



SUMÁRIO EXECUTIVO

SISTEMAS ENERGÉTICOS DO FUTURO - 3



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Por meio da:
giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

MARÇO DE 2022



▶ Para integração dos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) ao sistema elétrico é importante considerar alterações:

01

NA ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

do setor e no papel desempenhado pelas distribuidoras de energia elétrica

02

NOS AMBIENTES REGULATÓRIOS

03

EM MODELOS DE PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO

para contemplar a representação dos REDs

▶ A difusão dos REDs possibilita que múltiplos serviços sejam transacionados pelos agentes além de uma mudança no papel das distribuidoras que devem ter um papel mais ativo em relação à integração dos REDs.

▶ No que tange ao modelo regulatório, sugerem-se propostas de adequações na regulação técnica e econômica do Brasil, com base nas melhores práticas internacionais e características do Sistema Elétrico Brasileiro. As proposições sinalizam especialmente necessidade de adaptações no PRORET e PRODIST.

▶ Do ponto de vista dos modelos de planejamento, propõe-se uma metodologia de expansão contemplando a representação dos REDs de forma endógena que permite verificar a atratividade dos recursos descentralizados em comparação com fontes tradicionais e recursos centralizados do sistema.

▶ Pelo estudo de caso verifica-se o crescimento da participação de renováveis não convencionais na matriz energética e a importância da rede de transmissão na otimização e uso dos recursos na operação do sistema. Destaca-se que a abordagem proposta de expansão na rede de distribuição considerando rede e perdas é um diferencial da metodologia frente a outros métodos reunidos a partir da revisão da literatura. Assim, pelo estudo de caso, observa-se a aplicabilidade do método proposto.

APRESENTAÇÃO

- ▶ Este estudo foi solicitado pelo *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH* para avaliar os impactos da integração dos REDs em grande escala no Sistema Elétrico Brasileiro.
- ▶ Para atender demandas da ANEEL e EPE, o escopo do trabalho compreende principalmente:



AVALIAÇÃO DE MODELOS REGULATÓRIOS PARA REDS NOS DISTINTOS CONTEXTOS DE PENETRAÇÃO E SERVIÇOS.



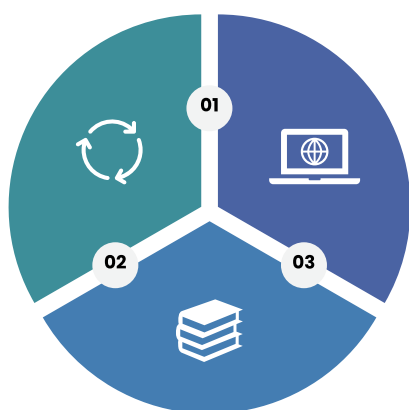
AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DOS REDS NOS MODELOS DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS.

Para tanto, o GIZ fez uma parceria com o Professor Djalma Falcão e as empresas de consultoria PSR e Sigla Sul.



OBJETIVOS

► Os temas abordados no projeto são enquadrados em três eixos de estudo, agregados em três produtos, cujos principais objetivos são destacados a seguir.



MODELOS REGULATÓRIOS

Identificar modelos regulatórios aplicáveis ao Brasil com base nas melhores práticas internacionais, verificando os modelos de negócio aplicados em mercados com diferentes características.



MODELOS COMPUTACIONAIS

- 1- Avaliação do estado da arte de métodos para valorar custos e benefícios dos REDs.
- 2- Avaliação do estado da arte de metodologias de projeção de difusão dos RED de forma exógena e endógena aos modelos de expansão.



ESTUDO DE CASO

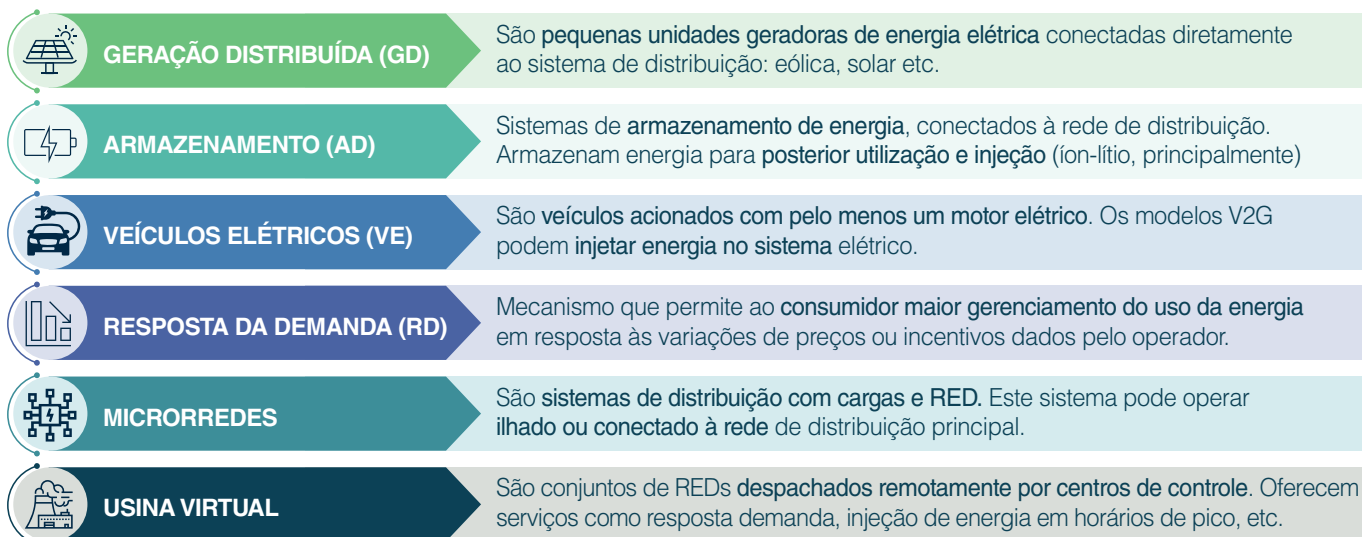
- 1- Proposta de metodologia considerando métodos avaliados no Produto 2.
- 2- Simulação e Análise de Estudo de Caso com a metodologia proposta.

RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS (RED)

Tecnologias de geração e/ou armazenamento de eletricidade, localizados nos limites da área de atuação da distribuidora.



Microrredes e Usinas Virtuais



MUDANÇAS NOS MODELOS DE NEGÓCIOS

► A difusão de REDs nos sistemas elétricos gera a necessidade de ajustes nos modelos de negócios, com a possibilidade de:



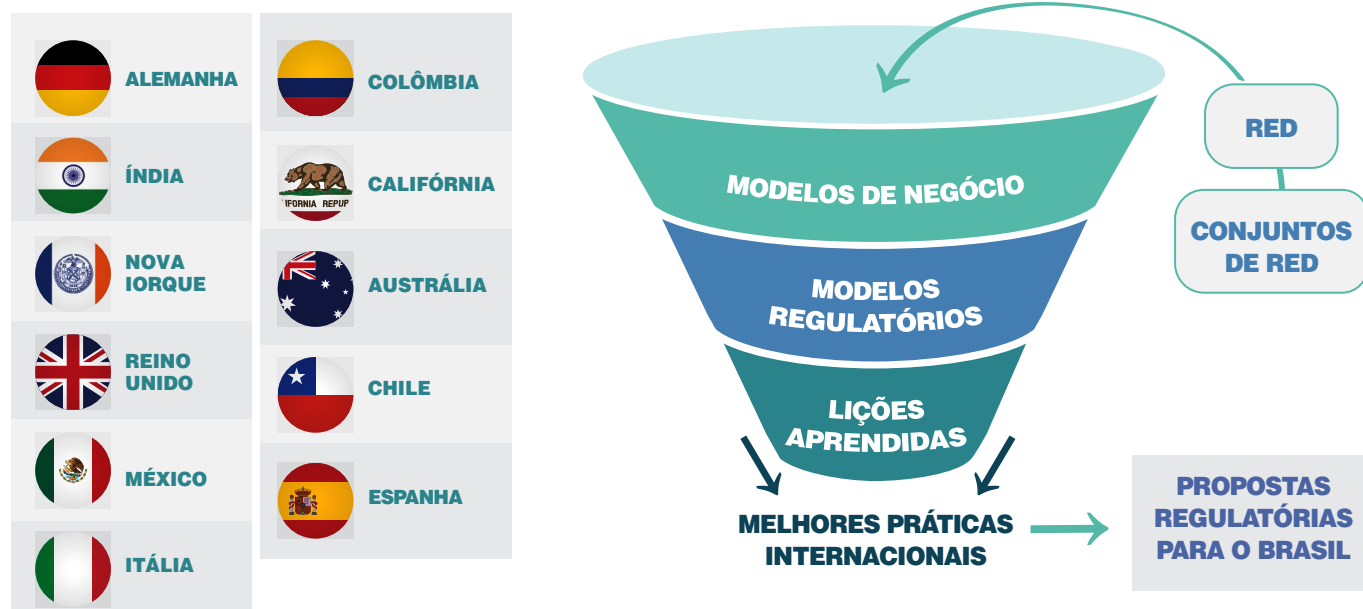
► Recomenda-se que tanto a operação da rede de distribuição como a coordenação dos despachos de RED sejam feitos pela distribuidora já que esta possui maior conhecimento sobre a rede.

► Dentro deste contexto, sugere-se a criação de uma plataforma de serviços distribuídos, *Distributed System Platform* (DSP), que tornaria o papel das distribuidoras mais ativo em relação à integração dos RED ao sistema.



PROPOSTAS DE MODELOS REGULATÓRIOS

► As propostas de adequação ao modelo regulatório do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) em contexto de difusão de RED consideram as melhores práticas internacionais de onze países e jurisdições.



