EDIÇÃO BRASÍLIA

ENAITRAN 2025

ENCONTRO NACIONAL DA TRANSMISSÃO

Regulação Técnica e Econômico-Financeira

# Análise técnico-econômica da inserção de Sistemas de Armazenamento por Baterias na Rede Básica

QUANTUM

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica | Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - PDI

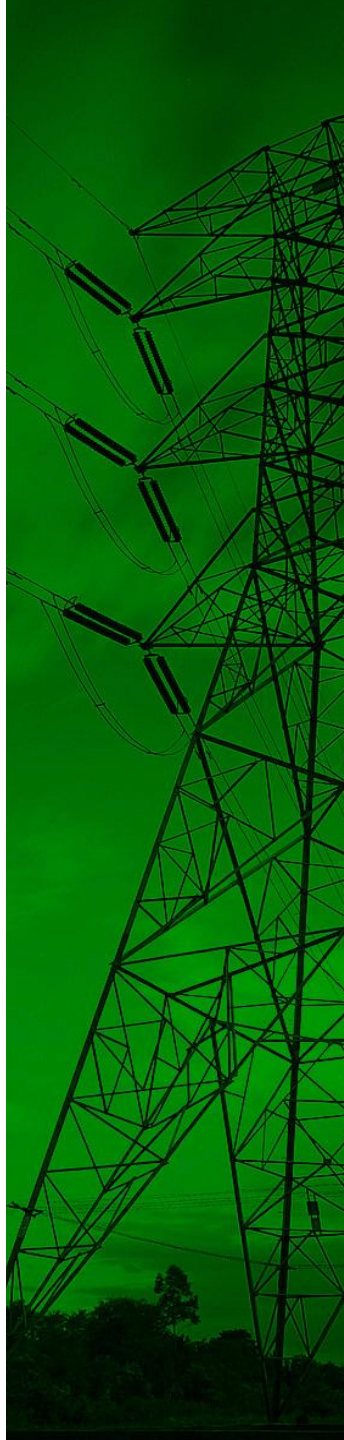
Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

Executoras:

PSR, WEG, MRTS Consultoria, Lactec, HPPA, FDTE

REALIZAÇÃO: ABRATE Associação Brasileira das Empresas de Transmissão de Energia Elétrica, Instituto ABRATE

4 e 5 de Junho de 2025



ANEEL
Agência Nacional de Energia Elétrica
PDI - Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

Cooperação Técnica:
epe

Executoras:
PSR
weg
MRTS Consultoria
Lactec
HPPA
FDTE Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia

Apoio:
ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

# Agenda

1. Visão Geral do Projeto
2. SAEB's – Modularização de Custos
3. Metodologia multicritério para o Relatório R1
4. Estudo de Caso: Aplicação da Metodologia para o Relatório R1
5. Considerações Finais

# Visão Geral do Projeto

# Escopo do Projeto de P&D

**Proposta de evolução regulatória para o SEB que permita a expansão racional dos SAEB's, como alternativa às opções hoje sendo consideradas para atendimento seguro da carga.**

- Os SAEB's tem resposta mais rápida e podem ser mais efetivos do que outros recursos usualmente adotados no SIN, implicando que a remuneração dos investimentos em SAEB deve estar embasada em análises técnicas, econômicas e financeiras consistentes, **do que decorre uma segunda vertente de relevância no escopo do Projeto** em tela, representada pela vertente metodológica.

**Na vertente metodológica, esse Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento teve como escopo:**

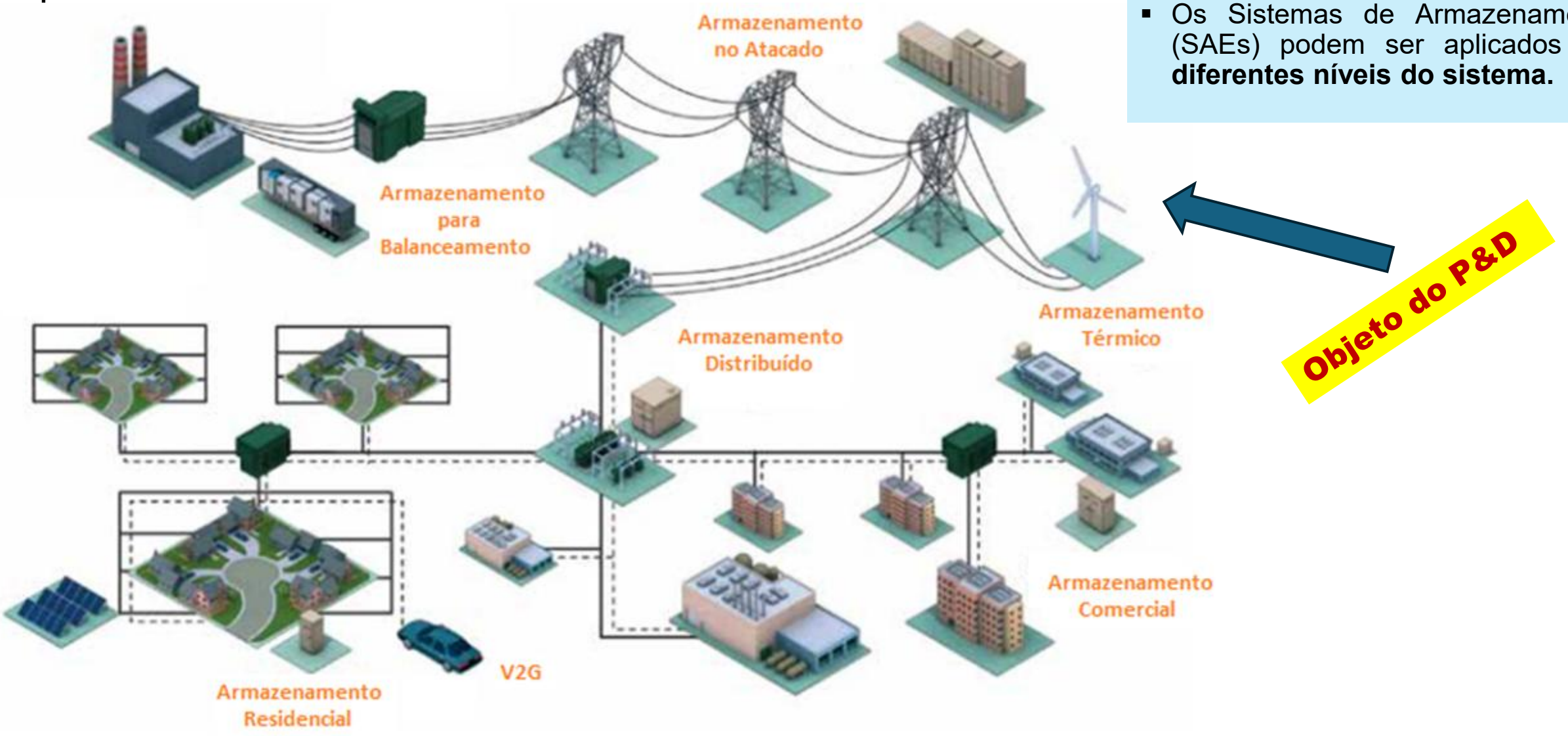
i. Desenvolver metodologia para decompor o Custo de um SAEB em Módulos, para viabilizar a aplicação de índices de atualização monetária, assim como definir uma proposta para incorporar o SAEB como elemento de Bancos de Preços de Equipamentos.

