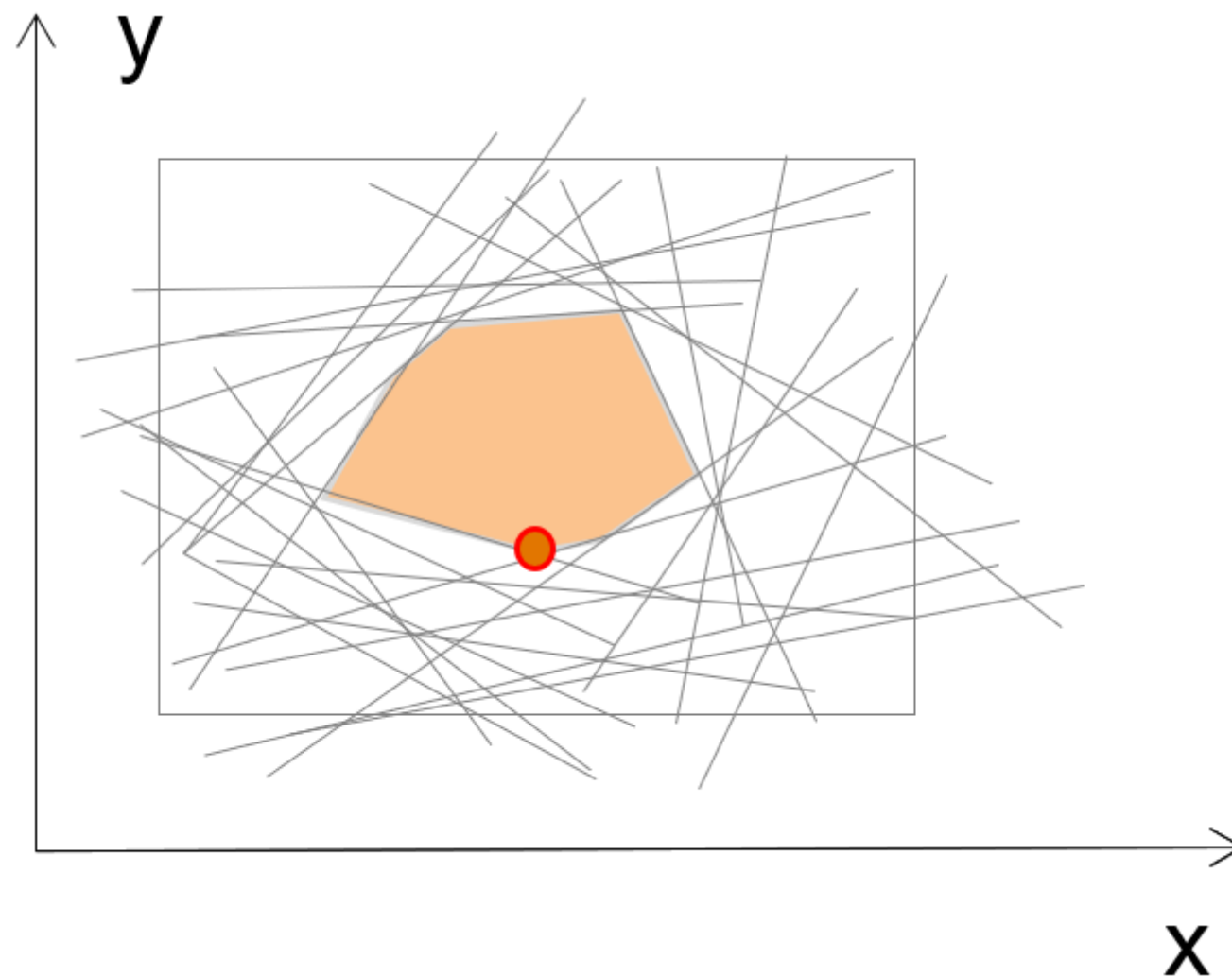


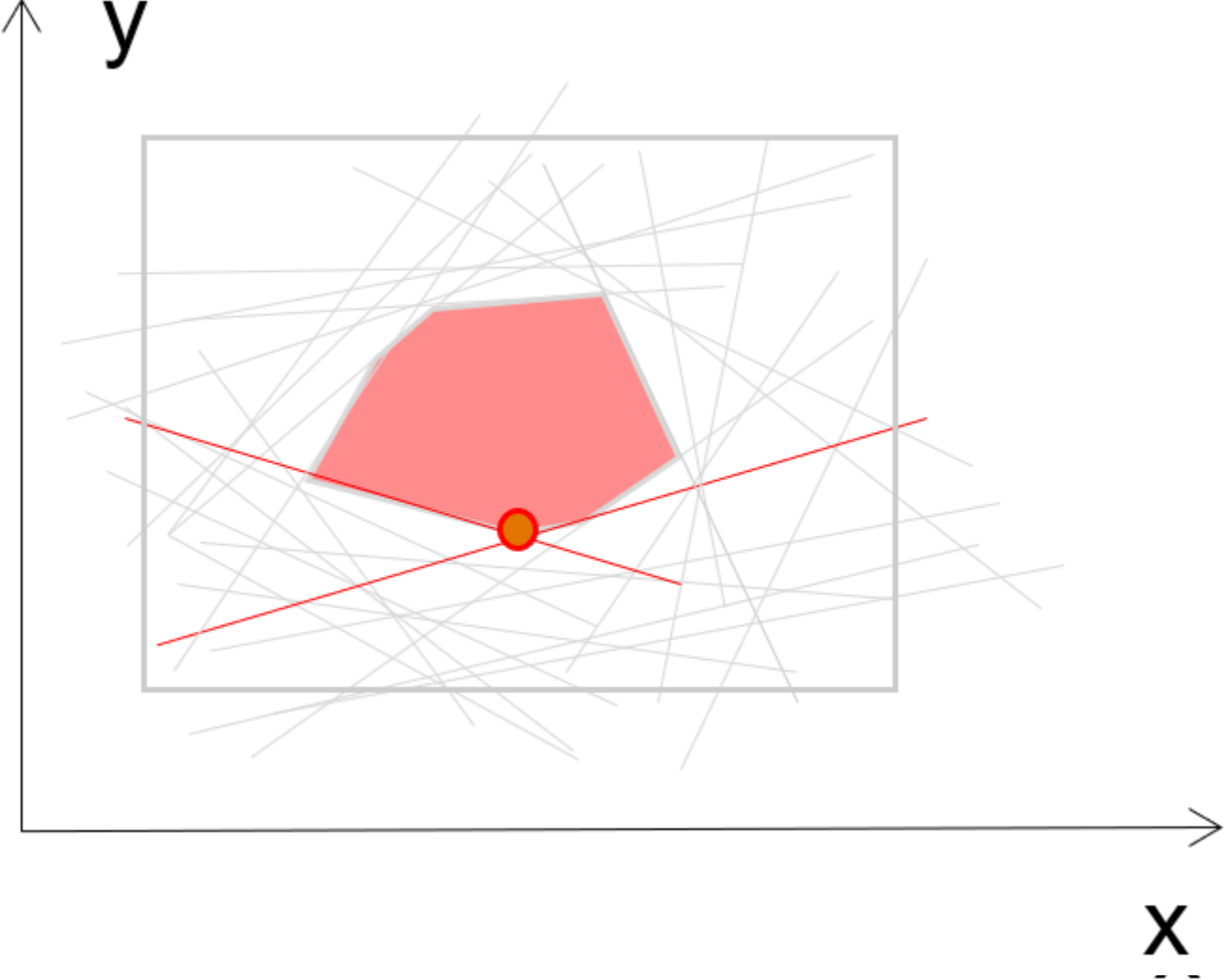
Fig. 1: Overall Flow Diagram of LP Solution Method