BENCHMARKING REGULAÇÃO TÉCNICA

	GD		AD			VE		RD/VPP	MICRORREDES
	Auto-consumo	Injeção de energia	Auto-consumo	Injeção de energia	Serviços ancilares	Medição Exclusiva Residencial	V2G	Regulamentação agregadores	Regulamentação
Alemanha	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	✓	0
Austrália	✓	✓	✓	✓	✓	X	-	0	0
Reino Unido	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	✓	-
Califórnia	✓	✓	✓	✓	✓	X	0	✓	0
Nova Iorque	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0	✓	0
Índia	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	0
México	✓	✓	0	X	X	✓	X	-	0
Colômbia	✓	✓	✓	0	X	0	X	✓	0
Chile	✓	✓	✓	✓	0	X	X	-	0
Espanha	✓	✓	✓	✓	0	✓	0	0	-
Itália	✓	✓	✓	✓	0	X	0	0	-

Legenda:












	RED / serviço identificado / praticado no país		RED / serviço não praticado no país		RED / estágio inicial / serviço em fase de testes / projeto piloto		RED / serviço não identificado para o país
--	--	--	-------------------------------------	--	--	--	--

BENCHMARKING REGULAÇÃO TÉCNICA

	REGIME REGULATÓRIO	CICLO	RECONHECIMENTO DE CUSTOS	INFLUÊNCIA DOS RED NOS CUSTOS	EQUALIZAÇÃO CAPEX/OPEX	ABORDAGEM	MECANISMO DE INCERTEZA
Alemanha	Revenue Cap	5 anos	Plurianual	Média	Não	Backward Looking	Não
Austrália	Revenue Cap	5 anos	Plurianual	Alta	Sim	Forward Looking	Não
Reino Unido	Revenue Cap	8 anos	Plurianual	Alta	Sim	Forward Looking	Sim
Califórnia	Revenue Cap	3 anos	Anual	Alta	Sim	Forward Looking	Não
Nova Iorque	Cost Service + PBR ¹	3 anos	Plurianual	Alta	Sim	Forward Looking	Não
Índia	Rate of Return	5 anos	Plurianual	-	Não	Backward Looking	Não
México	Rate of Return	3 anos	Anual	-	Não	Backward Looking	Não
Colômbia	Revenue Cap	5 anos	Plurianual	-	Não	Backward Looking	Não
Chile	Price Cap	4 anos	Plurianual	Alta	Não	Forward Looking	Não
Espanha	Revenue Cap	6 anos	Plurianual	Alta	Não	Forward Looking	Não
Itália	Price Cap + RoR ²	8 anos	Anual	Alta	Não	Backward Looking	Não

¹Performance Based Rate ²Rate of Return.

BENCHMARKING ESTRUTURA TARIFÁRIA

	DEMANDA (kW)		VOLUMÉTRICA (kWh)		FIXO (\$/MÊS)		EXCEDENTE REATIVO (kVAr)		TEMPORAL (kWh/kW)		POSTOS HORÁRIOS	
	BT	MT/AT	BT	MT/AT	BT	MT/AT	BT	MT/AT	BT	MT/AT	BT	MT/AT
 Alemanha	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Interr.	-	2	-
 Austrália	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	TOU	TOU	3	3
 Reino Unido	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	TOU	TOU	2/3	2/3
 Califórnia	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	TOU	TOU CPP RTP Interr.	3	3 3 - 3
 Nova Iorque	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	TOU	TOU	2	2/3
 Índia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	TOU	TOU	4	4
 México	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	TOU	-	3
 Colômbia	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	TOU	-	2
 Chile	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	TOU	TOU	2	2
 Espanha	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	TOU	TOU	2/3	6
 Itália	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	TOU	-	3	-

(TOU) = Time of Use, (CPP) = Critical Peak Pricing, (RTP) = Real Time Pricing e (Interr.) = Interrompível.