ii. Desenvolver metodologias para determinar o portfólio mais adequado de equipamentos e procedimentos operativos que maximizem a **flexibilidade, a confiabilidade e a resiliência** do sistema de transmissão sob a ótica energética e elétrica.

iii. Desenvolver metodologia de identificação da necessidade sistêmica e valoração econômica dos atributos energéticos e elétricos de baterias frente aos critérios vigentes de expansão do sistema.

# Potenciais localizações e aplicações de SAE's no Sistema Elétrico

- Os Sistemas de Armazenamento (SAEs) podem ser aplicados em **diferentes níveis do sistema.**



# BESS's – Como incluir na Expansão da Transmissão?



**Vertente Regulatória**

- ***Contratação via leilões (ou reforço) e incorporação na base de ativos da transmissora***
  - O BESS atua como integrante das instalações da empresa transmissora, seja esta existente ou criada visando desenvolver um novo empreendimento.
  - O BESSs pode realizar funções inerentes à transmissora e, ainda, prestar serviços ao Operador do Sistema, sendo despachado de forma centralizada.

**BESS atua "dentro" da Transmissora**

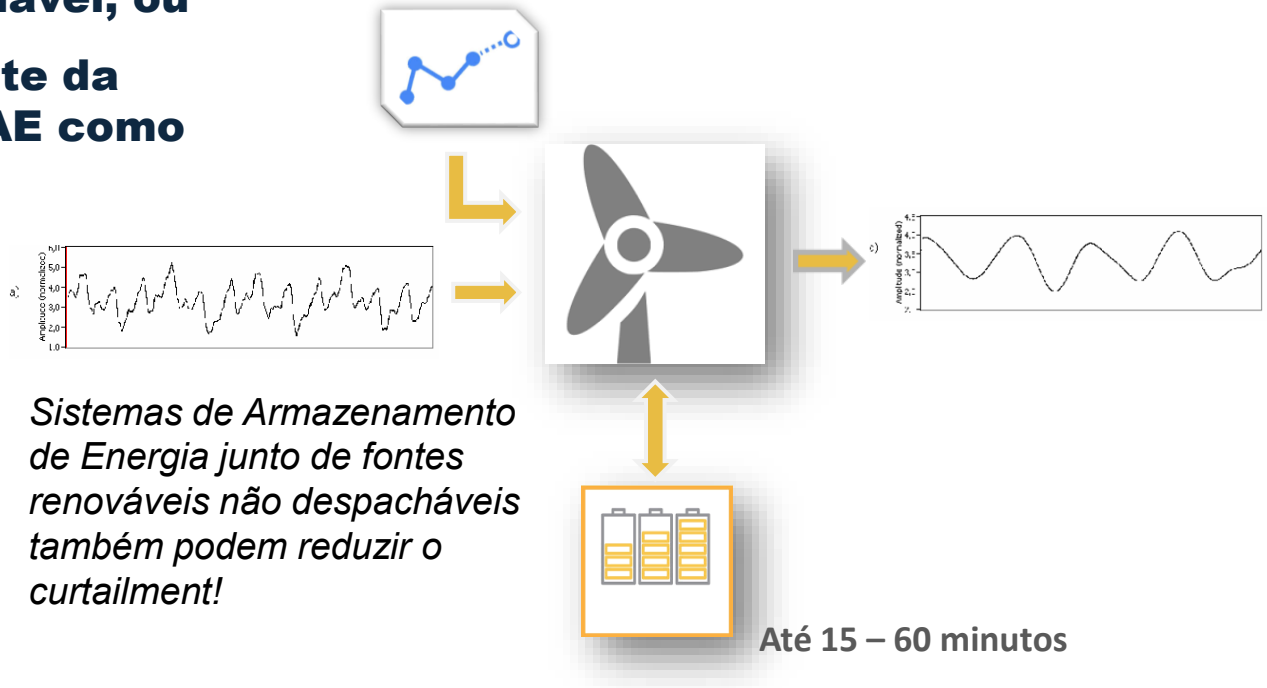
- ***Viabilização via mercados de serviços ancilares***
  - O BESS é construído e operado como um empreendimento à parte das instalações das transmissoras.
  - Os BESSs podem participar da prestação de serviços ancilares como:
    - Regulação de frequência / RPO;
    - *Virtual power line;*
    - *Dentre outros ...*

