

# Modelos para o Planejamento da Operação de Curto Prazo do Sistema Elétrico Brasileiro

**Prof. Fernanda da Serra Costa**  
**Depto. Estatística - IME**

27 de março de 2025, 18h00 – 19h00  
Sala RAV62, 6º andar, Bloco F

## Projeto de Extensão

Transição energética: vantagens e desafios técnicos das energias renováveis para o equilíbrio entre custos, segurança e mudanças climáticas



**Departamento de  
Estatística**

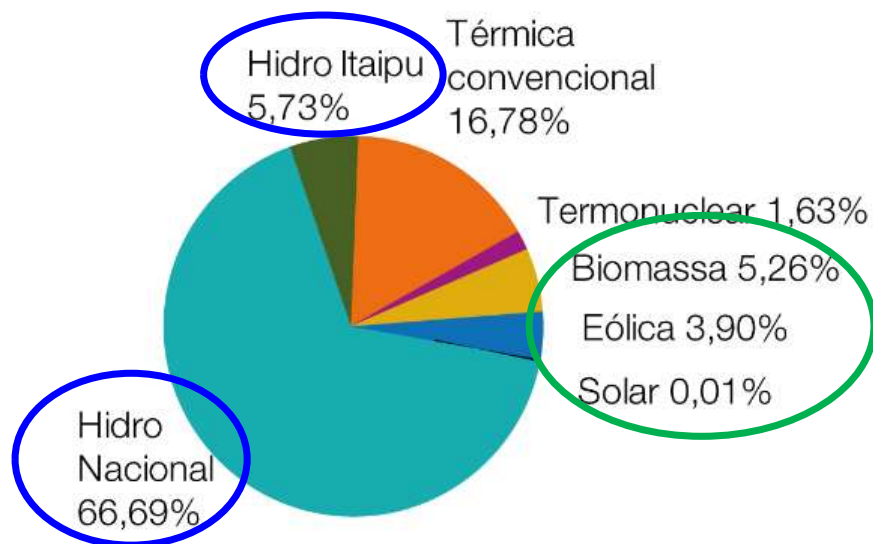


**ELE**  
**Depto. de Eng. Elétrica**



# Matriz Elétrica – Capacidade Instalada 2014

(%)



**Renováveis 2014:  $\approx$  90 GW (  $\approx$  80%)**

Fonte: [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)

(MW)

	MW	%	
Hidro Nacional	81.435,0	66,69%	72,43%
Hidro Itaipu	7.000,0	5,73%	
Térmica convencional	20.484,0	16,78%	
Termonuclear	1.990,0	1,63%	
Biomassa	6.428,0	5,26%	
Eólica	4.759,0	3,90%	
Solar	8,0	0,01%	
<b>Total</b>	<b>122.104,0</b>	<b>100,00%</b>	

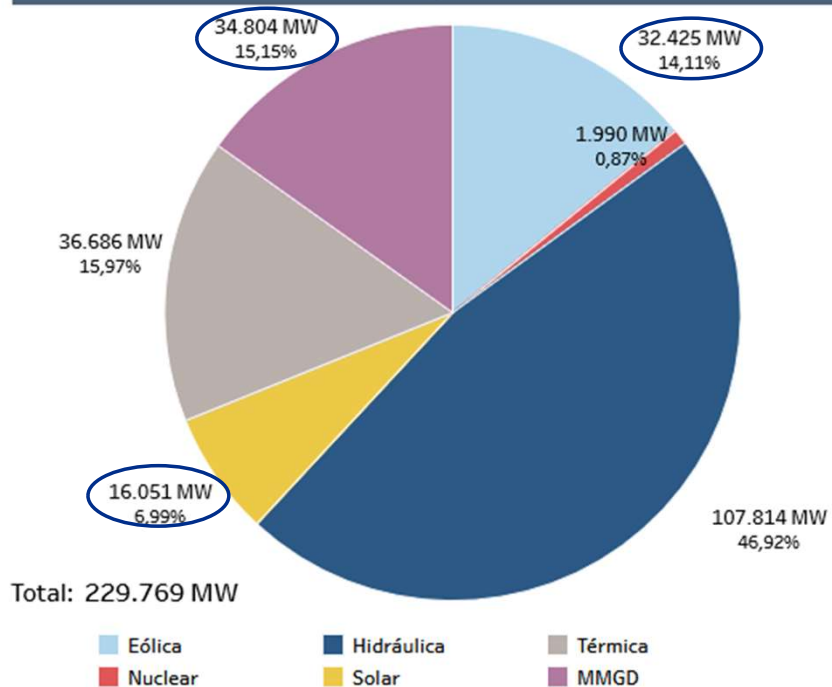
Dados referentes a 31/12/2014.