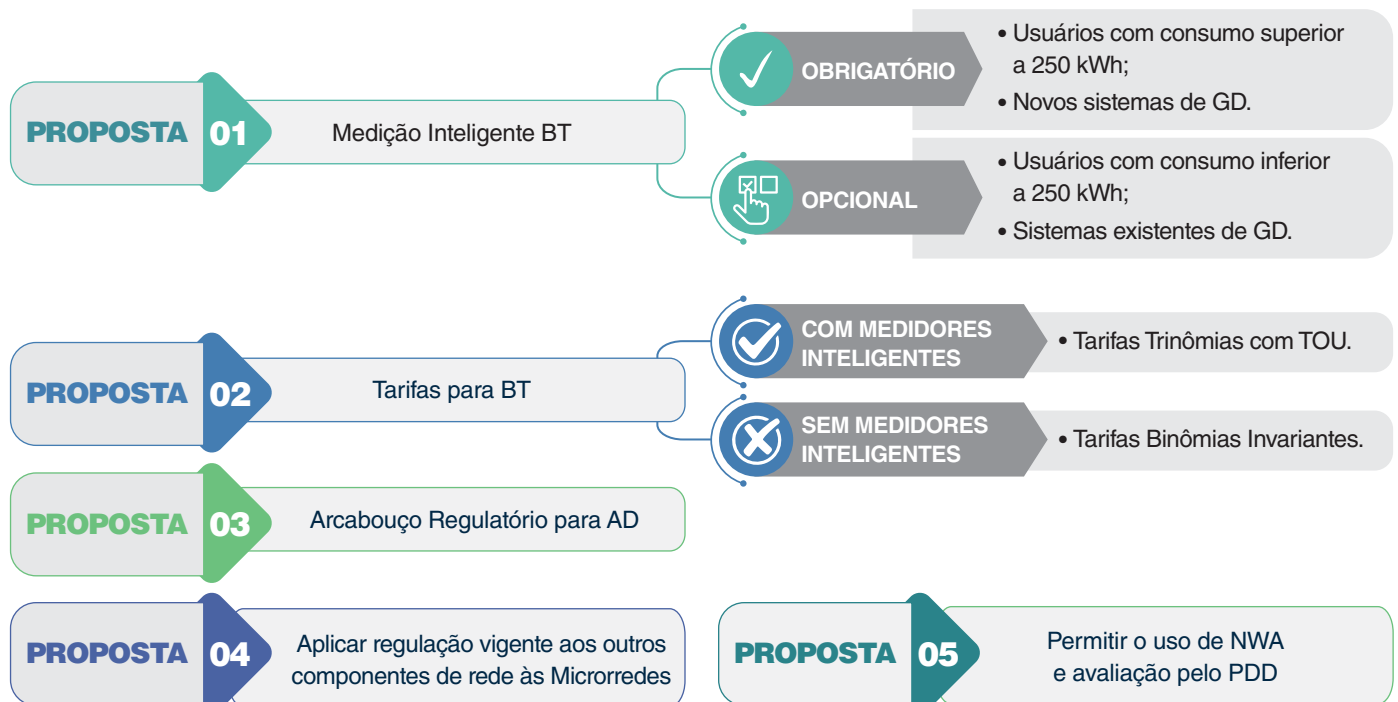


► Os modelos regulatórios levantados pela experiência internacional foram analisados através de uma análise multicritério, conforme parâmetros abaixo, para avaliação do potencial impacto e barreiras de adoção no Brasil.