**BESS atua "fora" da Transmissora**

# Sistemas de Armazenamento – Serviços para o Sistema

i. **Armazenamento acoplado à Geração Não Despachável; ou**

ii. **a um Transmissor, nesse caso concentrando o porte da instalação para atendimento de toda uma área (SAE como ativo da Transmissora).**




*Sistemas de Armazenamento de Energia junto de fontes renováveis não despacháveis também podem reduzir o curtailment!*

## Possíveis objetivos:

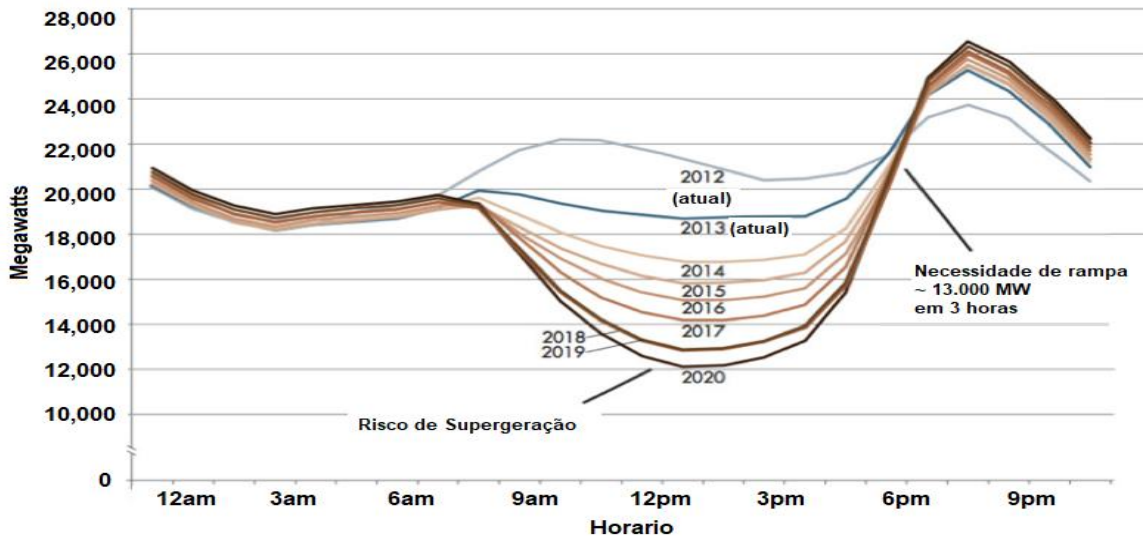
- **Controle temporal da produção (redução de volatilidade)**
- ***Peak shaving***
- **Regulação de frequência**
- **Prover Inércia Sintética ao Sistema**

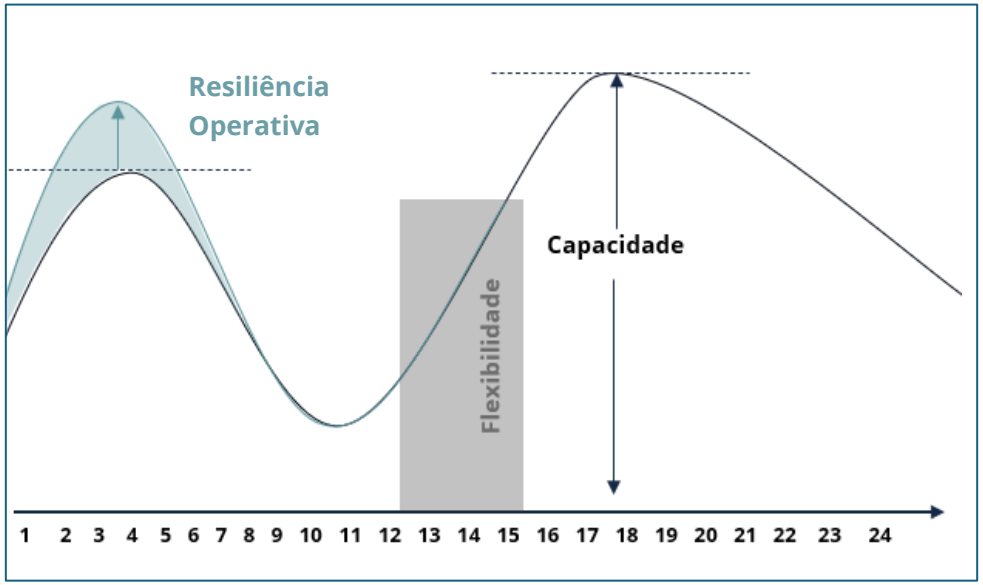
# Benefícios dos SAE's para o Setor Elétrico _ Flexibilidade

Os SAE's constituem importante recurso no contexto de transição energética quando **fornecem flexibilidade operativa ao sistema (controle de Rampas)**.