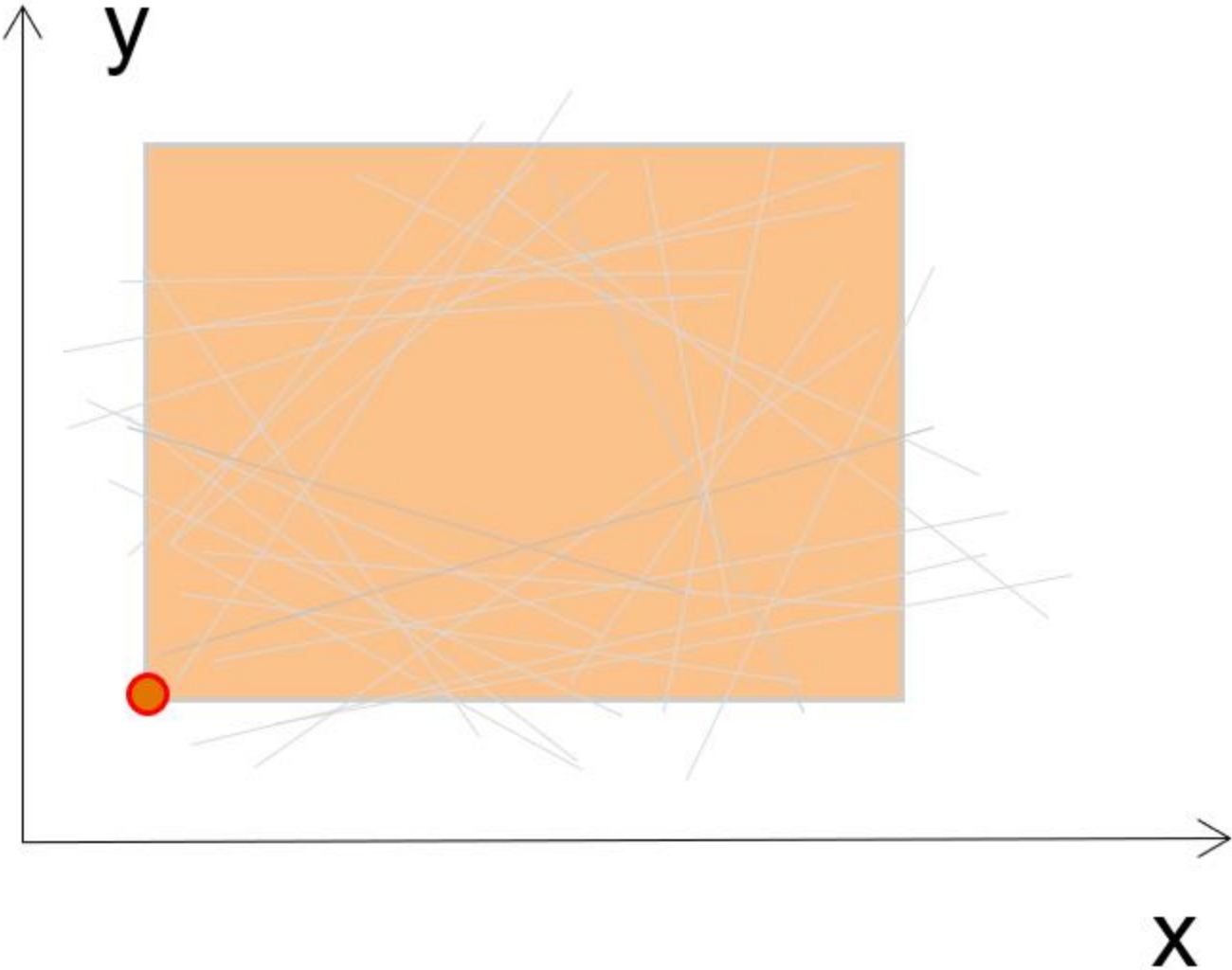
## Mais sobre restrições de segurança



# Mais sobre restrições de segurança

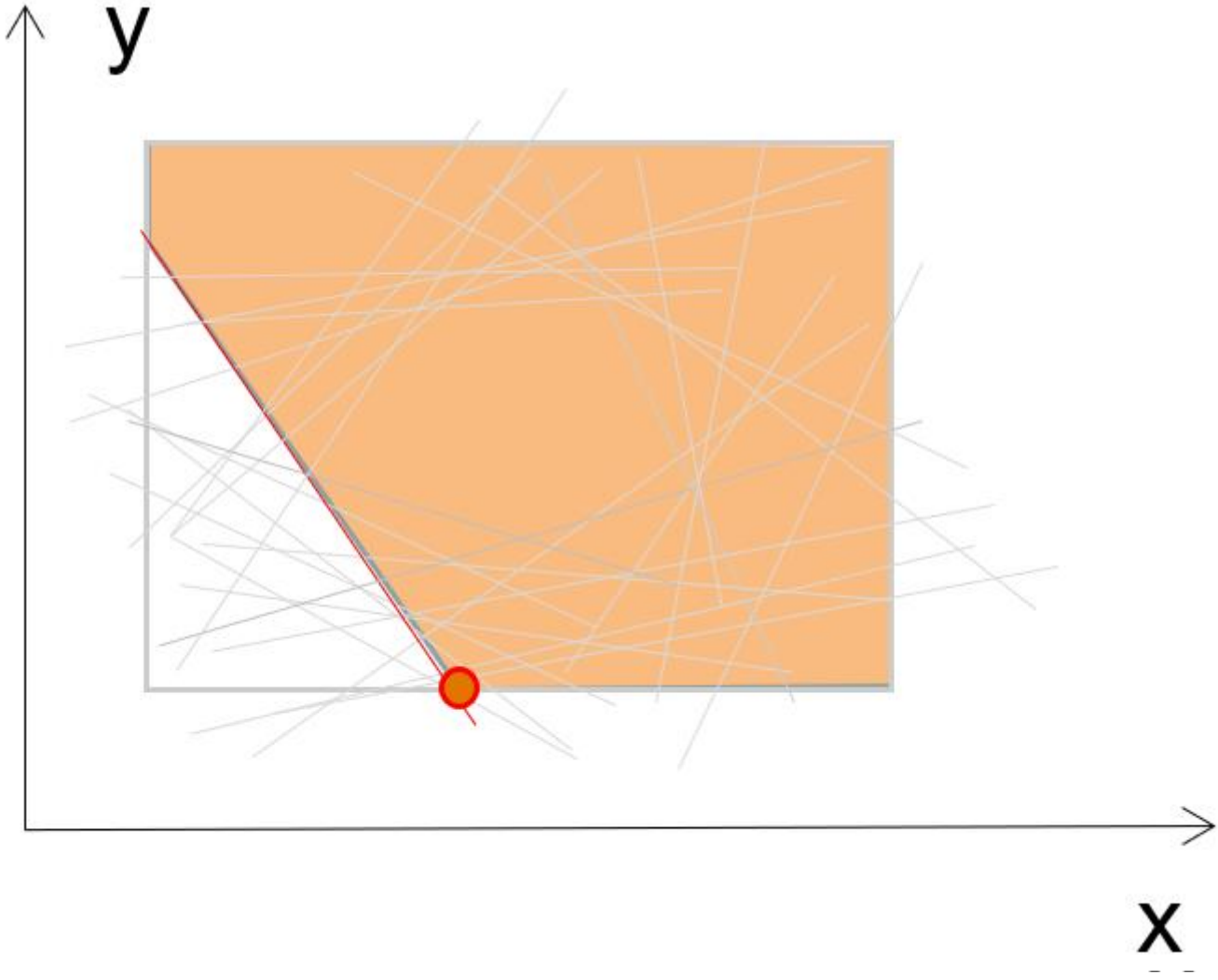


# Mais sobre restrições de segurança

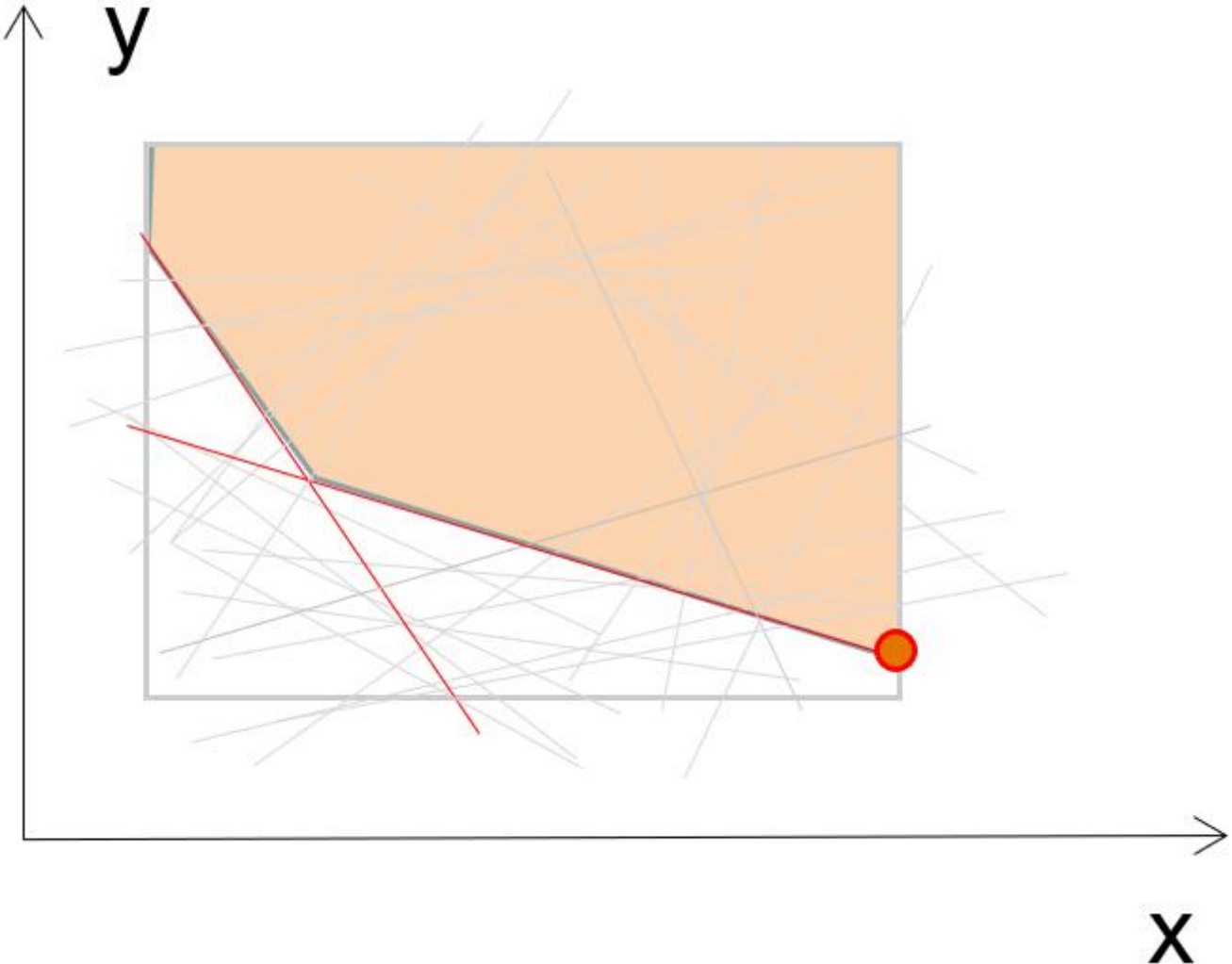




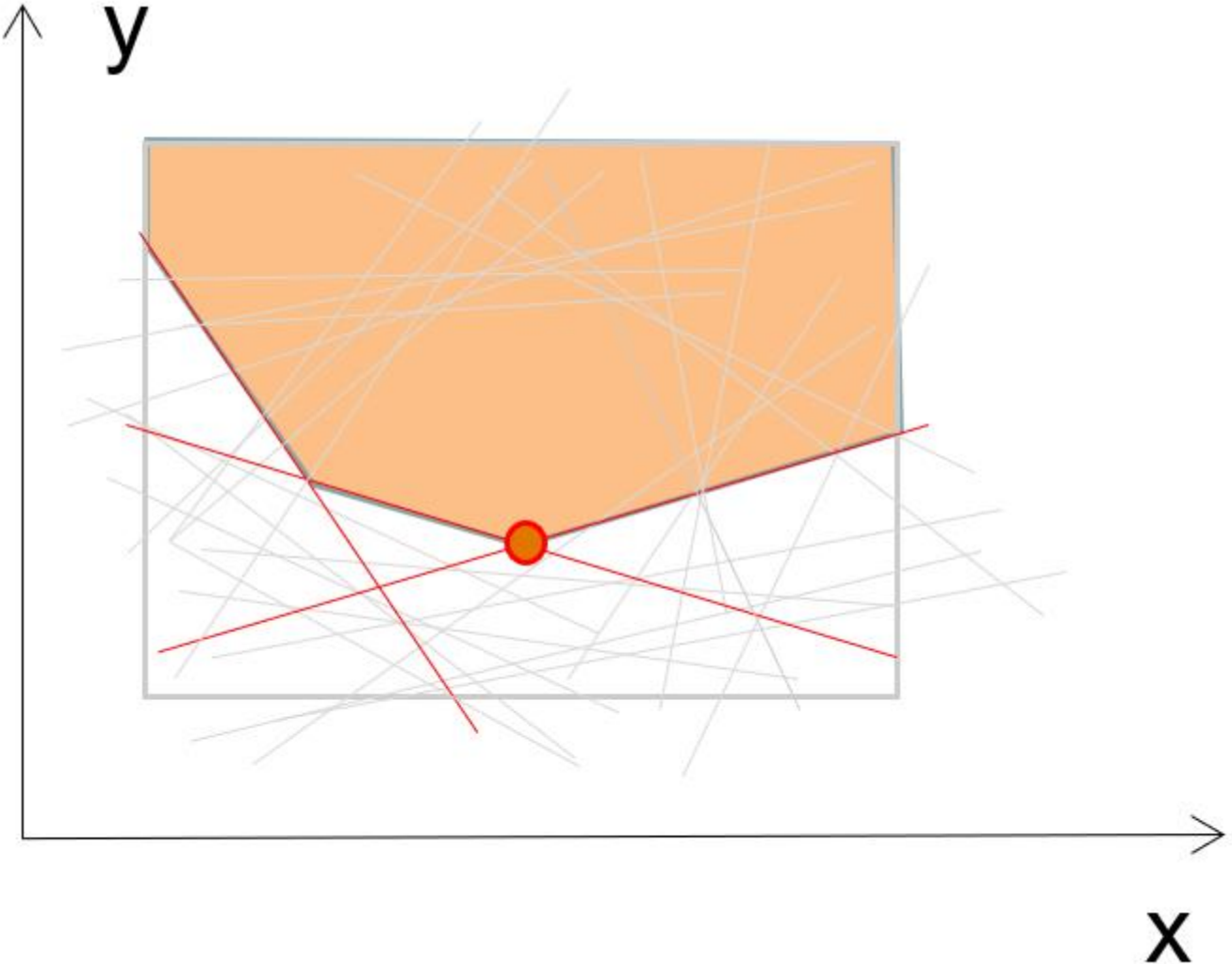
# Mais sobre restrições de segurança



# Mais sobre restrições de segurança

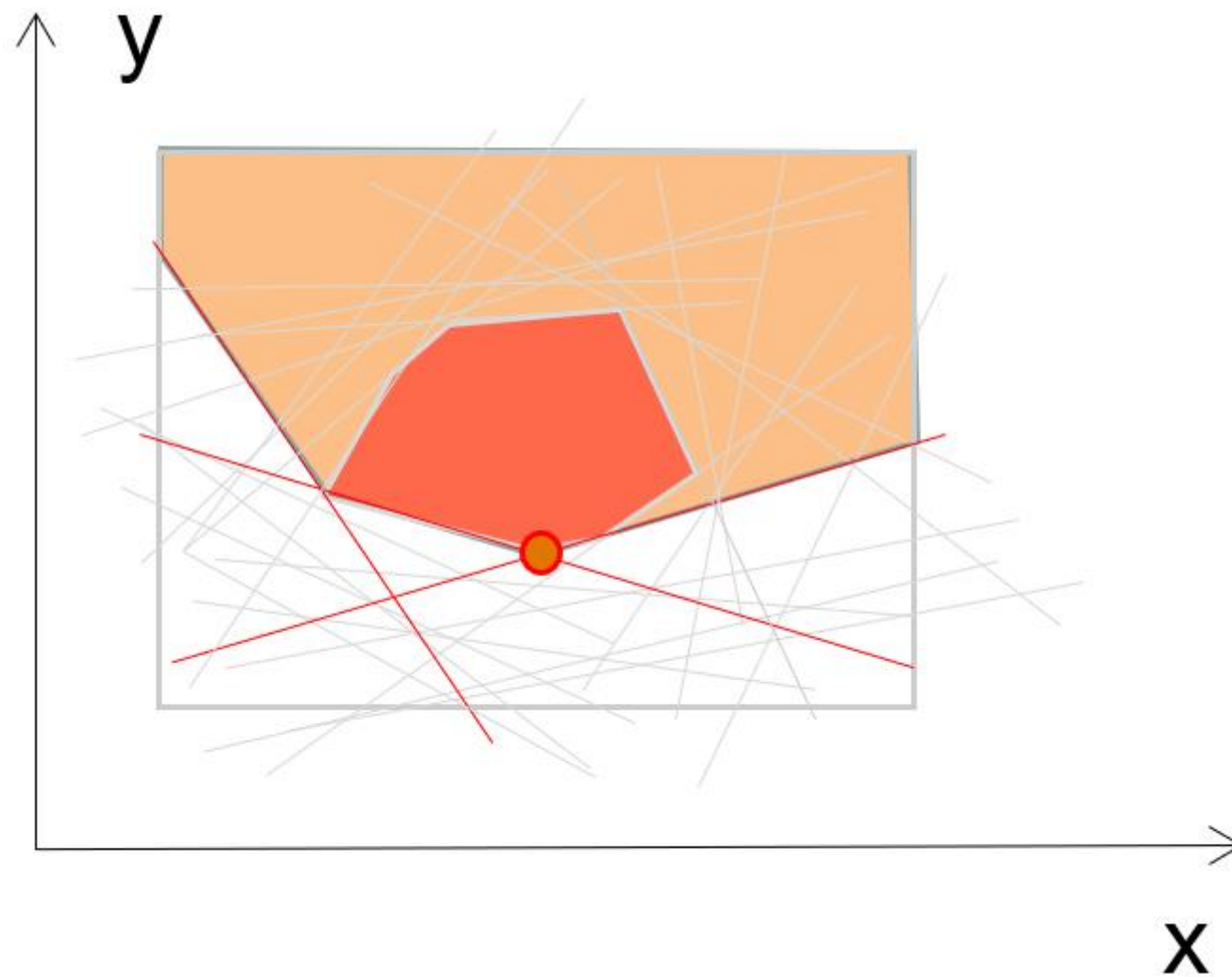


# Mais sobre restrições de segurança





## Mais sobre restrições de segurança

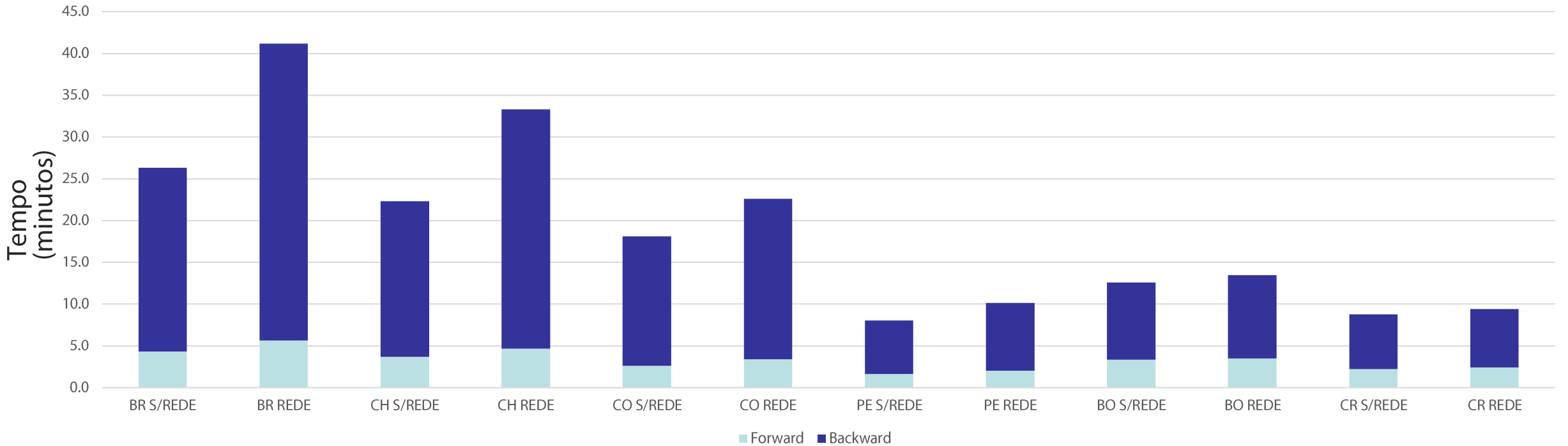


# Restrições de segurança dentro do SDDP: Estudos de caso

## Resultados de tempo computacional

	Brasil	Chile	Colombia	Peru	Bolivia	Costa Rica
Circuitos	15000	620	2500	322	450	320
Contingências	2500	520	500	214	350	250
Etapas	36	48	96	156	264	168
Series por iter	60	50	70	44	50	53
Aberturas	30	30	40	30	32	25
Blocos	3	21	5	5	5	5
Tempo (minutos)						
Sem Rede	26.3	22.3	18.1	8.0	12.6	8.8
Rede	41.2	33.3	22.6	10.1	13.5	9.4
Rede+Ctg	676.2	142.2	114.1	26.9	34.0	20.6