## ENERGY SOURCES

		2014		
Hidráulica	Reservatório	43.054	PCHs	5.479
	Fio	32.902	Biomassa	6.428
	TOTAL	75.956	Eólicas	4.759
Térmica com CVU	Nuclear	1.990	Solar	8
	GN	10.921	Itaipu 60 Hz (Brasil)	7.000
	GNL	704	Capacidade Instalada	122.104
	Carvão	3.210	Compras Itaipu	5.940
	Óleo	3.745	TOTAL	128.044
	Diesel	883		
	Outros	1.021		
	TOTAL	22.474		

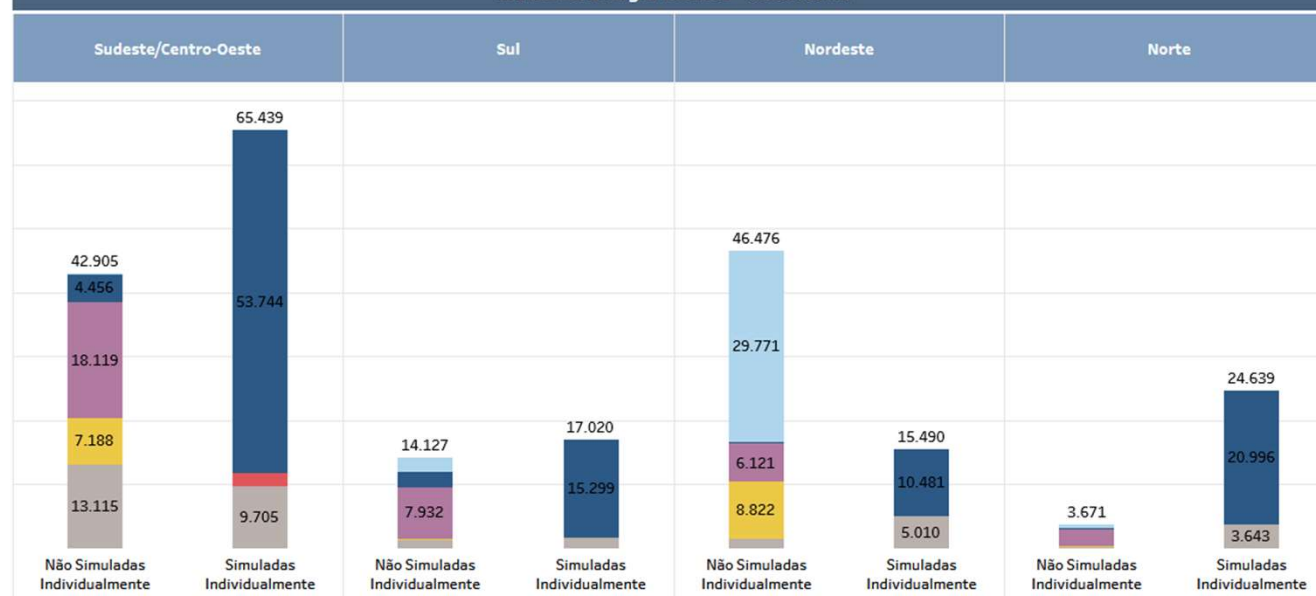
# Matriz Elétrica – Capacidade Instalada 2024