Resposta rápida!

- **Flexibilidade Operacional:**
  - **Definição:** Capacidade de lidar com variações na oferta e demanda, especialmente com alta penetração de renováveis, em tempos compatíveis às ações de despacho do SIN.




- **Resiliência Operativa:**
  - **Definição:** Capacidade de resposta a variações rápidas (milissegundos a minutos), com provimento via controle de carga x frequência (resposta automática).

# Serviços que podem ser ofertados por um BESS

- **Desafio**: Adaptar a regulação para que seja possível **monetizar o serviço prestado pelos BESS**, contestando, competindo com, **ou até funcionando de forma integrada** com os recursos tradicionais de oferta e demanda.

## Potenciais Serviços a serem Prestados por Segmento do Setor Elétrico

**Mercado Atacadista**
- Arbitragem (deslocamento do consumo)
- Suprimento de Capacidade

**Serviços Ancilares**
- Regulação de frequência
- Reserva girante e não girante
- Suporte de Tensão
- Black Start

**Transmissão**
- Adiamento de reforços e ampliações
- Alívio de congestionamento

**Distribuição**
- Postergação dos Investimentos
- Suporte de Reativos / regulação de tensão
- Regulação de frequência

**Consumidor**
- Confiabilidade
- Deslocamento de Consumo
- Gestão de Custo com Demanda
- Elevar autoconsumo com solar fotovoltaica

**Off-grid**
- Sistemas residenciais solares
- Mini grids: estabilidade do sistema
- Mini grids: possibilita alta participação de renováveis intermitentes

# ETAPAS do Projeto (Resumo)

**Definição de escopo e detalhamento da abrangência do Projeto**
**(Elaboração do Termo de Referência definitivo do Projeto)**

↓

**Revisão do estado da arte sobre aplicação e valoração dos serviços das baterias**

↓

**Desenvolvimento metodológico de identificação e valoração do serviço de flexibilidade, confiabilidade, resiliência e segurança elétrica (dinâmica)**

↓

**Estudos de Caso**

↓

***Workshops* e Capacitação da equipe**

# Estudos de Caso

**Após a definição da metodologia de avaliação e valoração dos serviços das baterias no sistema de transmissão, o desempenho metodológico foi avaliado em estudos de caso, a saber:**

a) Estudo de caso em um sistema ilustrativo de pequena dimensão.

b) Estudo de caso em um sistema real – Sistema Elétrico Brasileiro - selecionando-se alguns locais mais promissores, para definição de um conjunto mais restrito de locais para a instalação de um SAEB e, para estes, se proceder a uma análise detalhada :

- Estudo de caso em 3 locais, definidos em comum acordo com a Quantum.
- Estudo de caso em 3 locais do SIN, definidos pela equipe Executora e validados como pontos de interesse em âmbito do SIN pela EPE.

c) Estudo de caso em 1 local do SIN, definido pela equipe Executora, contemplando a comparação da solução com equipamentos tradicionais.

d) Estudo de caso de um Sistema Isolado – Norte do Brasil.

# Metodologia para indicação de localidades propostas pelas executoras

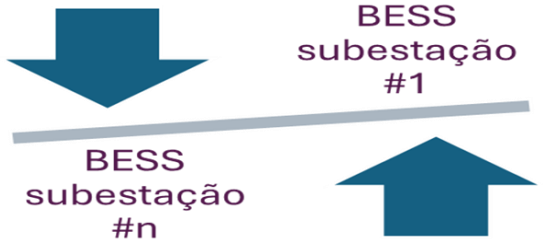
## Metodologia Aplicada – Proposta

I. Ranking das barras com maior benefício de alocação de baterias de acordo com a metodologia de execução das avaliações de cunho energético (diferença máxima CMO).

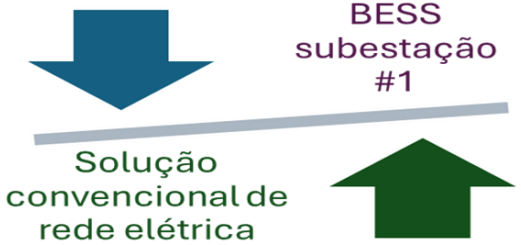
II. A partir da lista anterior, foi feita uma análise de sensibilidade, considerando que as barras com maior chance de êxito com SAEBs possuem margem de transmissão menores, resultando na tabela a seguir.

| | Ponto de Conexão | Região | UF | Tensão (kV) |
|---|---|---|---|---|
| Geral | **Poções II** | **Nordeste** | **BA** | **230** |
| | **Salto Osório** | **Sul** | **PR** | **230** |
| | **Angelim II** | **Nordeste** | **PE** | **500** |
| | | | | |
| Quantum | **Itabira** | Sudeste | MG | 500 / 230 |
| | **Janaúba 3** | Sudeste | MG | 500 / 230 |
| | **Capivari do Sul** | Sul | RS | 230 |

**Foram selecionadas as Subestações Poções II / Salto Osório e Angelim II no SIN e Itabira 230 kV e 500 kV; Janaúba 3 500 kV e 230 kV e Capivari do Sul no universo da Quantum.**