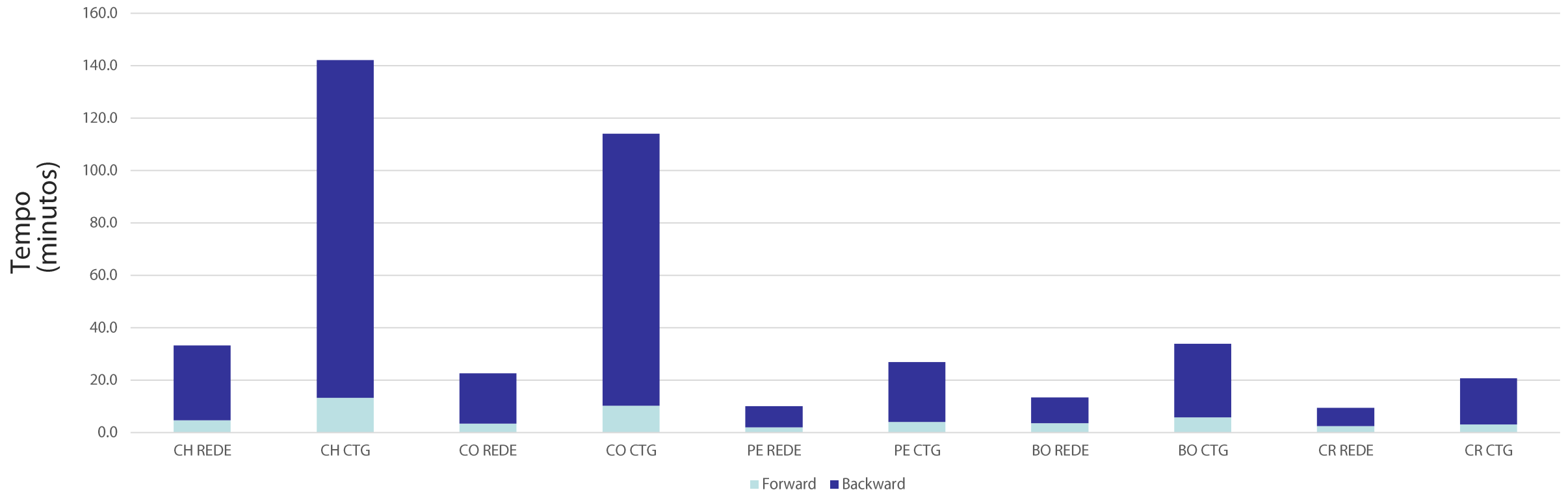
# Custo Computacional da representação de rede



	BR	CH	CO	PE	BO	CR	média
Com Rede / Sem Rede	1.57	1.49	1.25	1.26	1.07	1.07	1.28



# Custo Computacional da representação de rede com contingencias




	BR	CH	CO	PE	BO	CR	média
Com Ctg / Com Rede	16.41	4.27	5.05	2.65	2.52	2.19	5.52

**Será que podemos fazer melhor?**



# SDDP: Average Cut X Multi Cut

## ▶ Average-cut

Min  $\sum_j c_{j,1} g_{j,1}$  

s.t.

$$\sum_j g_{j,1} + \sum_i (\rho_i \times u_{i,1}) = Dem_1$$

$$g_{j,1} \leq Gmax_{j,1} \quad \forall j$$


$$u_{i,1} \leq Umax_{i,1} \quad \forall i$$

$$V_{i,2} = V_{i,1} + q_{i,1} - u_{i,1} - s_{i,1} + \sum_{k \in \Omega_i} (u_{k,1} + s_{k,1}) \quad \forall i$$

$$V_{i,2} \leq Vmax_i \quad \forall i$$

- ▶ **Menos** cortes por subproblema
- ▶ **Mais** problemas para gerar um corte

## ▶ Multi-cut

Min  $\sum_j c_{j,1} g_{j,1}$  

s.t.

$$\sum_j g_{j,1} + \sum_i (\rho_i \times u_{i,1}) = Dem_1$$

$$g_{j,1} \leq Gmax_{j,1} \quad \forall j$$

$$u_{i,1} \leq Umax_{i,1} \quad \forall i$$

$$V_{i,2} = V_{i,1} + q_{i,1} - u_{i,1} - s_{i,1} + \sum_{k \in \Omega_i} (u_{k,1} + s_{k,1}) \quad \forall i$$

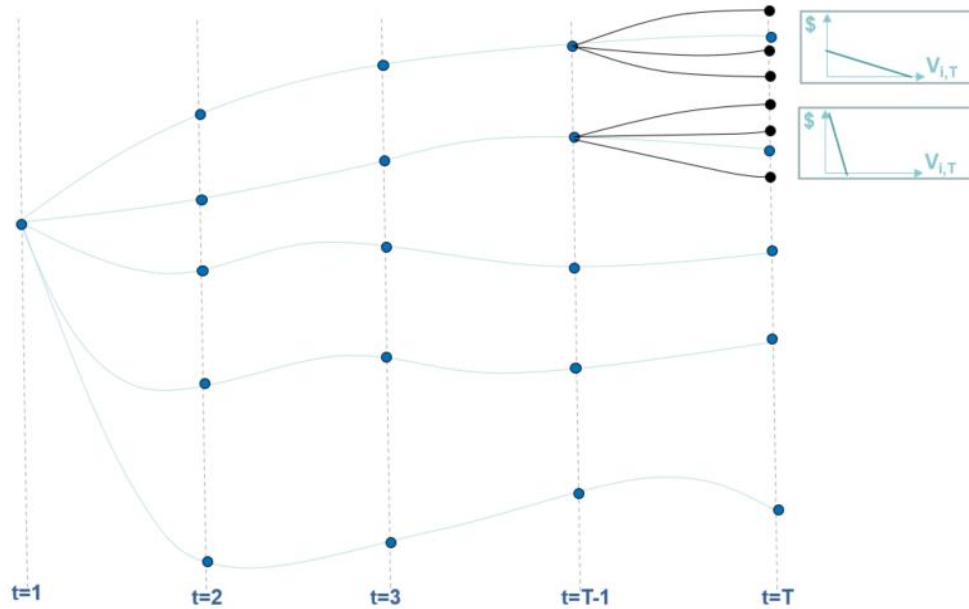
$$V_{i,2} \leq Vmax_i \quad \forall i$$

- ▶ **Mais** cortes por subproblema
- ▶ **Menos** problemas para gerar um corte
  - Melhor perspectiva de paralelização



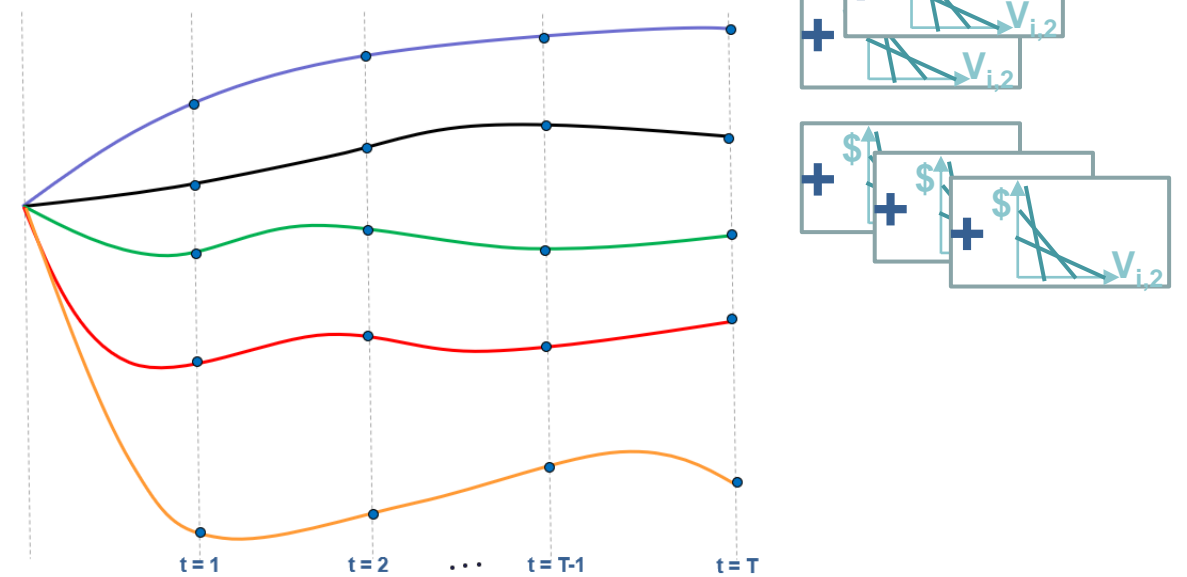
# SDDP: Average Cut X Multi Cut

## ▶ Average-cut



- ▶ **Menos** cortes por subproblema
- ▶ **Mais** problemas para gerar um corte

## ▶ Multi-cut

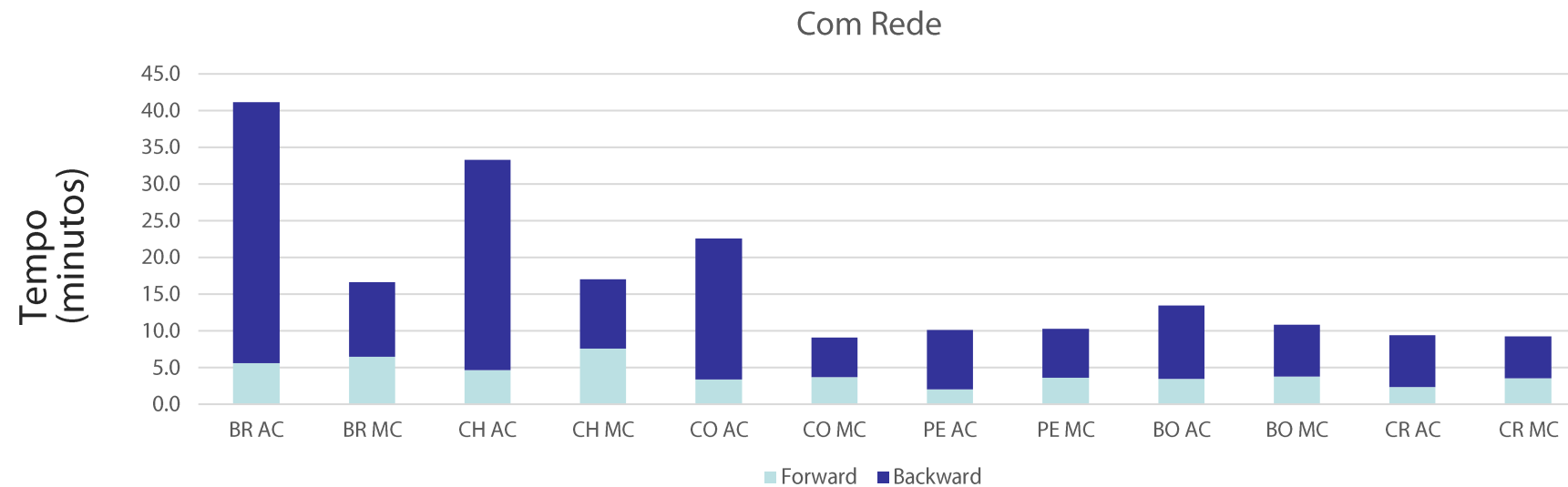
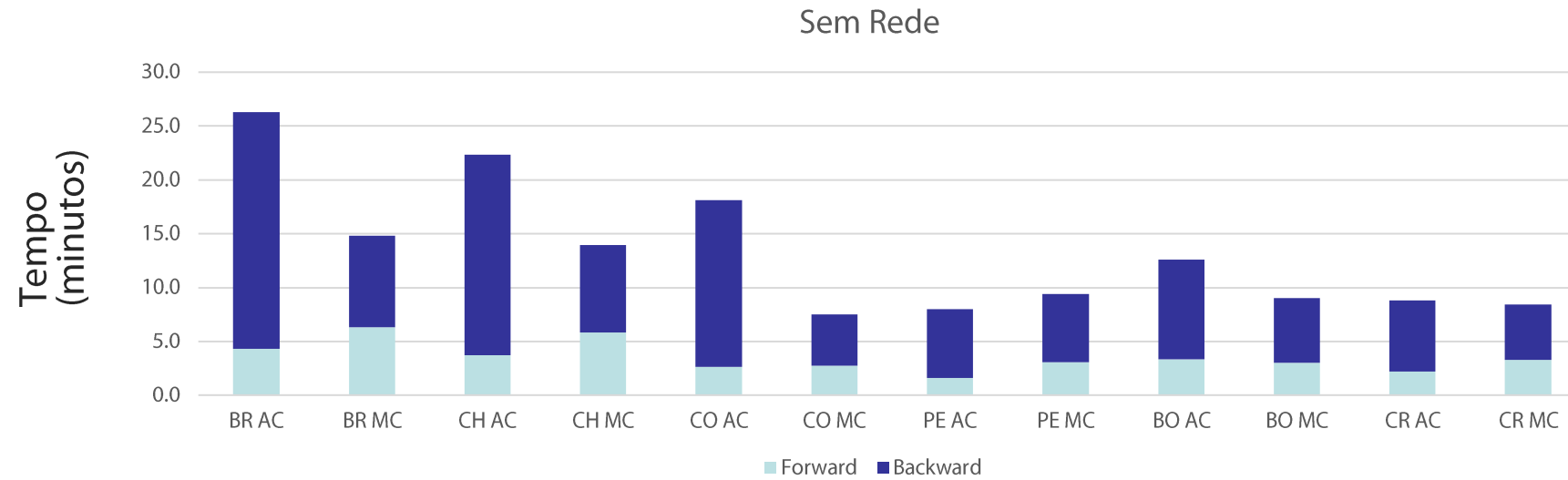