Matriz de Energia Elétrica – Fonte



**Renováveis: 2024 – ≈204 GW (≈ 91%)**

Matriz de Energia Elétrica - Subsistema



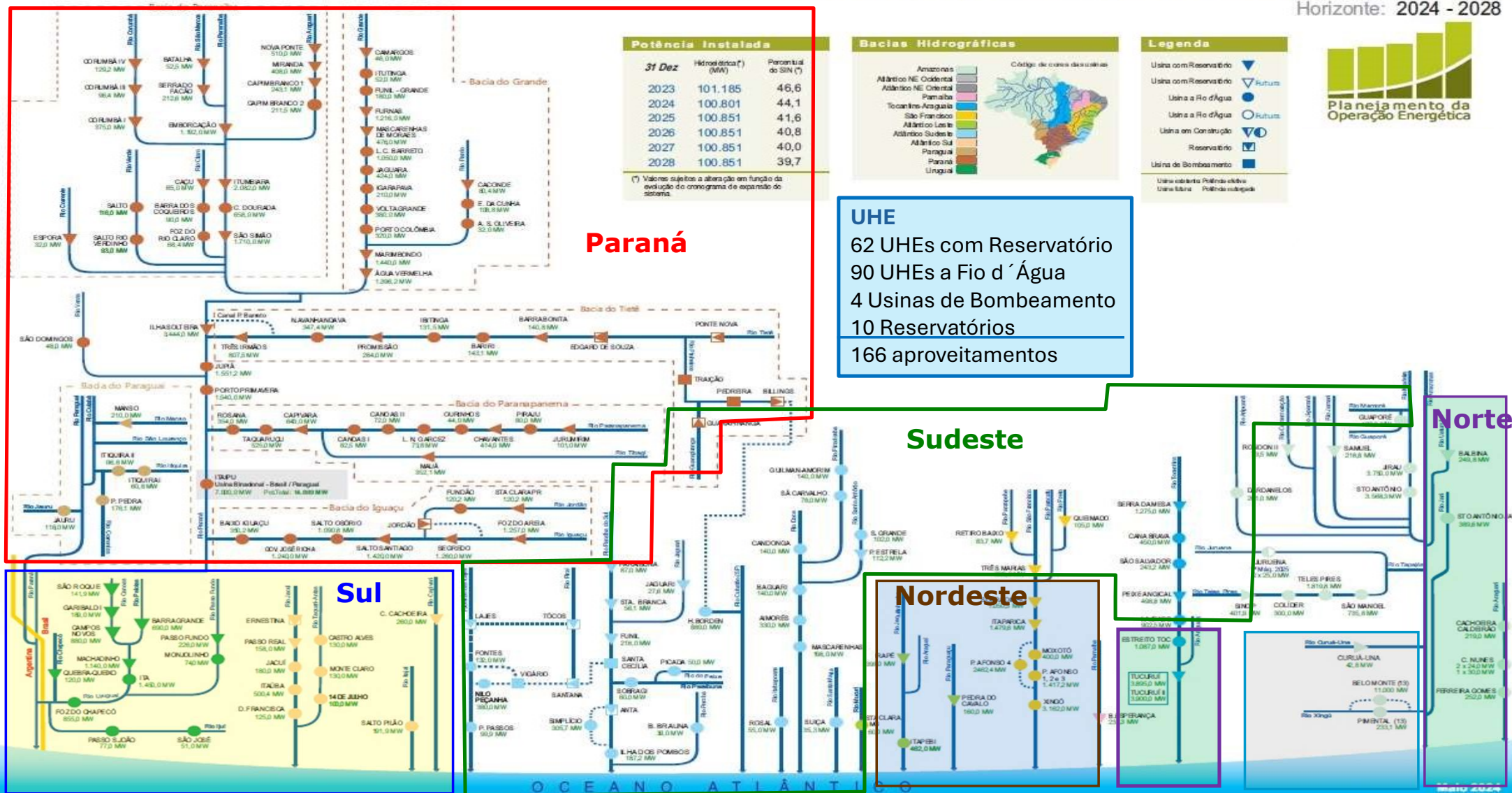
**Renováveis: 2024 – ≈204 GW (≈ 91%)**  
**2028 – ≈232 GW (≈ 93%)**

Fonte: [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)

# Diagrama Esquemático das Usinas Hidroelétricas do SIN

Usinas Hidroelétricas Despachadas pelo ONS na Otimização da Operação Eletroenergética do Sistema Interligado Nacional