## Caso Adicional




| Localidade | Foco / violação | Obra proposta | Ano | Referência |
|---|---|---|---|---|
| SE 500kV | Subtensão na barra de 500 kV da SE terminal da LT, condição normal, a partir de 2028. | • LT CS 500kV, 190 km. | 2028/2029 | • EPE. EPE-DEE-RE-015/2022-rev1 |

# Decomposição de Custos de SAEB's

1. Metodologia Aplicada
2. Decomposição de Custos do SAEB
3. Índices FGV
4. Planilha Banco de Preços

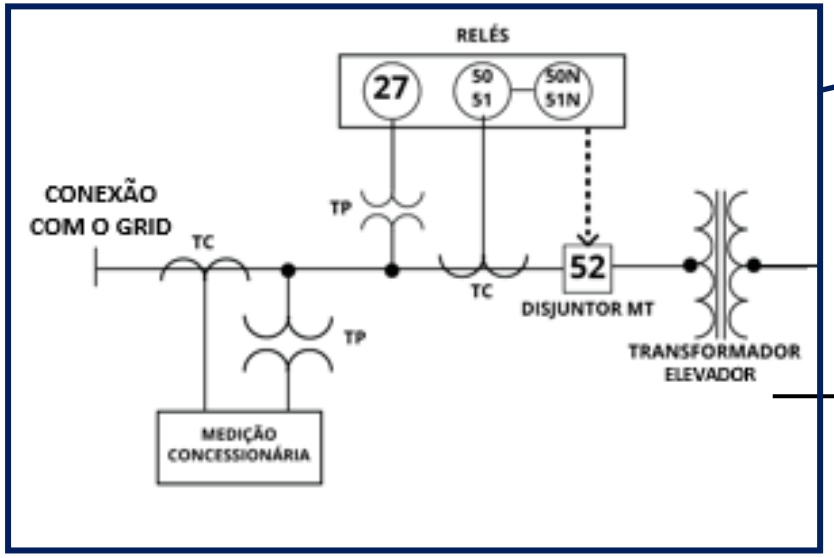
# Metodologia Aplicada

## Etapas de Desenvolvimento do Estudo

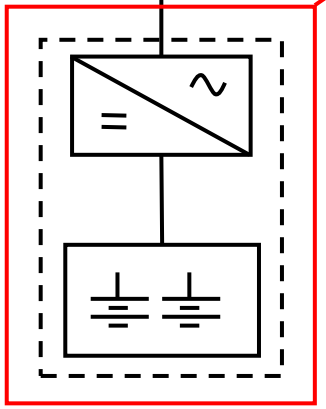
Decomposição dos Custos do SAEB → Índices FGV que se relacionam com Equipamentos do SAEB individualizados na decomposição → Adaptação da Proposta ao Modelo do Banco de Preços vigente (REH 758/2009) → Proposta de Banco de Preços para SAEB visando aplicação pela ANEEL

# Escopo da Decomposição para encontrar uma Cesta de Índices

CONEXÃO À REDE
*JÁ CONHECIDA*




SAEB
*ELEMENTO NOVO E MODULAR*



MÓDULO SAEB
25MW / 100MWh

**Conversor de Potência = 25MW**

(PCS - Power Conversion System)

**Baterias (Racks ou Containers) = 100MWh**

(DC Block)

**Gerenciamento de Energia**

(EMS - Energy Management System)

**Em função da escala necessária para os projetos na transmissão e da modularidade natural dos SAEBs, convencionou-se um bloco de 25MW por 4 horas (100MWh) .**

**Trata-se de um bloco que qualquer fabricante consegue alcançar com suas soluções !**

# Planilha Banco de Preços

**Ao definir as premissas e clicar em "Calcula CAPEX", a planilha imprime a precificação do SAEB com base na metodologia descrita.**

## P&D ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA INSERÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO POR BATERIAS NA REDE BÁSICA

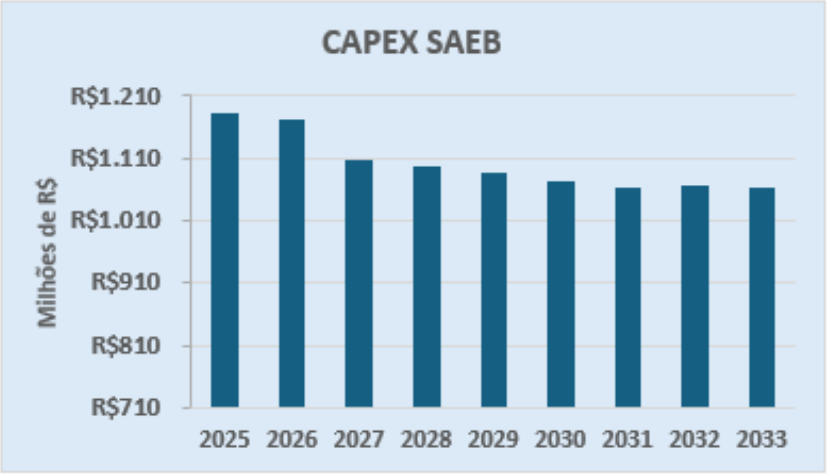
## BANCO DE PREÇO SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO A ÍON DE LÍTIO

| Potência(MW) | Duração (h) | Tensão (kV) |
|---|---|---|
| 250 | 4 | 230 |

| Pertencente ao REIDI? | IPI | ICMS | PIS/COFINS |
|---|---|---|---|
| SIM | 0% | 0% | 0% |

| Custo de Engenharia e Montagem | Outro [%CAPEX]: |
|---|---|
| Igual ao Banco de Preço ANEEL | 48,69% |