- ▶ **Mais** cortes por subproblema
- ▶ **Menos** problemas para gerar um corte
  - Melhor perspectiva de paralelização

## Restrições de segurança dentro do SDDP Multi-Cut: Estudos de caso

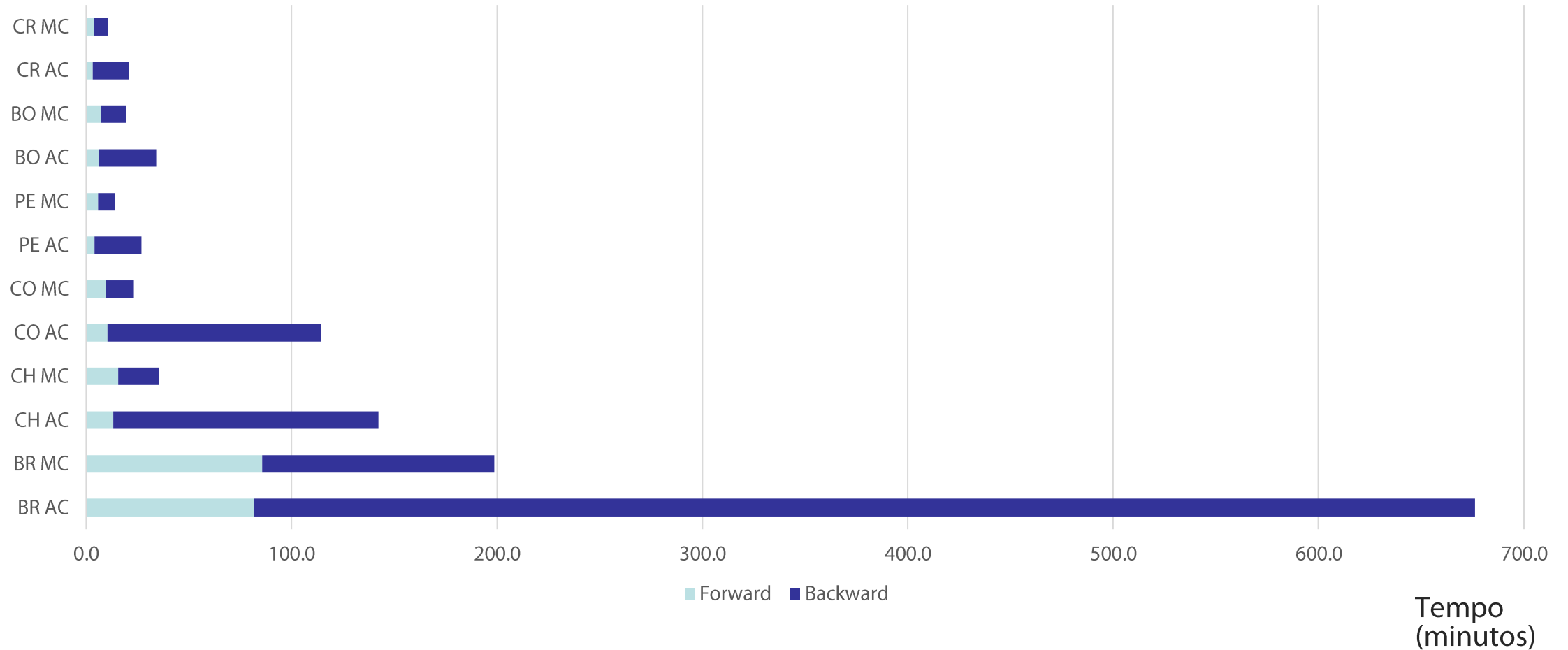
		Brasil	Chile	Colombia	Peru	Bolivia	Costa Rica		
	Circuitos	15000	620	2500	322	450	320		
	Contingências	2500	520	500	214	350	250		
	Etapas	36	48	96	156	121	168		
	Series por iter	60	50	70	44	50	53		
	Aberturas	30	30	40	30	32	25		
	Blocos	3	21	5	5	5	5		
Tempo (minutos)	Average	Sem Rede	26.3	22.3	18.1	8.0	12.6	8.8	
	Cut	Rede	41.2	33.3	22.6	10.1	13.5	9.4	
		Rede+Ctg	676.2	142.2	114.1	26.9	34.0	20.6	
		Multi	Sem Rede	14.8	13.9	7.5	9.4	9.0	8.4
	Cut	Rede	16.7	17.1	9.1	10.3	10.8	9.2	
		Rede+Ctg	198.8	35.4	23.2	14.1	19.2	10.5	Média
		Speedup	Sem Rede	1.78	1.60	2.41	0.85	1.40	1.04
	Rede		2.47	1.95	2.49	0.98	1.24	1.02	1.69
	Rede+Ctg		3.40	4.02	4.91	1.91	1.77	1.96	2.99

# Average Cut (AC) X Multi Cut (MC)



# Average Cut (AC) X Multi Cut (MC)

Com Contigências



Tempo (minutos)

## E os custos?

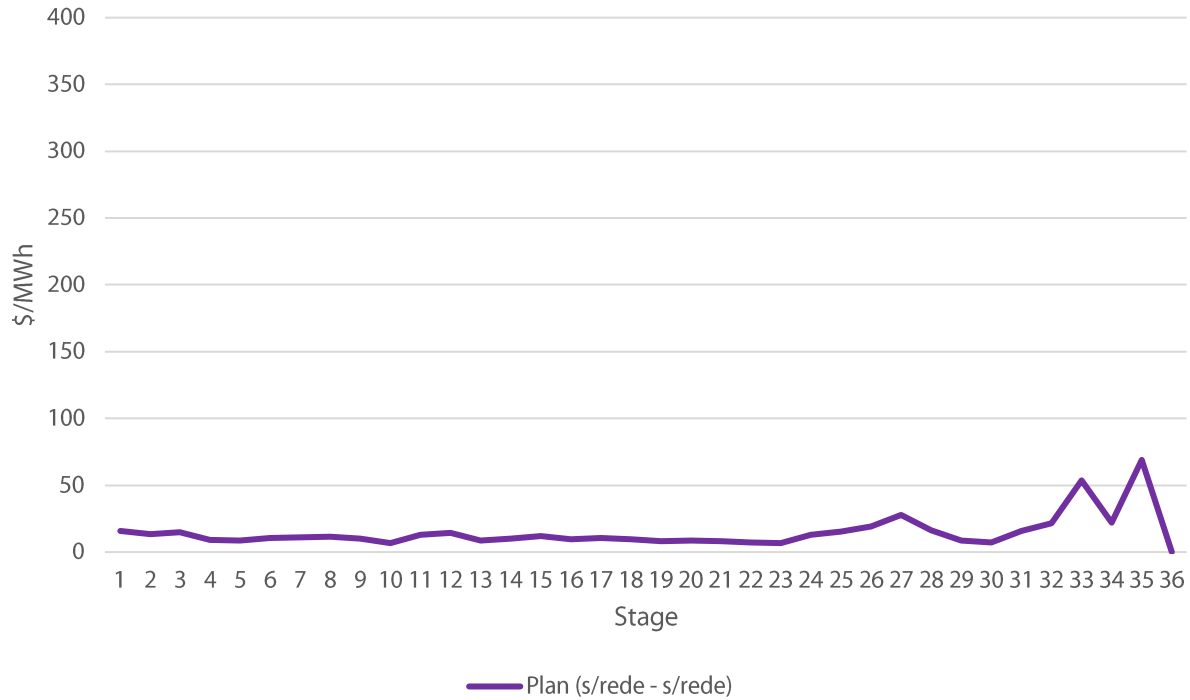
	backward	forward	Brasil	Chile	Colombia	Peru	Bolivia	Costa Rica
Planejamento	S/Rede	S/Rede	1.37E+07	2.96E+06	9.70E+06	7.48E+06	1.15E+06	2.95E+05
Implementação (Inconsistente)	S/Rede	Rede	1.56E+07	3.06E+06	9.74E+06	7.52E+06	1.22E+06	7.83E+05
Consistente	Rede	Rede	1.56E+07	3.04E+06	9.78E+06	7.50E+06	1.20E+06	4.52E+05

	backward	forward	Brasil	Chile	Colombia	Peru	Bolivia	Costa Rica
Planejamento	S/Rede	S/Rede	1.37E+07	2.96E+06	9.70E+06	7.48E+06	1.15E+06	2.95E+05
Implementação (Inconsistente) 1	S/Rede	N-1	2.40E+07	5.89E+06	1.02E+07	2.10E+07	2.94E+06	7.21E+05
Implementação (Inconsistente) 2	Rede	N-1	2.37E+07	5.89E+06	1.03E+07	2.06E+07	2.88E+06	7.03E+05
Consistente	N-1	N-1	1.95E+07	5.83E+06	1.00E+07	1.55E+07	1.74E+06	6.54E+05