Horizonte: 2024 - 2028





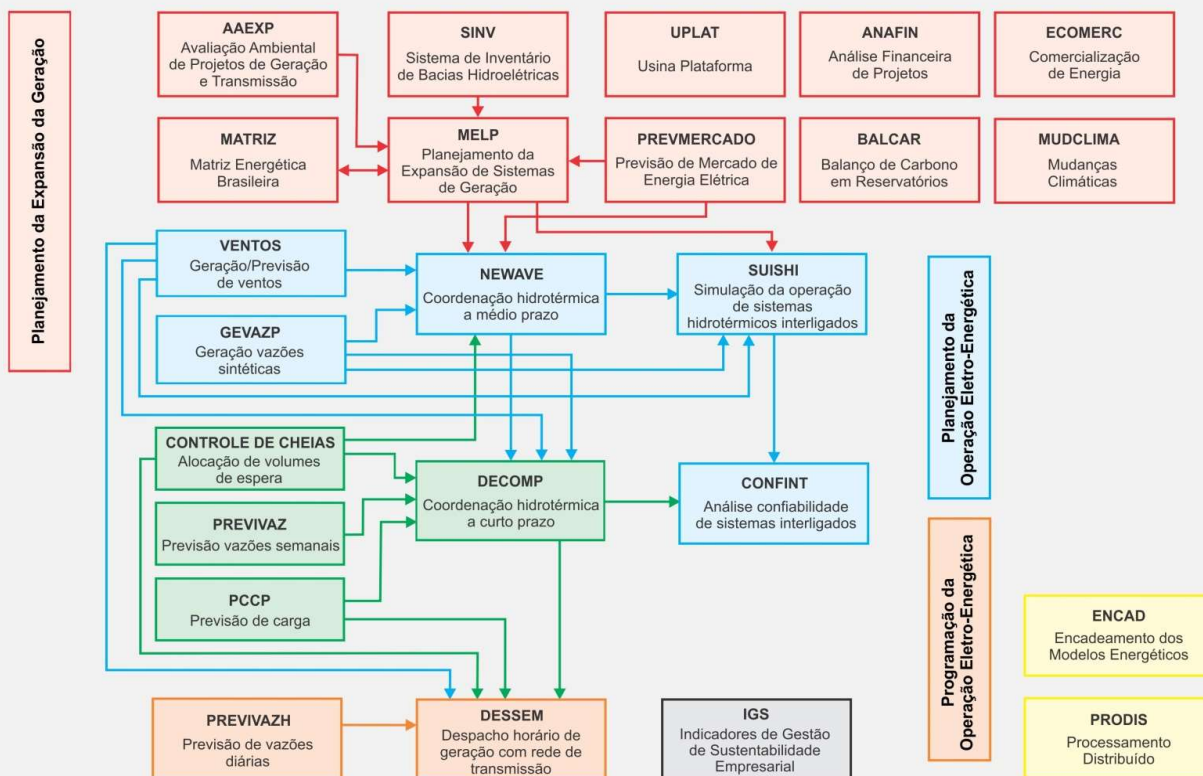


# Comentários sobre o SIN

- Nossa matriz elétrica é fortemente renovável e deve continuar assim
- Nosso sistema (o SIN) é muito grande e bastante complexo
- A operação do SIN é bastante complexa, devido a sua dimensão, composição de fontes e diferentes atores
- No contexto da transição energética, além da utilização de fontes renováveis é muito importante o uso racional de energia (energia não gerada implica em menos emissões de GEE e impactos ambientais)
- Operação Interligada
- **Modelos matemáticos para o Planejamento da Expansão e Operação do SIN**
- Problema Grande -> solução -> Decomposição do Planejamento em Etapas
- Utilização de modelos que considerem as características do SIN (representação das diversas fontes, das incertezas, dos demais usos da água, etc)

# Cadeia de modelos

## Cadeia de Modelos para o Planejamento da Expansão da Geração e da Operação Energética



## Horizontes e Intervalos de Tempo:

20 a 30 anos,  
intervalos anuais

a

1 semana,  
intervalos horários

## Homologados pela ANEEL

## Usuários:

ONS, CCEE, EPE,  
ANEEL, Sistema  
Eletrobras e  
Agentes

O desenvolvimento  
conta com parcerias  
entre Centros de  
Pesquisas e  
Universidades