CALCULA CAPEX



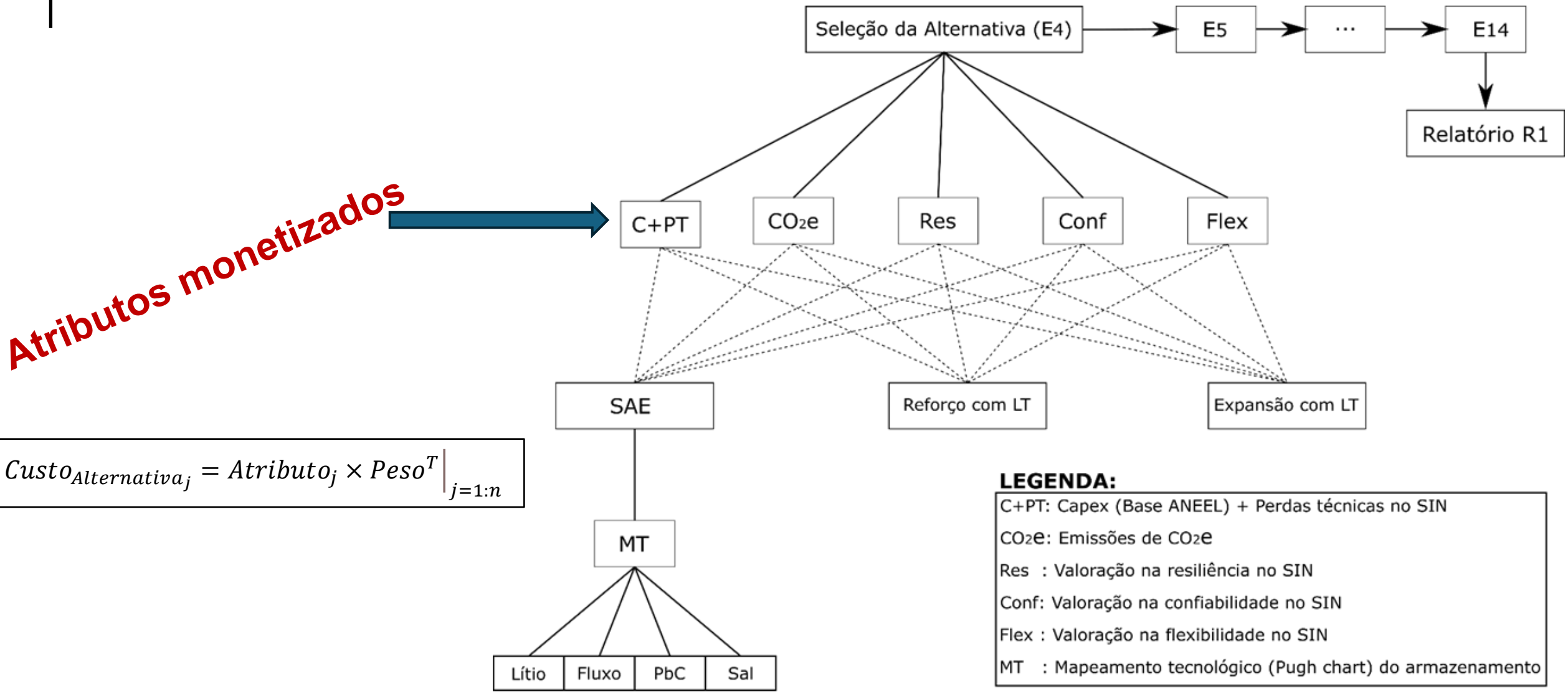

| | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CAPEX [Milhões R$] | R$ 1.184,1 | R$ 1.173,8 | R$ 1.109,7 | R$ 1.098,0 | R$ 1.086,2 | R$ 1.075,0 | R$ 1.064,4 | R$ 1.068,3 | R$ 1.063,6 |
| Variação [%] | | | | | -10% | | | | |

Proponente

Executoras

# Metodologia multicritério para o Relatório R1

# Metodologia multicritério para o Relatório R1*




$$Custo_{Alternativa_j} = Atributo_j \times Peso^T \Big|_{j=1:n}$$

Observação: As tecnologias de armazenamento por baterias (SAE) de ions de Lítio, Chumbo carbono avançado (PbC), Sal e de Fluxo são tecnologias de mercado com potencial de aplicação em larga escala