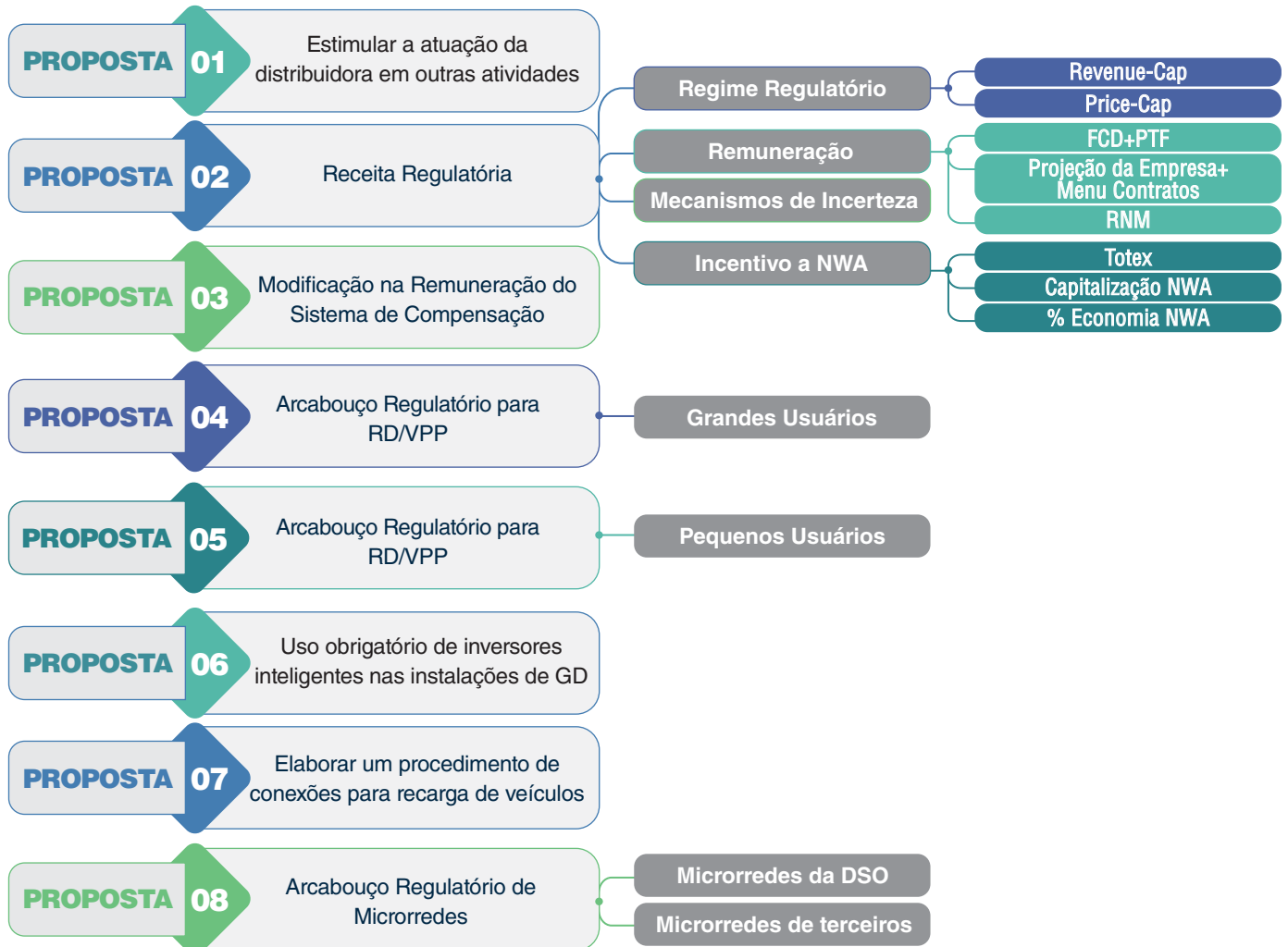


São sugeridas propostas em horizontes de curto, médio e longo prazo de acordo com as características do SEB, as barreiras legais, regulatórias e a distância/esforço para sua implementação.

PROPOSTAS DE CURTO PRAZO (1 A 5 ANOS)

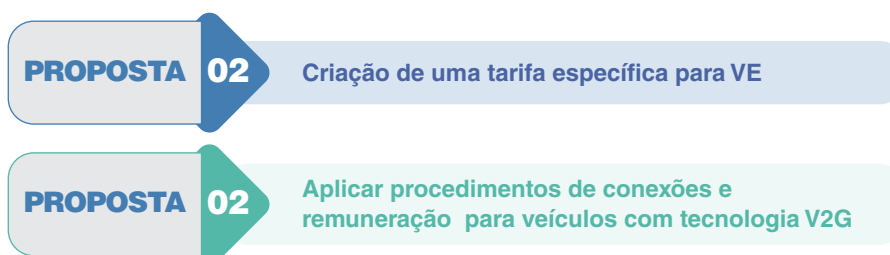


PROPOSTAS DE MÉDIO PRAZO (6 A 10 ANOS)



* **RNM:** Network Reference Model
FCD: Fluxo de Caixa Descontado | **PTF:** Produtividade Total dos Fatores

PROPOSTAS DE LONGO PRAZO (11 A 15 ANOS)



As principais barreiras para adoção das propostas requerem adaptações no PRODIST e PRORET, criação de regulamentações e mercados, roll-out de medidores inteligentes e pode levar a mudanças no contrato de concessão.



- ▶ Somada à necessidade de adequações regulatórias, a crescente difusão de REDs torna importante a avaliação dos impactos destes recursos (custos e benefícios) e valoração de seus impactos no sistema.
- ▶ Através da revisão da literatura avaliam-se os custos decorrentes da presença e viabilização de REDs, assim como os benefícios proporcionados pelos serviços e atributos que os recursos distribuídos podem fornecer ao sistema elétrico. Os serviços que podem ser providos pelos REDs são:

	Energia	Capacidade	Regulação de Tensão	Regulação de Frequência	Reserva Operativa	Black-Start	Confiabilidade Resiliência	Redução das Perdas	Flexibilidade	Redução de emissão
 Resposta da Demanda	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
 Geração Distribuída	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓
 Armazenamento Distribuído	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
 Veículo Elétrico	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓	✓

▶ **Legenda:**



Indica que o RED provê o serviço



Existe a possibilidade de o RED prover o serviço



O RED não é capaz de prover o serviço



Não foram identificadas referências na literatura

- ▶ A análise do impacto dos REDs dependerá dos dados e ferramentas disponíveis.
- ▶ Diferentes *framework* de análise dos benefícios/custos poderá resultar na valoração do impacto do RED de forma distinta. Alguns métodos para quantificação dos impactos dos REDs, de acordo com a literatura, por ordem crescente de dificuldade são destacados, conforme os serviços prestados.

SERVIÇO DE GERAÇÃO

- | | | |
|------------------------------------|-----------|---|
| <p>Geração evitada simples</p> | <p>01</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Assume que RED desloca gerador mais caro do sistema • Melhor aplicado em sistemas termelétricos em que se possui o custo do combustível de forma direta. |
| <p>Geração evitada composta</p> | <p>02</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Assume que RED desloca um mix de geradores marginais. |
| <p>Preço do Mercado Atacadista</p> | <p>03</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Benefício dos REDs calculados com base no preço do mercado atacadista. • Uso de dados históricos do preço marginal locacional ou preço de energia marginal do sistema. |
| <p>Despacho Simples</p> | <p>04</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Avalia o sistema com e sem o RED, sem considerar qualquer restrição. |
| <p>Simulação da operação</p> | <p>05</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Simulação completa da operação do sistema com cálculo do benefício econômico. |