---

# **DECOMP**

## **Planejamento da Operação de Curto Prazo**



# DECOMP

## O Problema da operação do SIN

- Sistemas formados apenas por **Usinas Térmicas** o **custo de operação** dependem apenas do combustível e manutenção, i é, o custo de cada unidade independe das demais, o que torna o planejamento da operação mais simples, pois basta iniciar a geração pelas usinas mais baratas
- Sistemas que contam com **fontes renováveis (Hidro, Solar, Eólica)**, como a água, o sol e o vento são “grátis” (e não emitem GEE), o **custo de operação** está relacionado ao combustível não utilizado. Além disso,
  - As **afluências futuras** (que dependem da precipitação), a **velocidade do vento** e a **irradiação solar** têm componentes **sazonais** e **aleatórios**



# DECOMP

## O Problema da operação do SIN

- O volume dos reservatórios das hidrelétricas atenua a questão da aleatoriedade
- Porém, como os reservatórios são limitados:
  - O problema de operação torna-se **acoplado no tempo**, pois a operação em um determinado instante de tempo afeta a operação nos instantes seguintes
  - A água liberada em uma hidrelétrica afeta a operação das hidrelétricas à jusante => **acoplamento espacial**
- Além disso, a operação deve ter como **objetivo minimizar custo e garantir a confiabilidade de atendimento (preservando o meio ambiente e a sustentabilidade)**

# DECOMP

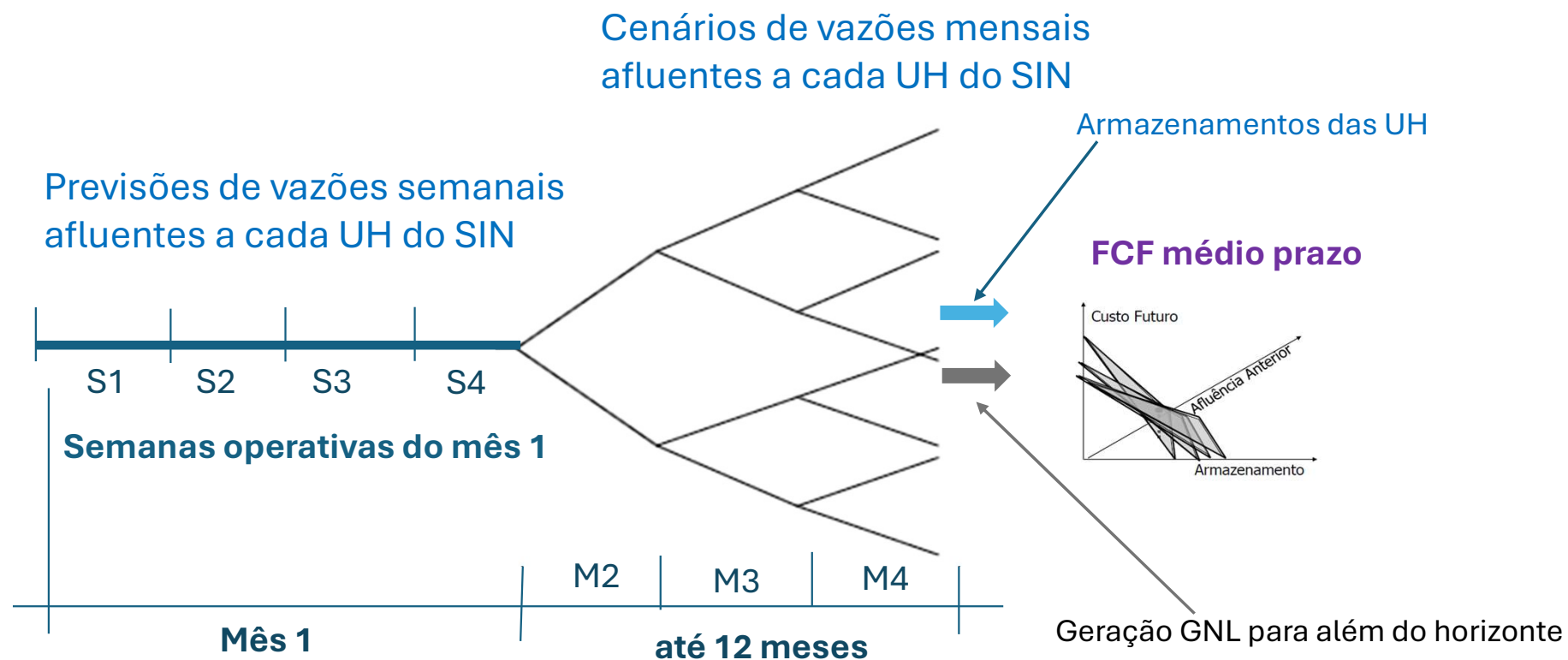
Etapa do Planejamento da Operação	Médio Prazo	Curto Prazo	Programação Diária
Modelo de Otimização Energética	NEWAVE	DECOMP	DESSEM
Nível de Detalhamento do SIN	Reservatórios Equivalentes (UI até 6 meses), Intercâmbios	Usinas individualizadas (UI), Intercâmbios	Unidades geradoras, Rede (Fluxo DC)
Horizonte de planejamento	Até 10 anos	Até 1 ano	Até 14 dias
Discretização temporal	Mensal	Semanal/ Mensal	½ hora / horária
Consideração das incertezas hidrológicas	Estocástico	Estocástico / “determinístico”	“Determinístico”
Estratégia de Solução	PDDE	PDD	MILP