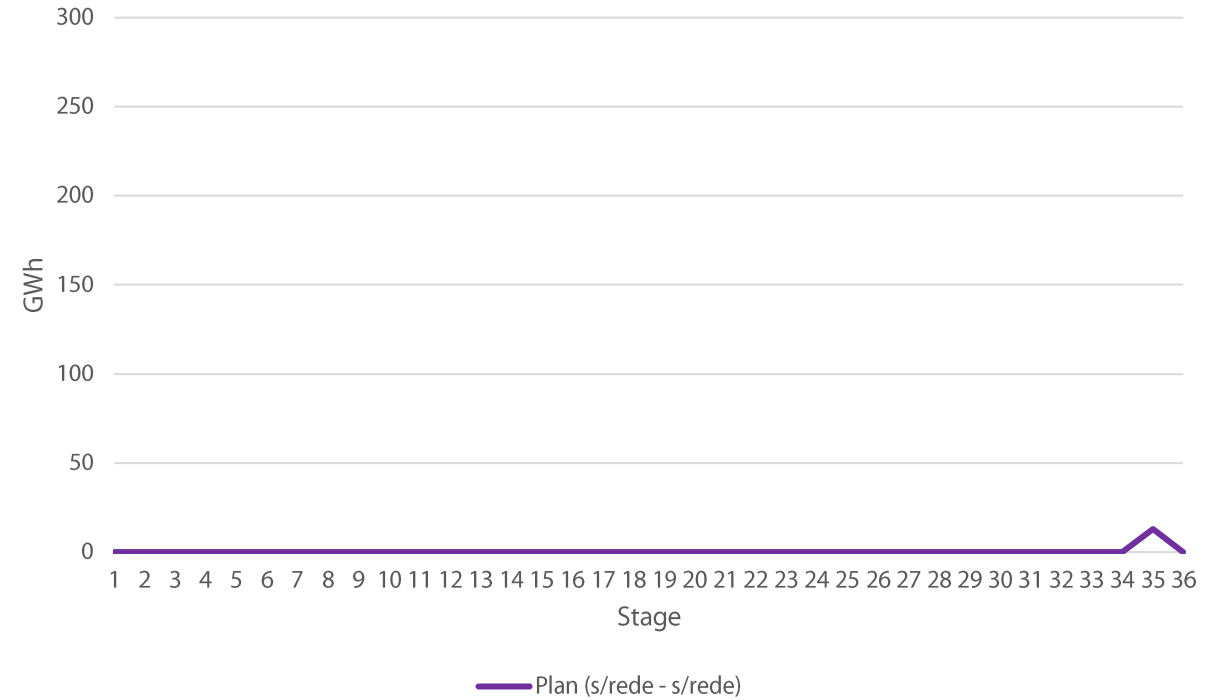


# Brasil

Marginal Cost - Avg



Deficit - Avg

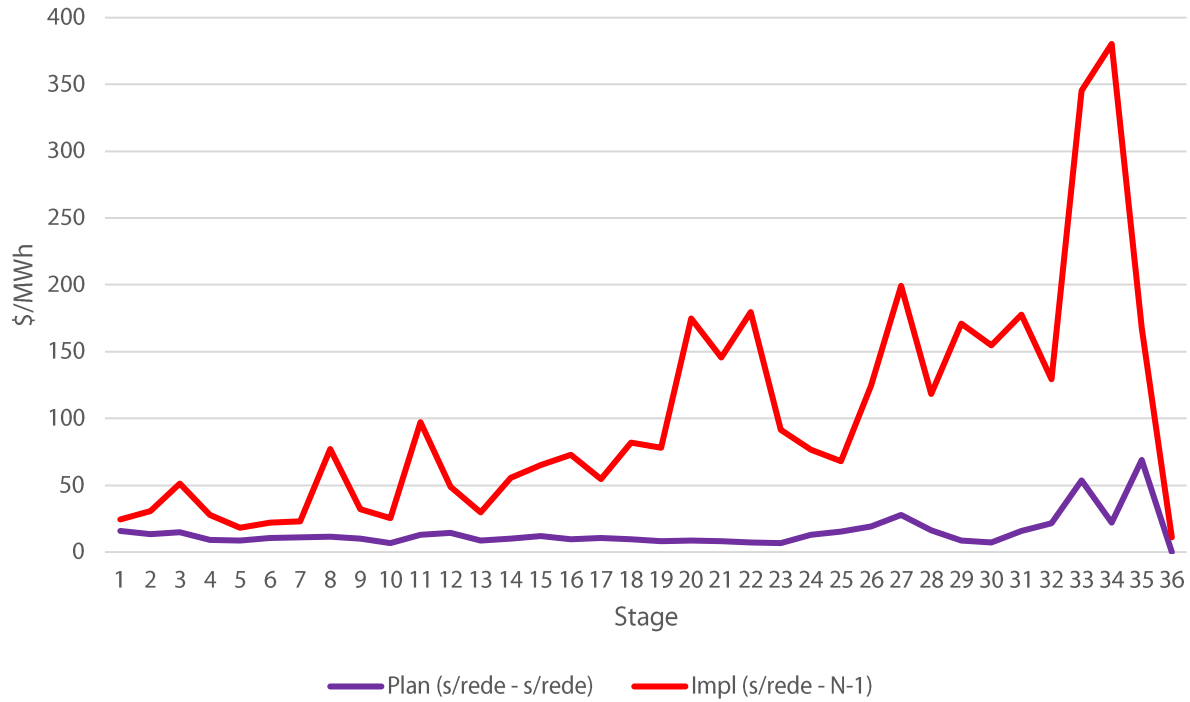


## Implementação

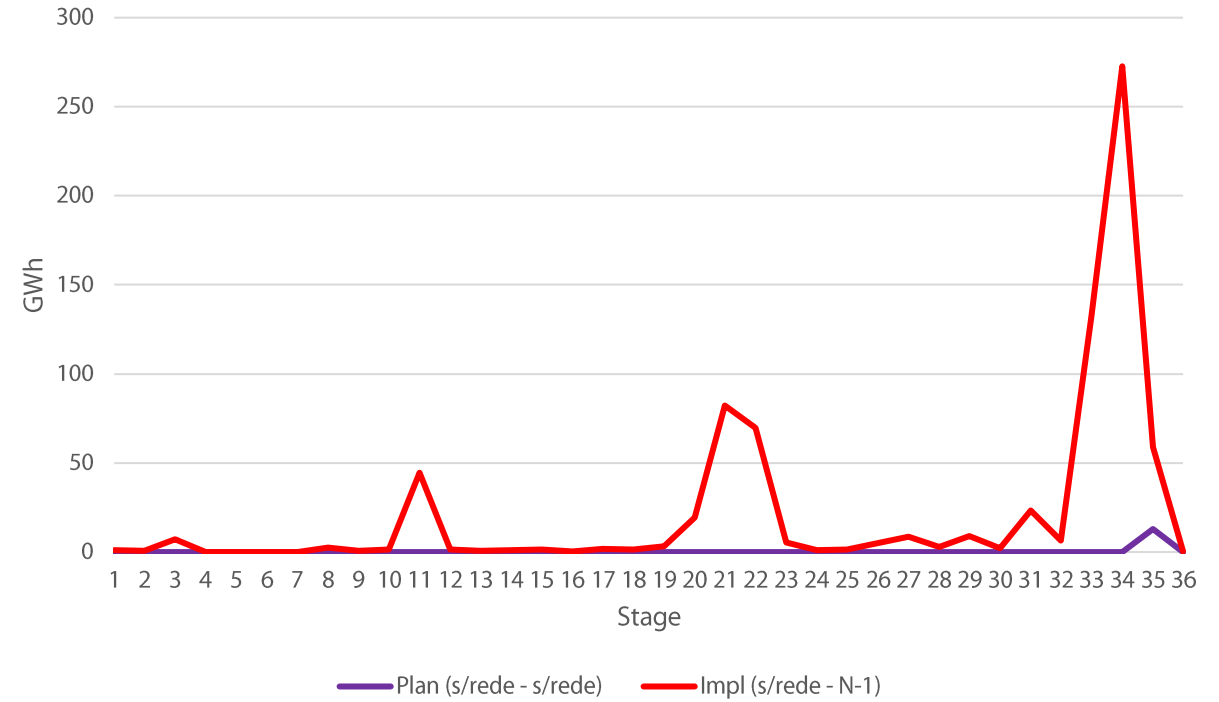
		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	1.37E+07	1.56E+07	2.40E+07
	Rede		1.56E+07	2.37E+07
	N-1			1.95E+07

# Brasil

Marginal Cost - Avg



Deficit - Avg

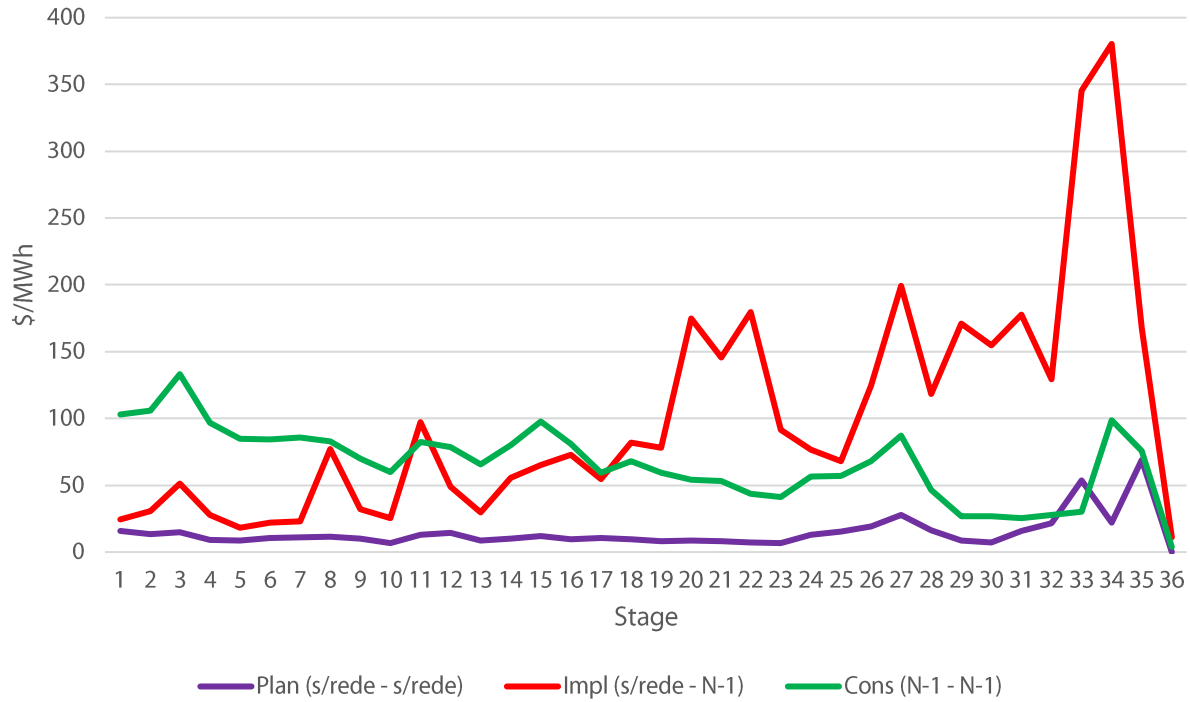


## Implementação

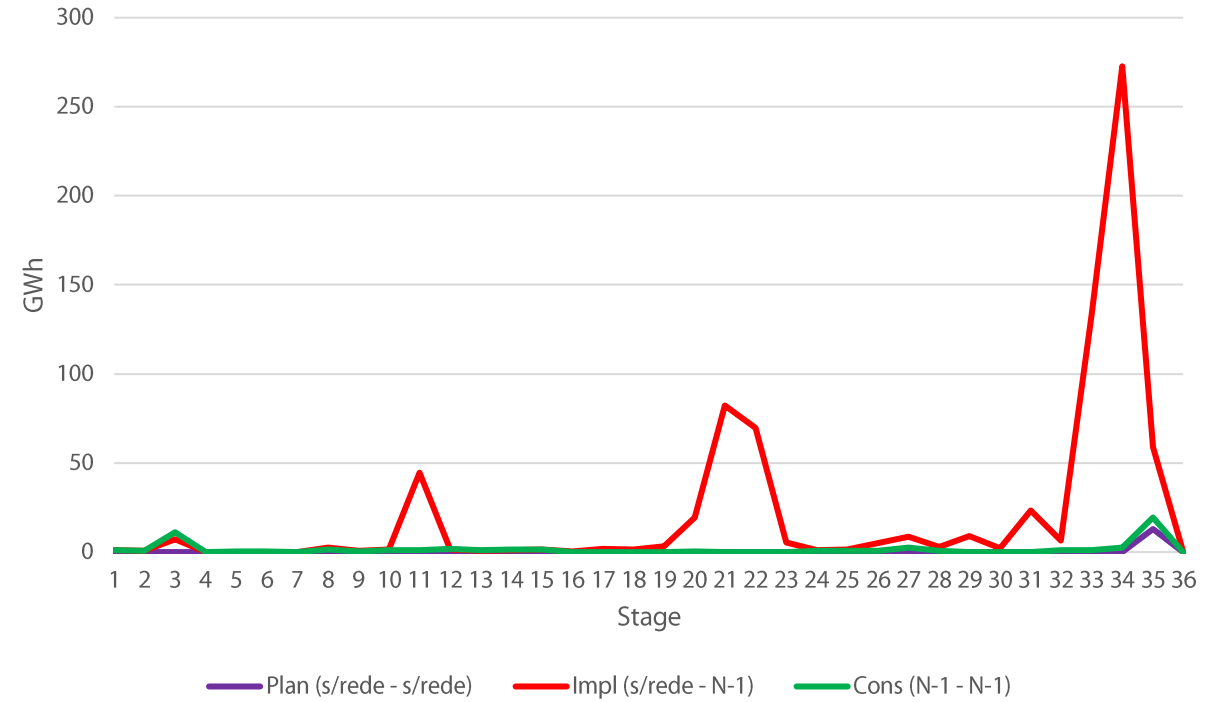
		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	1.37E+07	1.56E+07	2.40E+07
	Rede		1.56E+07	2.37E+07
	N-1			1.95E+07

# Brasil

Marginal Cost - Avg



Deficit - Avg

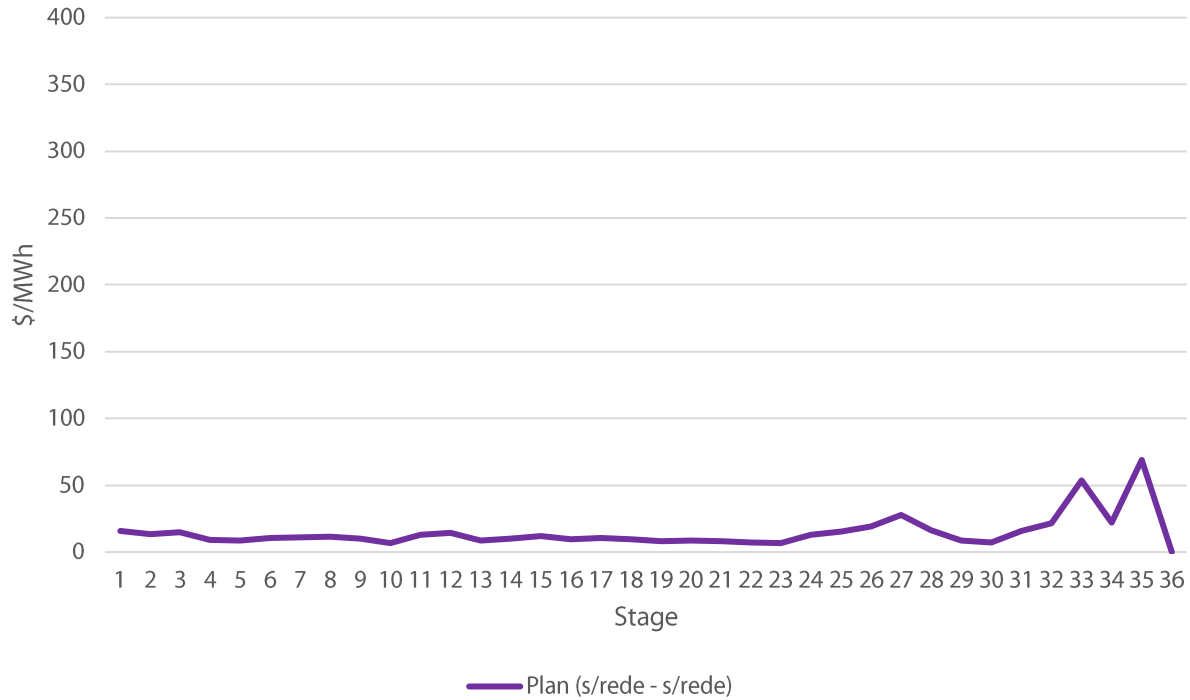


## Implementação

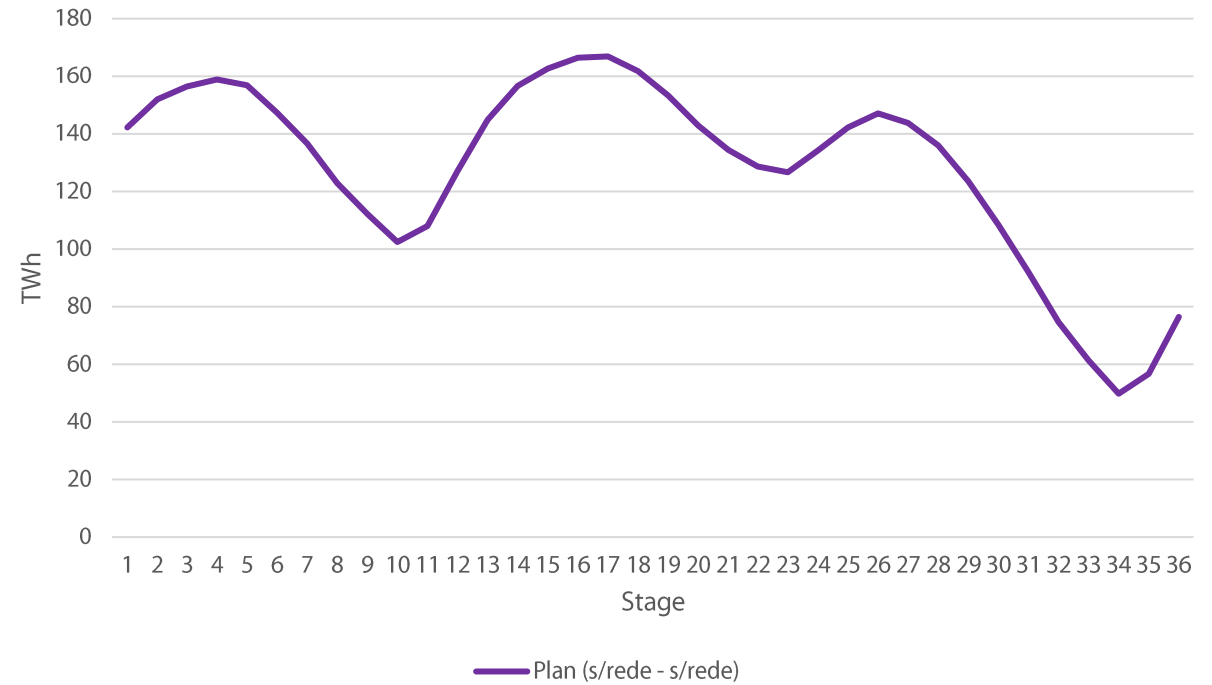
		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	1.37E+07	1.56E+07	2.40E+07
	Rede		1.56E+07	2.37E+07
	N-1			1.95E+07