**LEGENDA:**

C+PT: Capex (Base ANEEL) + Perdas técnicas no SIN

$CO_2e$: Emissões de $CO_2e$

Res : Valoração na resiliência no SIN

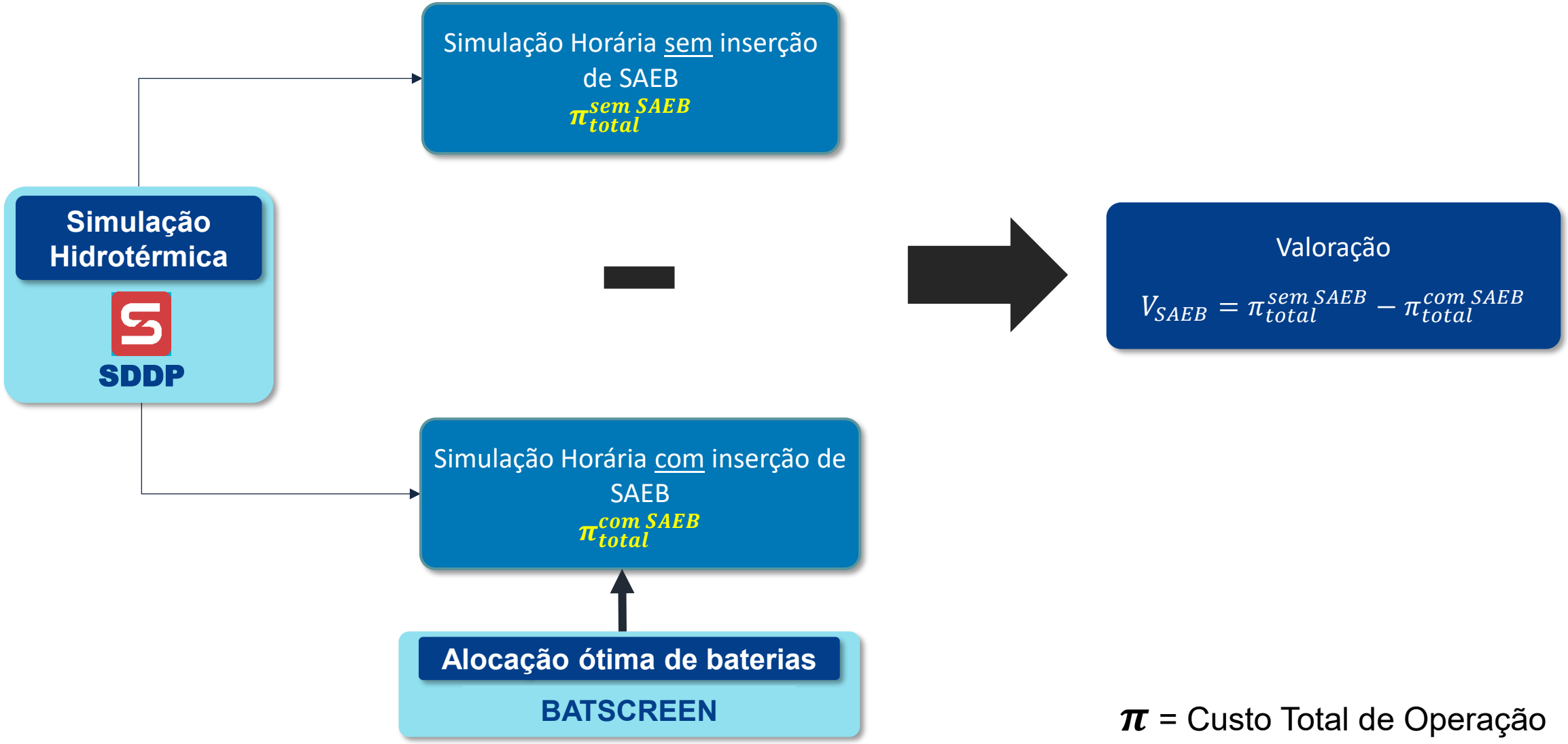
Conf: Valoração na confiabilidade no SIN

Flex : Valoração na flexibilidade no SIN

MT : Mapeamento tecnológico (Pugh chart) do armazenamento

*) Justifica a solução proposta pela EPE

# Valoração da Flexibilidade e Resiliência




$\pi$ = Custo Total de Operação

# Eventos – Resiliência*

**Redução do fator de capacidade das eólicas**

**Indisponibilidade de gás importado**

**Redução dos limites de intercâmbio**

**Aumento no preço de combustíveis importados**

**Redução da energia natural afluente**

*) Capacidade do Sistema resistir a eventos extremos e se recuperar com relativa rapidez !!

# Valoração do Serviço de Confiabilidade

**Confiabilidade com enfoque econômico (depende do Custo de Interrupção disponível)**

**Expansão ótima com recursos convencionais**

**( - )**

**Expansão ótima com dispositivos de armazenamento à Bateria**

**Valor do Serviço**

**Índices de Confiabilidade "monetizáveis" = EPNS ou EENS**

EPNS = Expectância de Potência Não Suprida
EENS = Expectância de Energia Não Suprida

# Estudo de Caso ilustrativo da aplicação da Metodologia do Relatório R1

# Valoração dos Benefícios

| | Delta Perdas [MWh/ano] | Custo das Perdas [R$/MWh] | Beneficio Perdas [R$/ano] |
|---|---|---|---|
| LT | 197.226 | 218,3 | 43.056.459 |
| BESS 250 MW | 105.218 | 218,3 | 22.970.207 |

LT de 500kV, 190km x BESS 250 MW e 2 horas de duração

$$Benefício_{flex} = \pi_{total}^{caso\ sem\ bateria} - \pi_{total}^{caso\ com\ bateria}$$

| Caso | Benefício (R$/ano) |
|---|---|
| Expansão com BESS | 75.641,41 |
| Expansão com LT | 75.324,61 |

| | EENS [MWh/ano] | Diminuição EENS em relação a Referência [MWh/ano] | Custo Interrupção [R$/MWh]* | Beneficio Confiabilidade [R$/ano] |
|---|---|---|---|---|
| Referência | 7,350 | | 25.430,89 | |
| LT | 7,343 | 0,007 | | 173,95 |
| BESS 250 MW | 7,324 | 0,027 | | 678,75 |

LT de 500kV, 190km x BESS 250 MW e 2 horas de duração

$$Benefício_{Res} = \pi_{total}^{caso\ sem\ bateria} - \pi_{total}^{caso\ com\ bateria}$$

| Caso | Benefício (R$/ano) |
|---|---|
| Expansão com BESS | 203,33 |
| Expansão com LT | 362,95 |

*Obtido atualizando-se pelo IPCA de dezembro de 2015 a março de 2025 o custo unitário esperado de interrupções não programadas (média nacional) a partir da referência:

- Sinapsis Inovação em Energia Ltda, Mercados de Energia Consultoria Ltda, & Mercados Energéticos Consultores S.A. (2016). Avaliação dos custos relacionados às interrupções de energia elétrica e suas implicações na regulação. Relatório 3.a (versão final).