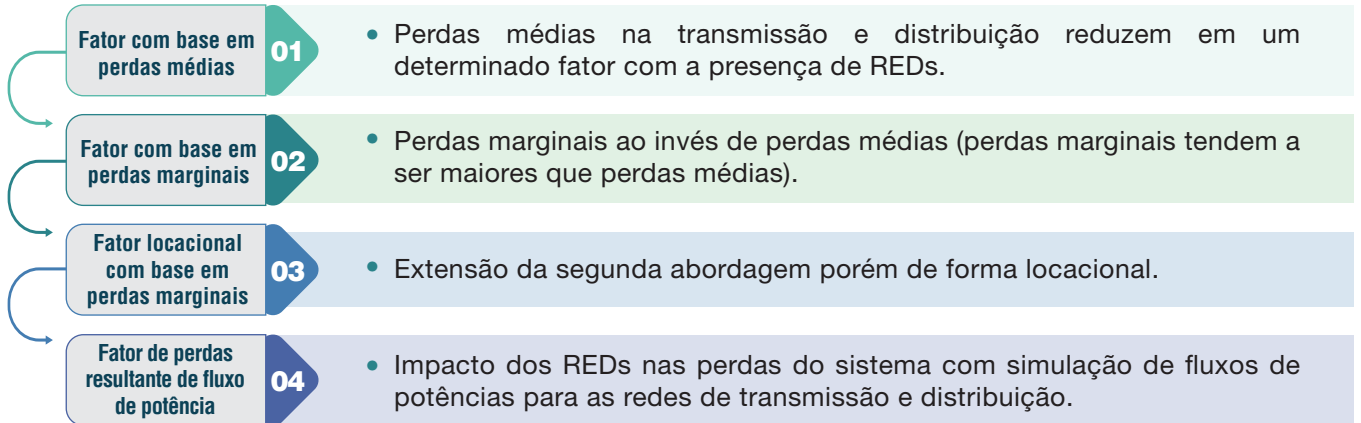
SERVIÇO DE TRANSMISSÃO

- | | | |
|---|-----------|--|
| <p>Método simples baseado em custo evitado</p> | <p>01</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Estima relação entre: expansão da transmissão e aumento de carga. • Estima aumento de demanda possivelmente evitado com REDs. • Estima possível custo evitado em infraestrutura de rede de transmissão. |
| <p>Método baseado em diferença de custo marginal</p> | <p>02</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Diferença dos custos marginais locacionais obtidos por simulação com e sem a presença de REDs. |
| <p>Planejamento da expansão da transmissão</p> | <p>03</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Planejamento do sistema de transmissão considerando um cenário sem o RED e outro com o RED. |
| <p>Planejamento Geração-Transmissão (Co-otimização)</p> | <p>04</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ferramenta de co-otimização de expansão do sistema de geração e transmissão, com REDs entre non-wire alternatives. |

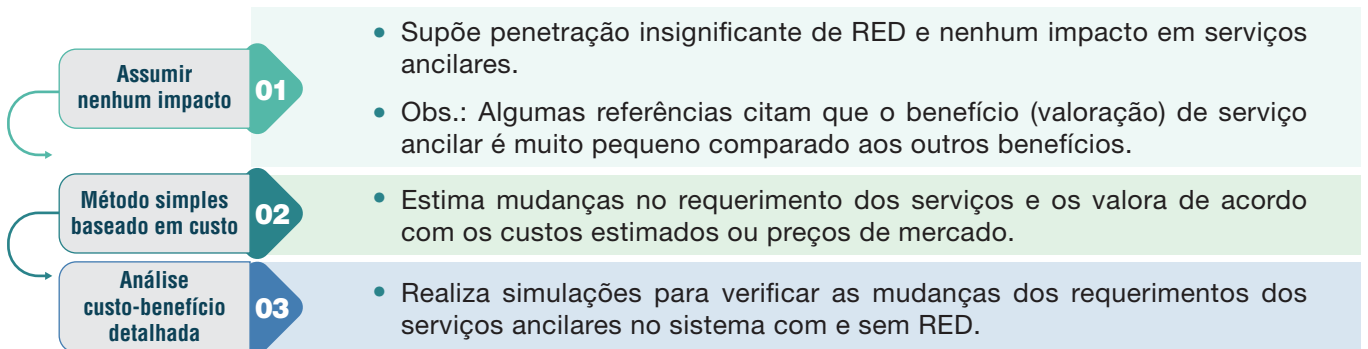
SERVIÇO DE DISTRIBUIÇÃO

- | | | |
|------------------------------------|-----------|---|
| <p>Impacto na demanda de ponta</p> | <p>01</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Impacto dos REDs na demanda de ponta com avaliação na possibilidade de postergação de investimento. |
| <p>Planejamento da Expansão</p> | <p>02</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Modelos de otimização da expansão da distribuição com comparação da necessidade de investimentos para diferentes cenários de penetração de RED. |