# Brasil

Marginal Cost - Avg



Energia Armazenada - Avg

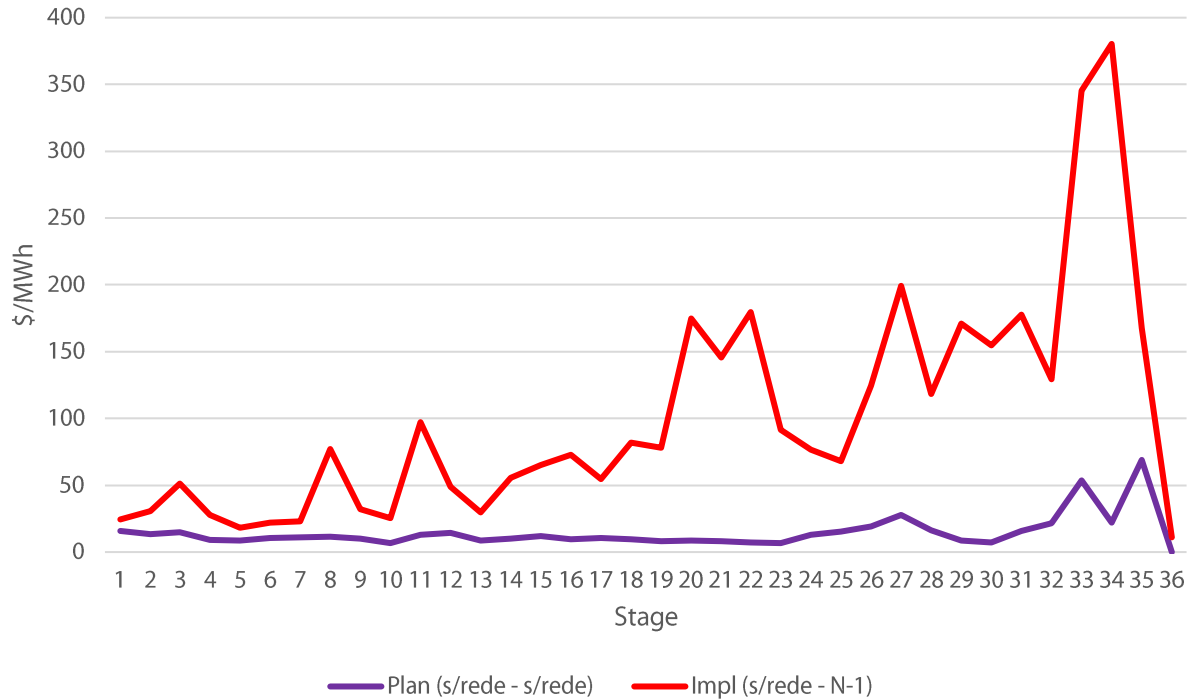


## Implementação

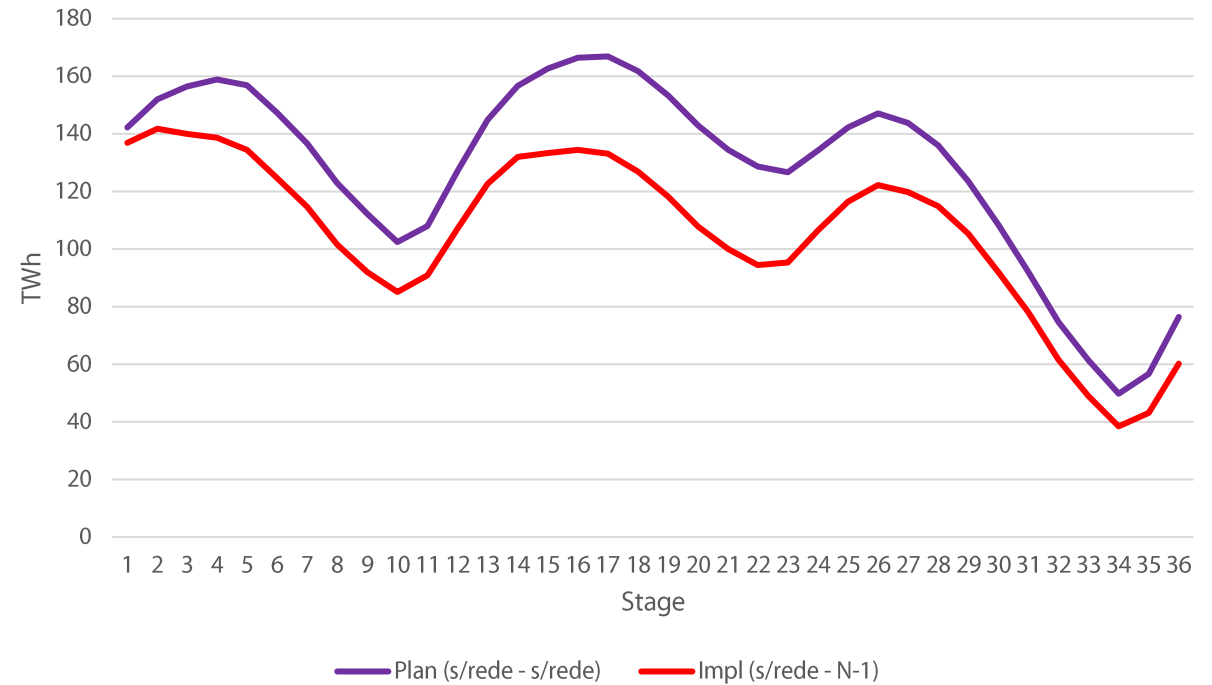
		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	1.37E+07	1.56E+07	2.40E+07
	Rede		1.56E+07	2.37E+07
	N-1			1.95E+07

# Brasil

Marginal Cost - Avg



Energia Armazenada - Avg



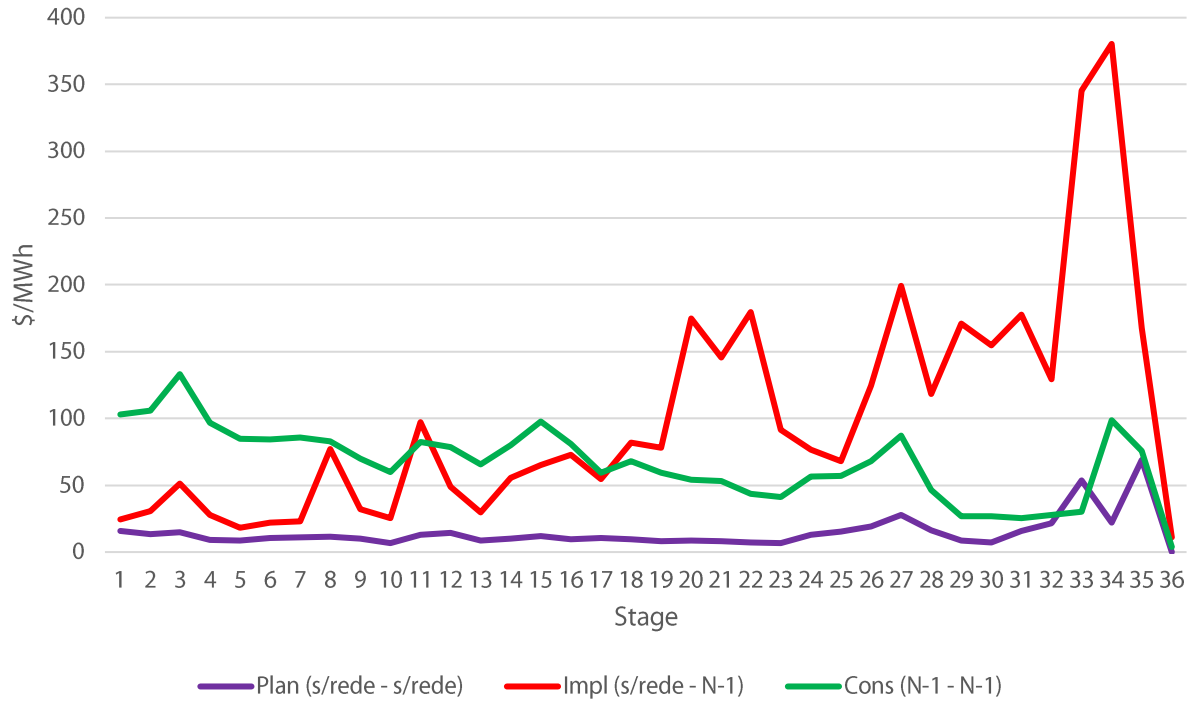
## Implementação

		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	1.37E+07	1.56E+07	2.40E+07
	Rede		1.56E+07	2.37E+07
	N-1			1.95E+07