# DECOMP: Objetivo

Determinar as metas de **geração de cada usina** de um sistema hidrotérmico **sujeito a afluências estocásticas, de forma a minimizar o valor esperado do custo de operação** ao longo do período de planejamento, **considerando**:

- As **restrições físicas e operativas** associadas ao problema:  
conservação da água, limites de turbinamento, defluência mínima, armazenamento, atendimento à demanda, limites de intercâmbio, etc.
- O **Custo**, composto pelo **custo variável de combustível das usinas termoeletricas** e pelo **custo atribuído às interrupções de fornecimento de energia**, representado por uma função de penalização dos déficits de energia (custo do déficit)
- A **incerteza** acerca das vazões afluentes aos diversos aproveitamentos do sistema, representada através de **cenários hidrológicos**

# DECOMP Representação Gráfica do Problema e das afluições



# DECOMP Representação Matemática do Problema

$$\alpha_t(X_t) = E_{A_t|X_t} \left\{ \min_{U_t} \left[ C_t(U_t) + \frac{1}{1+\beta} \alpha_{t+1}(X_{t+1}) \right] \right\}$$

s.a.

$$X_{t+1} = f_t(X_t, A_t, U_t)$$

$$g_{t+1}(X_{t+1}) \geq 0$$

$$h_t(U_t) \geq 0$$

para  $t = T, T-1, \dots, 1$ ; para todo  $X_t$

$T$  : horizonte do estudo

$t$  : estágios do estudo, que podem ser diferentes

$\beta$ : a taxa de desconto

$X_t$ : variáveis de estado do problema, afetam a decisão:

$V_t$  volume armazenado nos reservatórios no início do estágio  $t$

$A_t$  vazões incrementais aos reservatórios nos estágios anteriores à  $t$

$U_t$ : variáveis de decisão do problema, tais como:

$Q_t$ : volumes turbinados

$S_t$ : volumes vertidos

**$C_t(U_t)$ : custo imediato associado a decisão  $U_t$**

**$\alpha_t(X_t)$ : valor esperado do custo de operação do estágio  $t$  até o final do período sob a hipótese de operação ótima**



# DECOMP Representação Matemática do Problema

## Custo Imediato

Obtido em cada estágio  $t$  PPL

$$C_t(U_t) = \min \sum_{j=1}^{NT} C_j(G_t^j)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^{NH_k} \rho_i Q_t^i + \sum_{j=1}^{NT_k} G_t^j + \sum_{r \in \Omega_k} (f_t(r, i) - f_t(i, r)) = D_t^k$$

$$\underline{G}_t^j \leq G_t^j \leq \overline{G}_t^j$$

$$f_t(i, r) \leq \overline{f}_t(i, r)$$

para  $k = 1, \dots, NS$ ;

**Derivada do C Imediato**  
= Custo Uts ou Déficit

## Custo Futuro - FCF

Valor esperado do custo de operação da etapa  $t+1$  até o horizonte  $T$ , a partir do estado  $X_{t+1}$ .