# Consolidação e Resultados Finais

$$Custo_{Alternativa_j} = C_j + CO_2e_j + PT_j + Flex_j + Conf_j + Res_j$$

| Alternativa | Tamanho do BESS (MWh) | Tamanho da LT (Km) | CAPEX (R$) | Benefício Emissões (VPL R$) | Benefício das perdas técnicas (VPL R$) | Benefício da flexibilidade (VPL R$) | Benefício da confiabilidade (VPL R$) | Benefício da resiliência (VPL R$) | VPL da alternativa (R$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Entrada LT | | 190 | 247.489.068 | 9.320.752 | -28.910.239 | -50.577 | -117 | -244 | **227.848.643** |
| Instalação BESS | 500 | | 253.030.422 | 11.722.565 | -15.423.335 | -50.789 | -456 | -137 | **249.278.270** |

LT de 500kV, 190km x BESS 250 MW e 2 horas de duração (500 MWh)

CAPEX LT: 505,42 milhões de R$
CAPEX BESS 250 MW e 2 horas de duração **(500 MWh):** 518,2 milhões de R$

*Considerando uma taxa de desconto de 13,25% a.a. e um horizonte de planejamento de 10 anos

- **Vida útil:**
  - ✓ LT: 30 anos; BESS: 15 anos.

# Considerações Finais (1/3)

- Novos critérios foram propostos para a escolha da melhor alternativa de planejamento considerando novos atributos (Emissões de GEE / Flexibilidade / Resiliência / Confiabilidade).

- No primeiro conjunto de Estudos de Caso, avaliou-se a competitividade de um Sistema de Armazenamento pré definido e para um sistema ajustado (Alternativa de Referência), comparando seu custo versus os benefícios trazidos ao Sistema quando devidamente monetizados ⟶ (BESS x BESS).

- **Os benefícios sistêmicos dependem do ponto de instalação do BESS e se deve otimizar a capacidade instalada para cada local e o número de horas de carga / descarga.**

- **Um BESS sempre deverá ter maior atratividade em casos em que se compara sua instalação em alternativa a um reforço considerado tradicional.**

- Antes de tudo, convém enfatizar que o objetivo tácito dos Estudos de Caso desenvolvidos foi ilustrar a **aplicação da Metodologia proposta para o aprimoramento do Relatório R1 da EPE**, em particular no que tange à sistemática de cálculo dos benefícios sistêmicos que se propõe adicionar aos que atualmente a EPE já considera.

# Considerações Finais (2/3)

- Na sistemática da Expansão do SIN, quando se verificar o não atendimento pleno dos critérios de desempenho estabelecidos, **os reforços devem ser necessariamente propostos**, na medida em que os critérios de Planejamento são do tipo **“passa – não passa”** e a necessidade de reforço independe do resultado da análise econômica entre o investimento associado ao reforço e os benefícios monetizados proporcionados.

- Vale notar que quando o BESS for efetivo, por exemplo, para apenas adiar um reforço e, futuramente, o reforço se impuser, tornando o BESS ocioso, esse tipo de equipamento possui facilidades para remanejamento a outros pontos do SIN, em que sua instalação seja promissora para aprimorar o desempenho da rede elétrica.

- Para além das situações envolvendo contribuição ao desempenho elétrico do SIN, o Projeto permitiu verificar a efetividade do BESS para redução de “curtailment” de renováveis e para dar flexibilidade ao sistema, dando maior tranquilidade ao Operador para enfrentar a “Curva do Pato” (Rampa de Saída do Sol), com contratação via “Leilão de Reserva de Capacidade”, por exemplo.

# Considerações Finais (3/3)

**Para o Estudo de Caso desenvolvido para cotejo da instalação de um BESS versus um reforço convencional, convém destacar adicionalmente a quanto foi dito:**

- Em um caso real de tomada de decisão, uma análise criteriosa para otimizar o ciclo de carga e descarga do BESS deve ser efetivada. Esse tipo de análise passa por aferir realmente a Curva de Carga na área de aplicação, verificando quantas horas de atuação como geração ou carregamento são de fato necessárias.

- Como se trabalha com Fluxo de Caixa Descontado de 10 anos ou mais, em uma situação de tomada de decisão se deverá analisar individualmente cada ano do horizonte de planejamento, avaliando custos e benefícios para cada um desses anos.

- Em situações de Linha de Transmissão relativamente longa e de EAT, em que não existam muitas violações no Sistema mas a LT se imponha, em face do critério de Planejamento “Passa-não-Passa”, o porte do BESS que recoloque o SIN nos critérios poderá ser relativamente reduzido, configurando excelente potencial de se revelar a melhor alternativa.

QUANTUM
ANEEL
AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
PDI - Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
Obrigado!
Cooperação técnica:
epe
Executoras:
PSR
WEG
MRTS
Lactec
HPPA
FDTE
Apoio:
ONS
Operador Nacional do Sistema Elétrico
WEG
WEG BESS