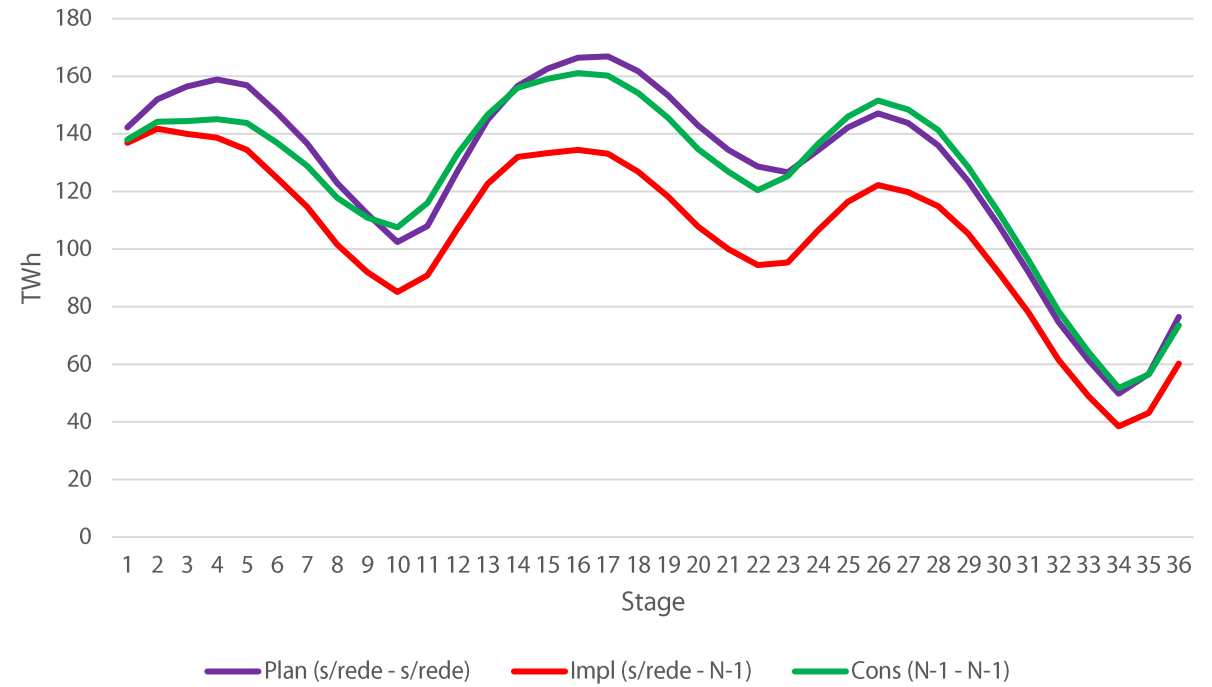


# Brasil

Marginal Cost - Avg



Energia Armazenada - Avg

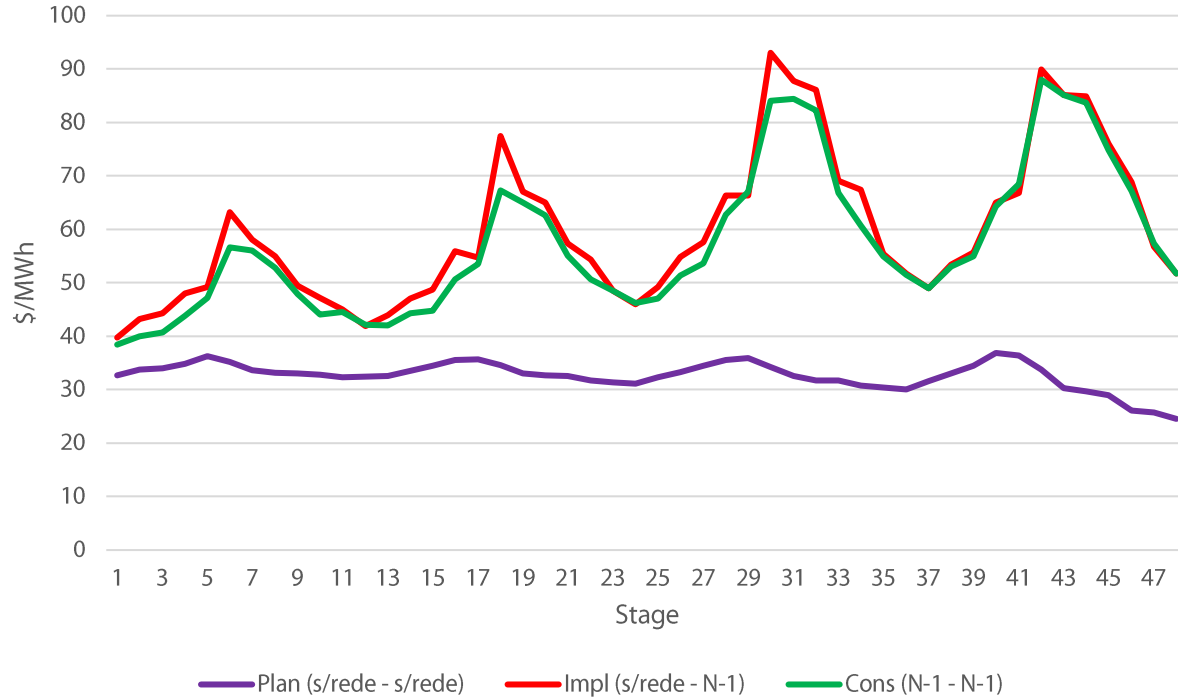


## Implementação

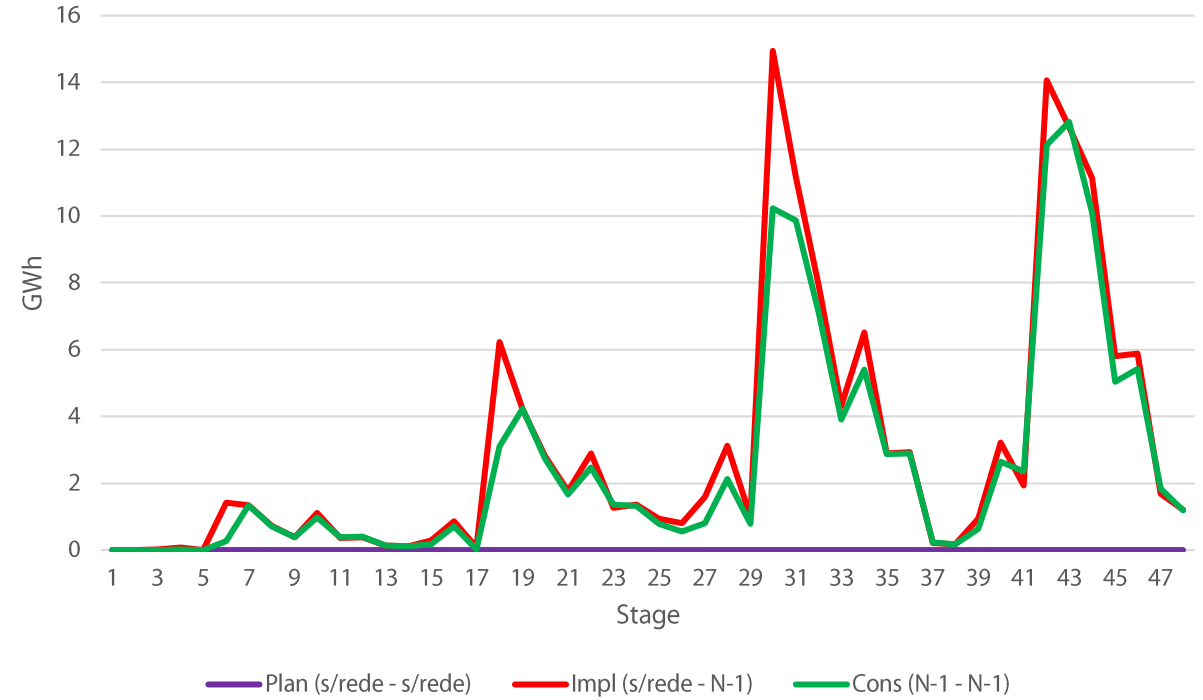
		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	1.37E+07	1.56E+07	2.40E+07
	Rede		1.56E+07	2.37E+07
	N-1			1.95E+07

# Chile

Marginal Cost - Avg



Deficit - Avg

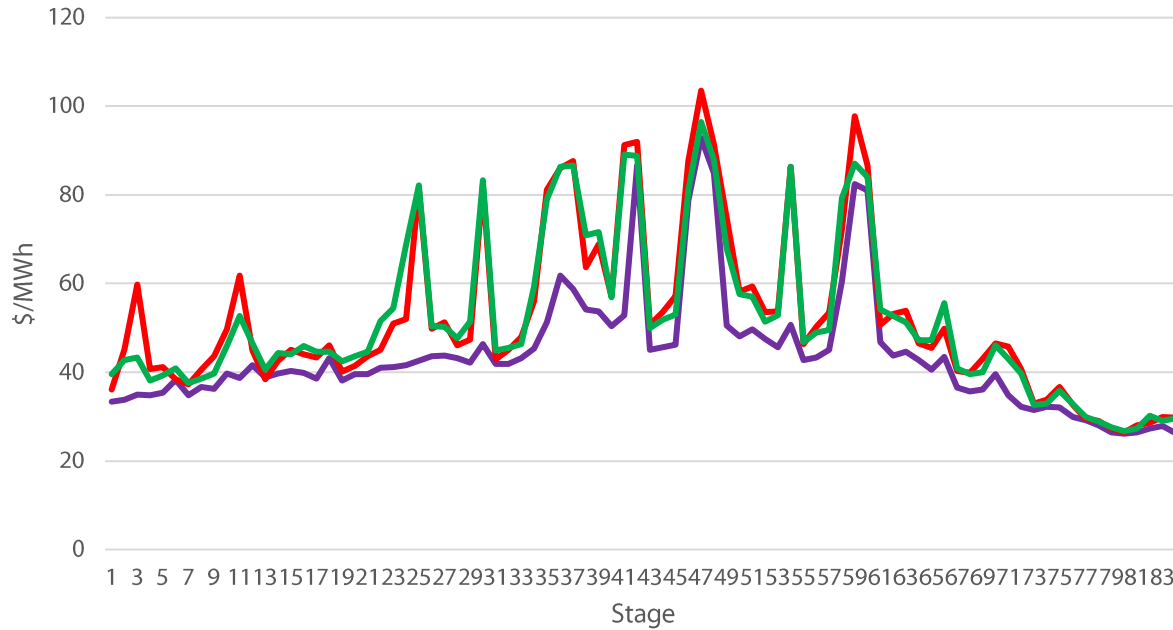


## Implementação

		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	2.96E+06	3.06E+06	5.89E+06
	Rede		3.04E+06	5.89E+06
	N-1			5.83E+06

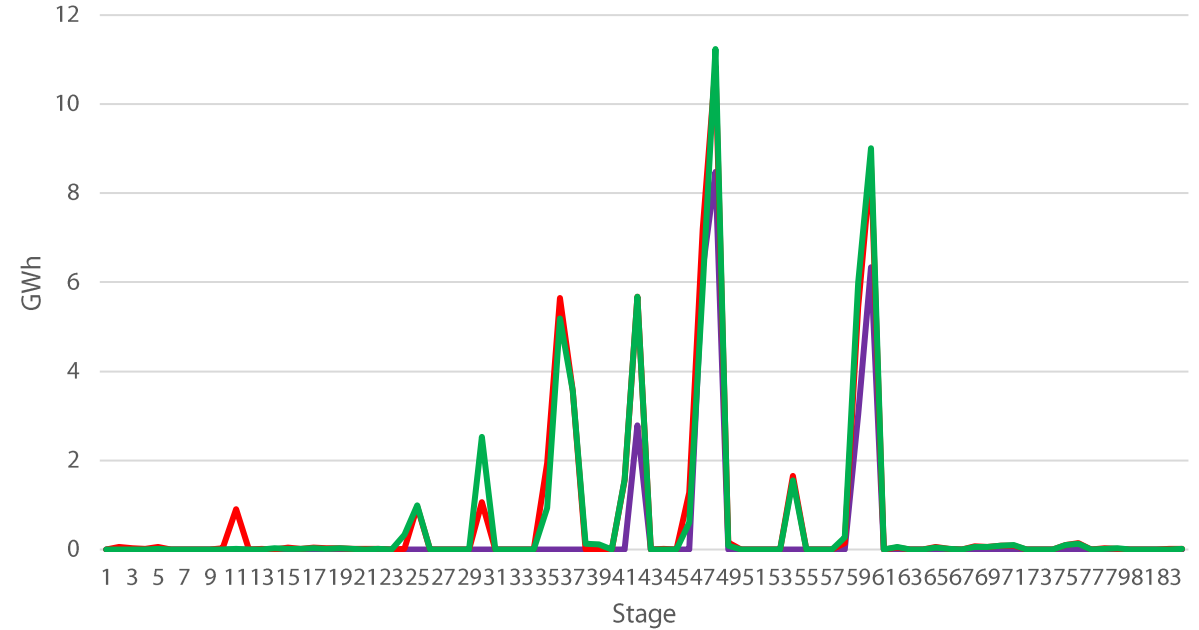
# Colômbia

Marginal Cost - Avg



— Plan (s/rede - s/rede) — Impl (s/rede - N-1) — Cons (N-1 - N-1)

Deficit- Avg



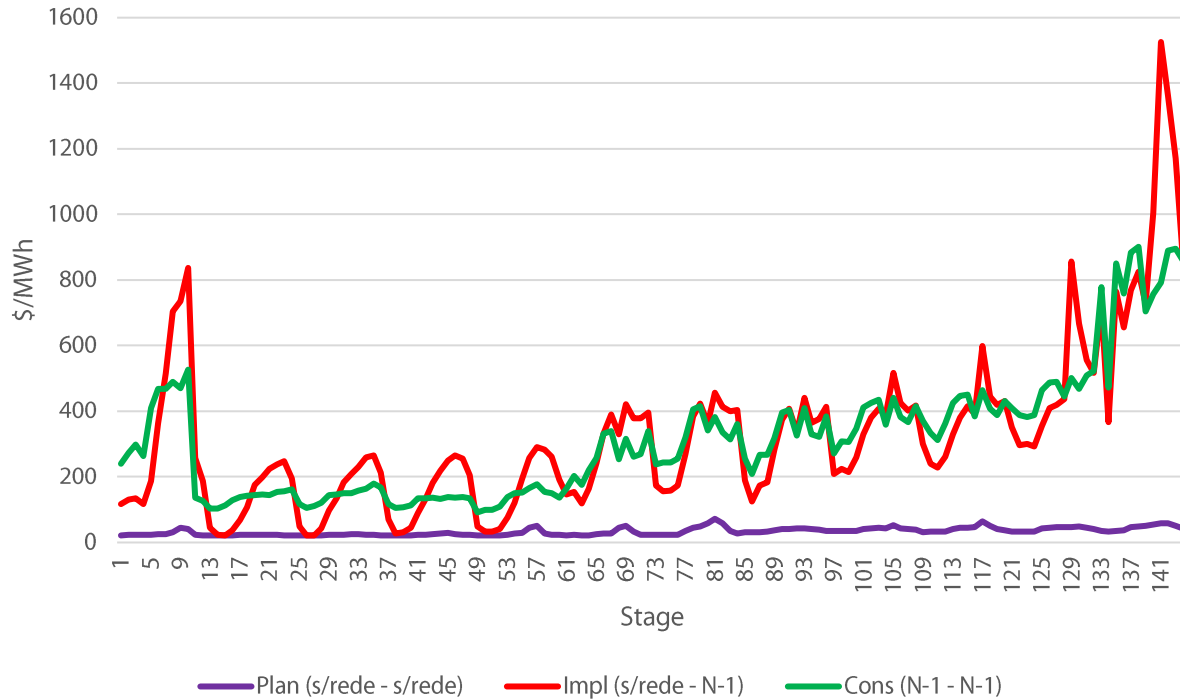
— Plan (s/rede - s/rede) — Impl (s/rede - N-1) — Cons (N-1 - N-1)

## Implementação

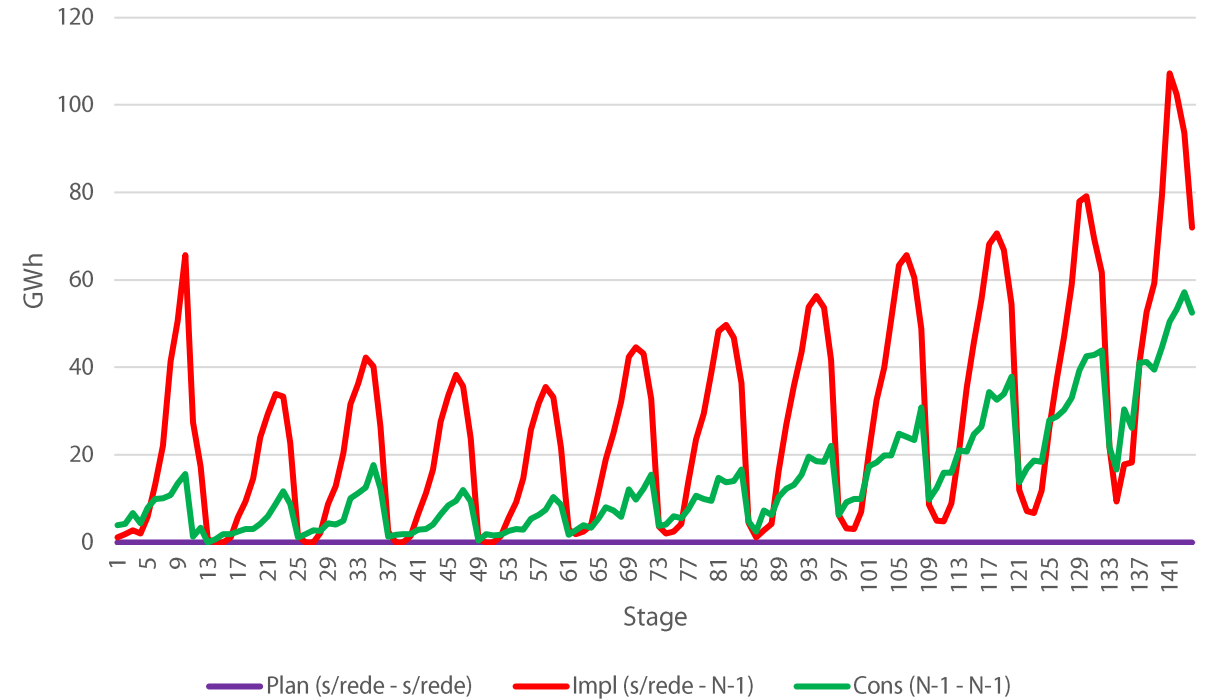
		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	9.70E+06	9.74E+06	1.02E+07
	Rede		9.78E+06	1.03E+07
	N-1			1.00E+07