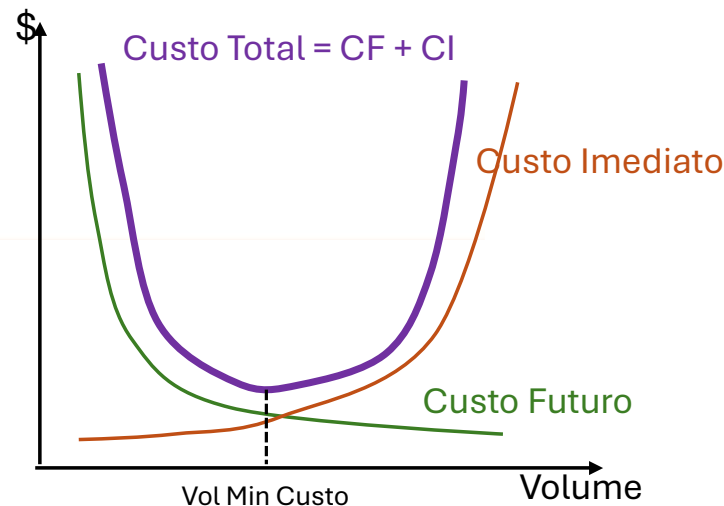
$\alpha_{T+1}(X_{T+1})$ : FCF para o último estágio

do horizonte é proveniente da etapa de médio prazo - NEWAVE

## Acoplamento com FCF do médio prazo

O acoplamento se dá transformando os volumes finais dos reservatórios do último estágio do horizonte de curto prazo (DECOMP) em energia armazenadas nos subsistemas do modelo de médio prazo (NEWAVE), e as vazões afluentes passadas em energias afluentes.

**Derivada do C Futuro em relação ao VArm = Valor da Água**





# Comentários finais

A matriz de energia elétrica brasileira tem como vantagem:

- ser composta majoritariamente de fontes renováveis
- ser diversificada, inclusive em sua parcela renovável

Permitindo considerar as vantagens de cada fonte

Por outro lado, a operação do SIN, não só por sua dimensão mas também pela diversidade de fontes, é um problema complexo que exige um planejamento cuidadoso

Para se buscar a operação mais eficiente do SIN é necessário muita matemática, estatística e engenharia, somadas a outras disciplinas quando incluimos a questão socioambiental (que não tratamos nesta apresentação).

Mãos à obra !!!!



# Algumas Referências

- *Cepel, Manual de Referência do Modelo Decomp v31, dez/2021*
- *Cepel, Manual do Usuário do Modelo Decomp v31, dez/2021*
- *Diniz, A.L., Costa, F.S., Maceira, M.E.P, Santos, T. N., Santos, L.C.B, Cabral, R.N., Short/Mid-Term Hydrothermal Dispatch and Spot Pricing for Large-Scale Systems - the Case of Brazil, PSCC - Power Systems Computation Conference, 2018*
- *Santos, T. N., Santos, Costa, F.S., Diniz, A.L., Cabral, R.N., ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO DE RESTRIÇÕES ACOPLADAS NO TEMPO NA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA DUAL APLICADA AO PROBLEMA DE COORDENAÇÃO HIDROTÉRMICA, XXII SNPTEE, 2013*
- *Diniz, A.L., Santos, T. N., Saboia, A.L., Pinto, R.J., Maceira, M.E.P, Costa, F.S., MODELAGEM LINEAR POR PARTES DINÂMICA DA FUNÇÃO DE PRODUÇÃO HIDROELÉTRICA – EXTENSÃO PARA FUNÇÕES MULTIVARIADAS E APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA DUAL, XXI SNPTEE, 2011*
- *M.E.P. Maceira, L.A. Terry, F.S. Costa, J.M. Damazio, A.C.G. Melo, "Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System", 14th PSCC – Power Systems Computation conference, Sevilla, Spain, 200*



# Comentários finais

---

Obrigado !  
*fcosta@ime.uerj.br*

## Projeto de Extensão

Transição energética: vantagens e desafios técnicos das energias renováveis para o equilíbrio entre custos, segurança e mudanças climáticas