SERVIÇO DE PERDAS TÉCNICAS

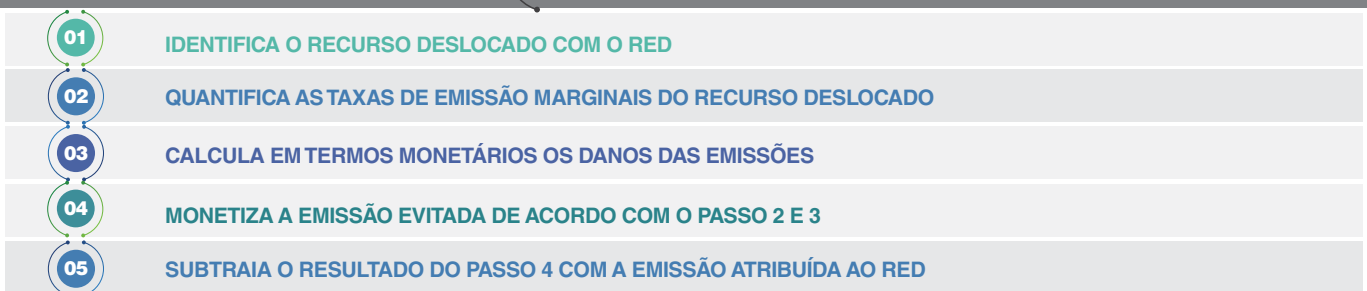


SERVIÇO ANCILARES

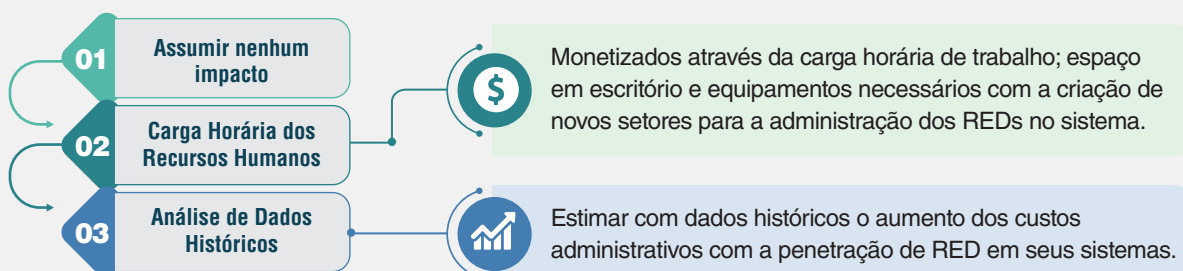


CUSTOS AMBIENTAIS

Principal aspecto levado em consideração nos *frameworks* são as emissões



CUSTOS ADMINISTRATIVOS



ABORDAGEM DE DIFUSÃO EXÓGENA

► As alternativas de difusão exógena podem decompor-se em mercado potencial e dinâmica de difusão.



O MERCADO POTENCIAL TEM COMO FOCO APRESENTAR ESTIMATIVAS DE LONGO PRAZO.



A MODELAGEM DE DINÂMICA DE DIFUSÃO COLOCA EM FOCO O PROCESSO EM SI E COMO OS AGENTES ADOTAM A INOVAÇÃO AO LONGO DO TEMPO.

► Para classificar as metodologias adota-se uma taxonomia em que o eixo horizontal é baseado na necessidade de dados e eixo vertical baseado no detalhe das informações.

MODELAGEM MERCADO POTENCIAL

01

- + Robusto
- Alta dependência de dados e pode levar a overfit

02

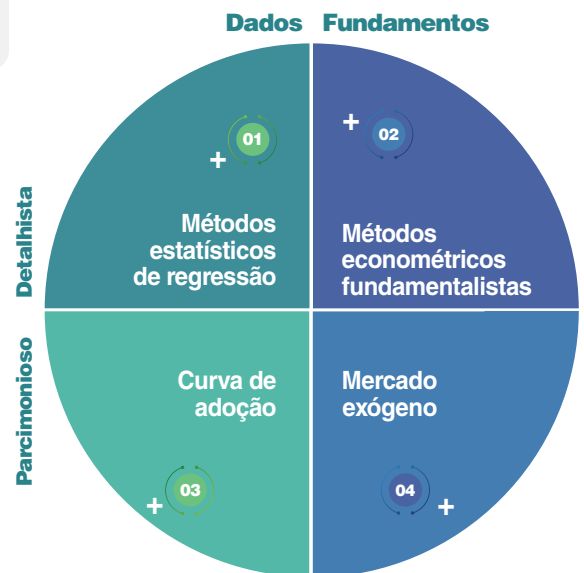
- + Ampla aplicabilidade
- Alta dependência de dados e pode levar a overfit

03

- + Podem melhor capturar atratividade dos REDs
- Dependência de dados para calibração do modelo

04

- + No início da difusão, indicador inicial para o mercado
- Por não ter muito respaldo em dados, hipóteses devem estar bem fundamentadas



MODELAGEM DINÂMICA DE DIFUSÃO

05

- + Aplicabilidade em projeções no curto prazo
- Sujeito à indisponibilidade de dados

06

- + Possível modelar sistemas simples e complexos
- Necessário ter boa especificação dos "subsistemas"

07

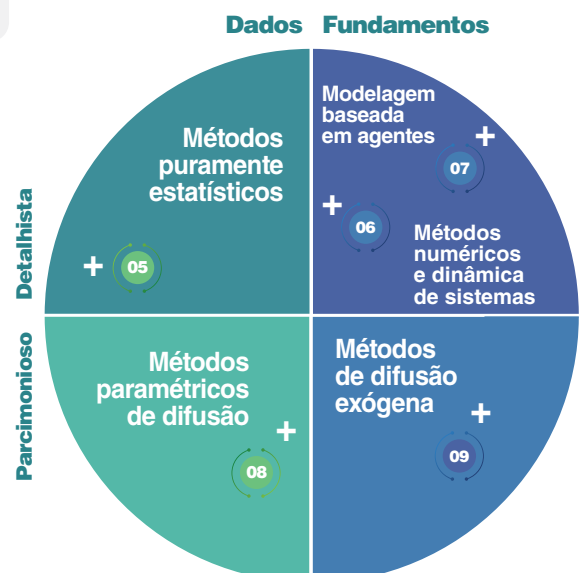
- + Versátil
- Depende de grande número de parâmetros a serem ajustados