# Peru

Marginal Cost - Avg



Deficit - Avg

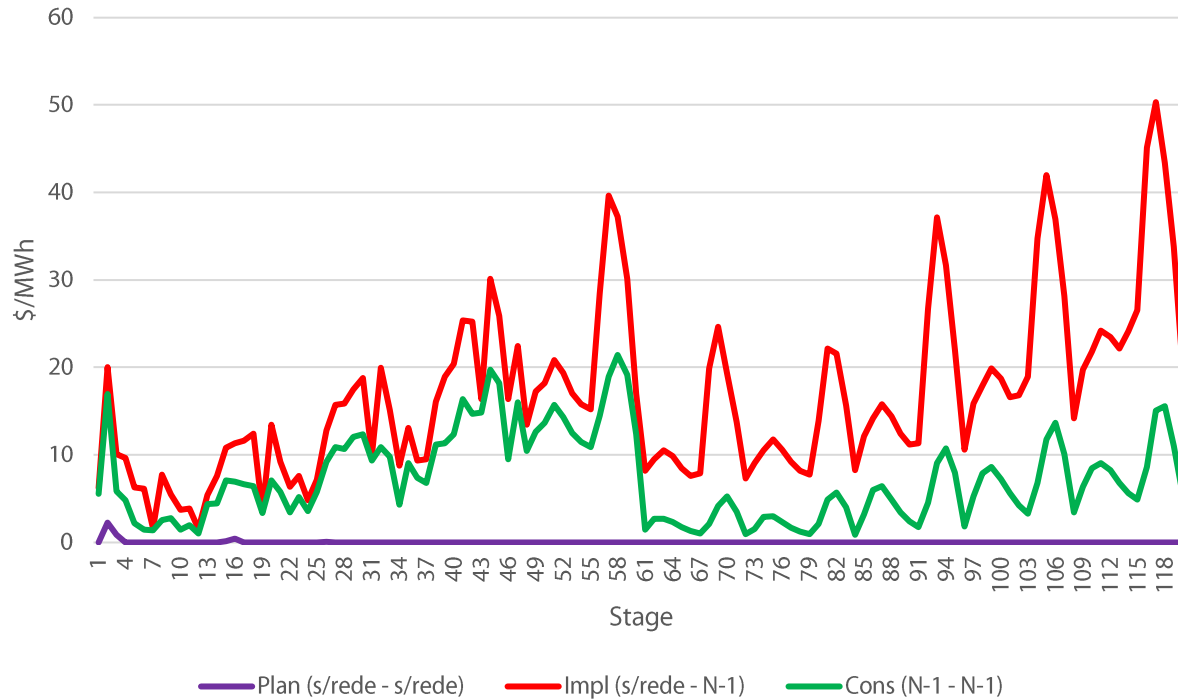


## Implementação

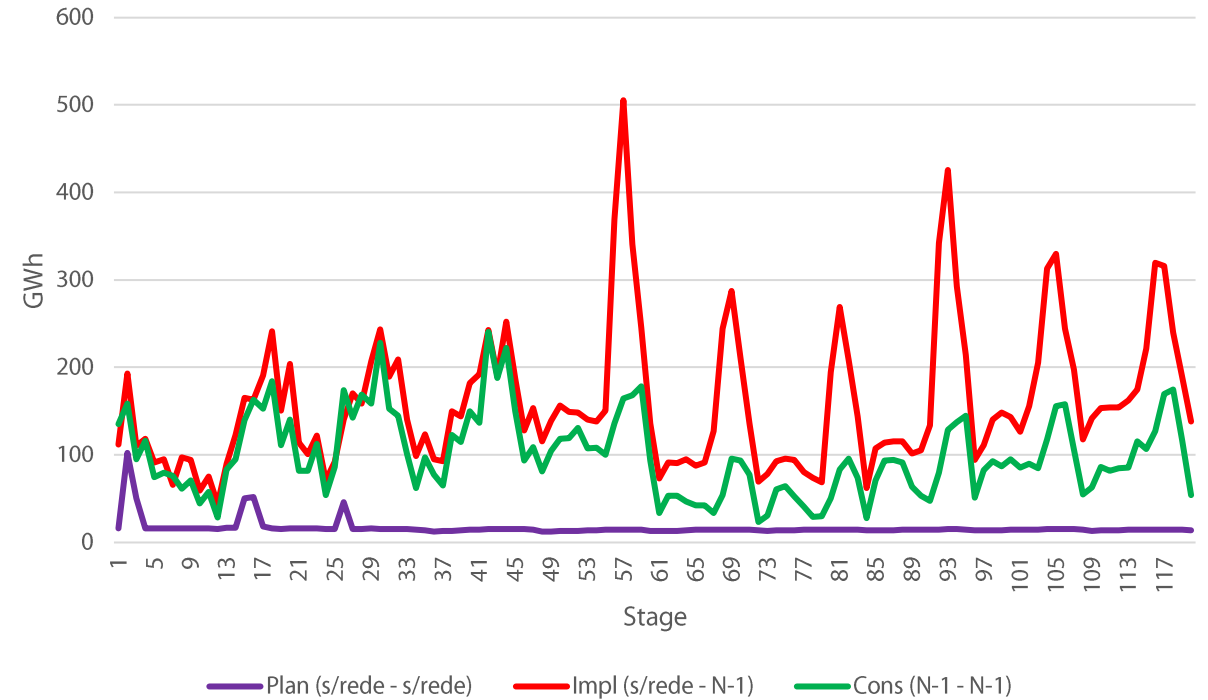
		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	7.48E+06	7.52E+06	2.10E+07
	Rede		7.50E+06	2.06E+07
	N-1			1.55E+07

# Bolivia

Marginal Cost - Avg



Deficit - Avg



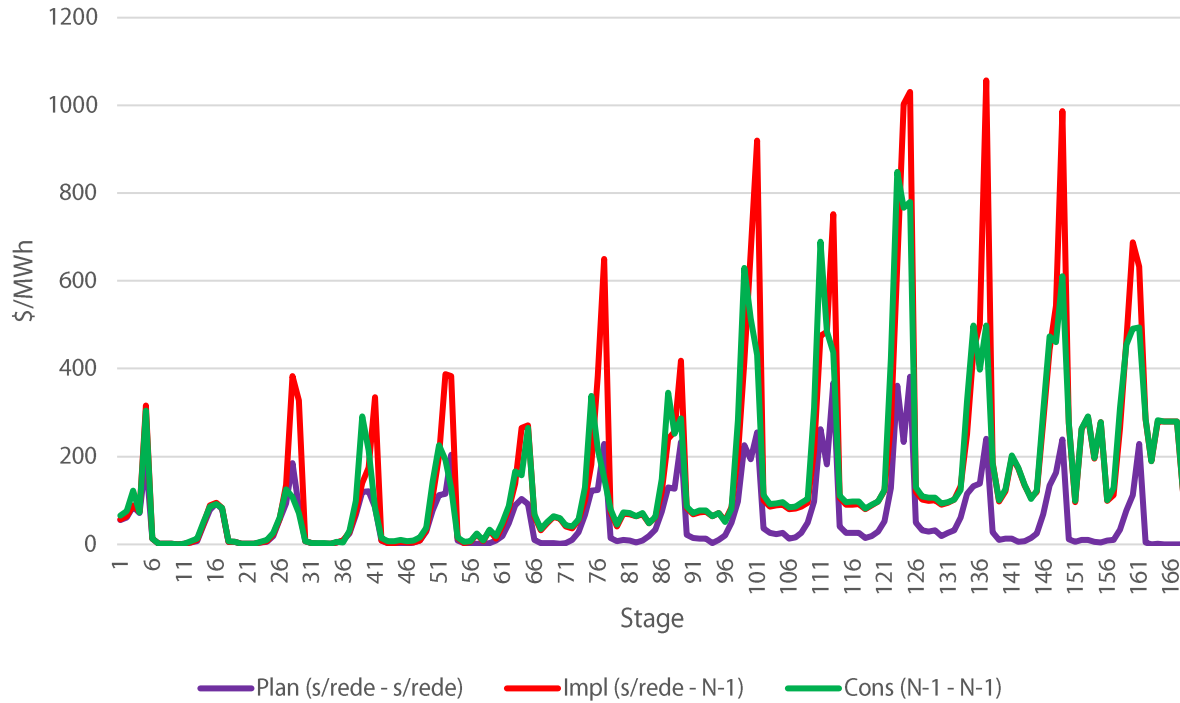
## Implementação

		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	1.15E+06	1.22E+06	2.94E+06
	Rede		1.20E+06	2.88E+06
	N-1			1.74E+06

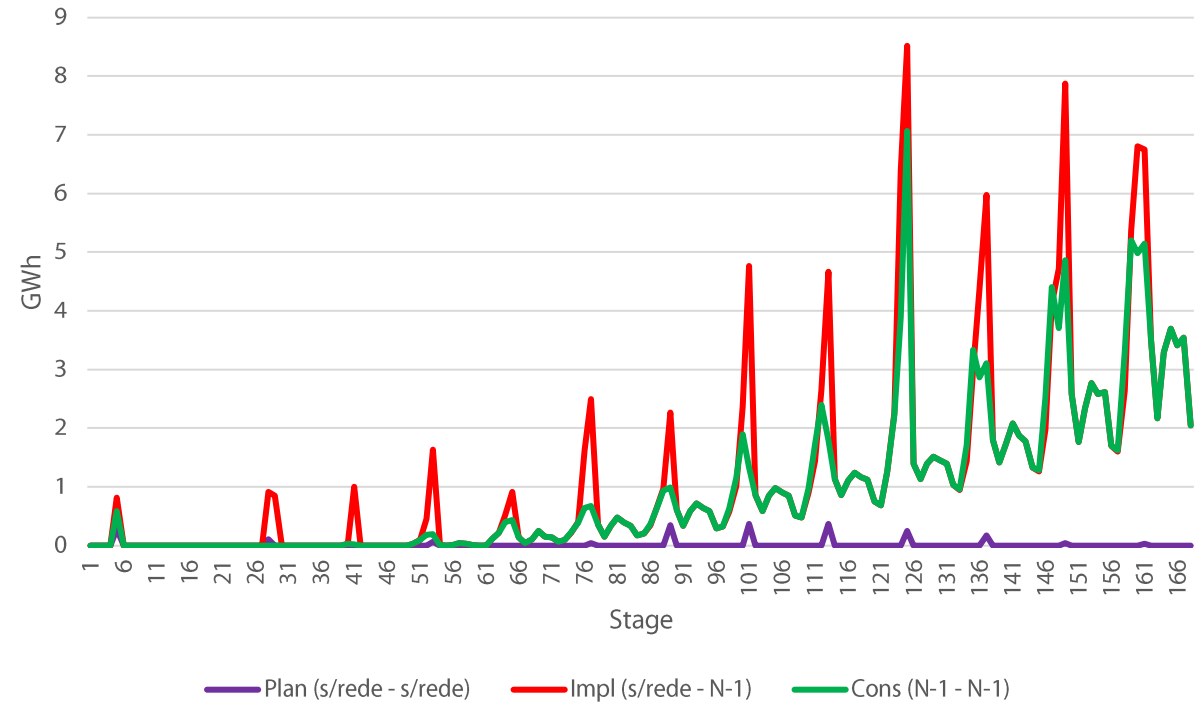


# Costa Rica

Marginal Cost - Avg



Deficit - Avg

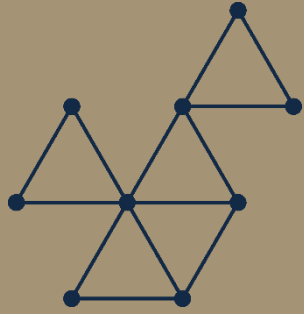


## Implementação

		S/Rede	Rede	N-1
Plano	S/Rede	2.95E+05	7.83E+05	7.21E+05
	Rede		4.52E+05	7.03E+05
	N-1			6.54E+05

## Conclusões

- ▶ Pode haver diferenças significativas entre as etapas de planejamento e simulação
  - Essas diferenças e efeitos devem ser estudados e possivelmente incorporadas
  - “No regulation without simulation!”, nada de inventar regras sem simular o que pode ocorrer
- ▶ E como podemos simular?
  - Encarando desafios e buscando técnicas novas (e vintage)
  - Por exemplo,
    - Tratamento adequado de restrições e de rede e de restrições de segurança
    - Aproveitar recursos computacionais disponíveis como paralelização
    - Modificações na implementação tradicional do SDDP como uso de Multi-Cut



 [www.psr-inc.com](http://www.psr-inc.com)

 [psr@psr-inc.com](mailto:psr@psr-inc.com)

 +55 21 3906-2100

---

 [/psrenergy](https://www.facebook.com/psrenergy)

 [@psrenergy](https://twitter.com/psrenergy)

 [@psrenergy](https://www.instagram.com/psrenergy)

# Obrigado