08

- + Equilíbrio na dependência de dados e fundamentos.
- A calibração dos parâmetros de REDs deve adaptar-se ao contexto socioeconômico do país

09

- + Adequado quando não há dados suficientes.
- Requer acompanhamento com a realidade para sua validação



ABORDAGEM DE DIFUSÃO ENDÓGENA

► Neste trabalho avaliaram-se, pelo levantamento do estado da arte, abordagens de difusão endógena dos REDs. Alguns aspectos contemplados nos modelos e estudos são destacados na tabela a seguir.

	Planejamento em Multi Etapas	Representação de incertezas (geração renovável)	Rede de Transmissão	Rede de Distribuição	Perda Técnica	Trade-off entre recurso centralizado e distribuído
Modelo Gen X (desenvolvido pelo MIT)	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Modelo Open Source Energy Modelling System (OSeMOSYS)	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Planejamento em micro redes	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Modelo Whole-Electricity System Model (WeSIM)	✗	✓	✓	✓	✗	✓
Planejamento da Expansão Robusta da Distribuição	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Planejamento Integrado (Hawaii)	✓	✗	✓	✓	✓	✓

► **Legenda:**



Indica que é representado no método ou estudo



Indica que de alguma maneira o aspecto é contemplado/representado pelo método ou estudo.



Não é representado



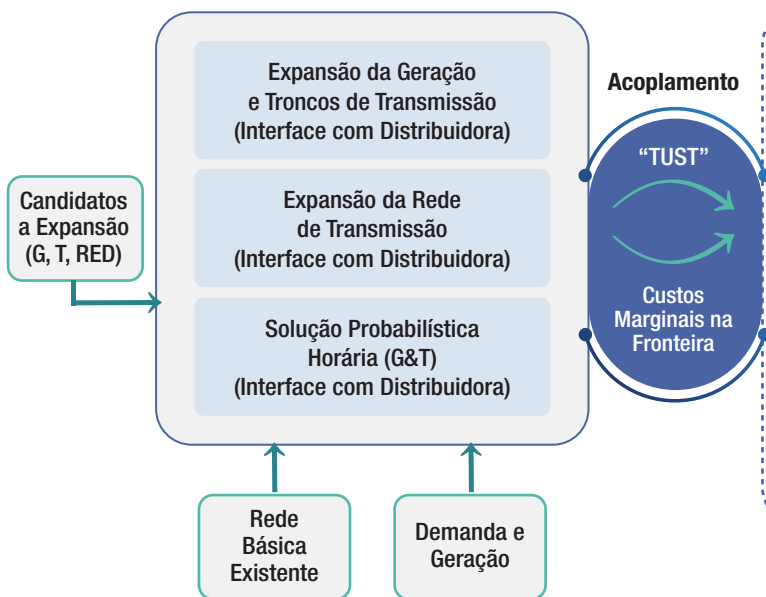
► REDs podem prover atributos similares a fontes centralizadas, ao mesmo tempo que podem requerer outros serviços do sistema, impactando no planejamento da expansão. As abordagens endógenas permitem capturar a dinâmica do impacto da difusão dos REDs no modelo centralizado.

► Por isso propõe-se uma **Metodologia Integrada de Planejamento de Expansão Endógena**.

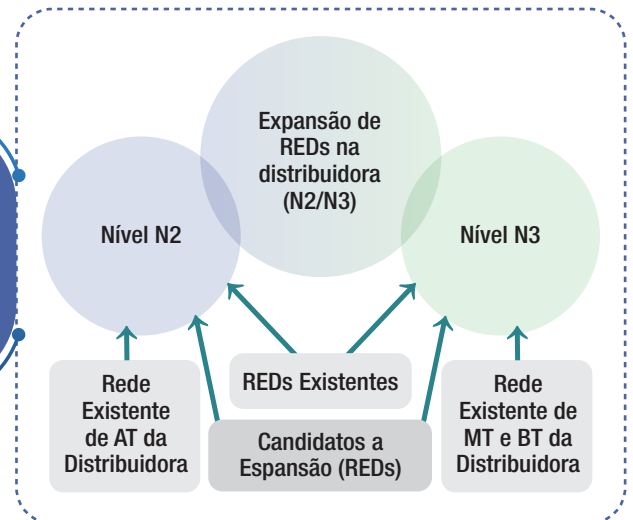
► O método de expansão proposto caracteriza-se por considerar os REDs de forma **endógena** (exceto VE), ser hierárquico, iterativo em três níveis (N1, N2 e N3):

- N1: sistema de Geração e Transmissão (G&T) - Rede Básica (RB);
- N2: sistema de Alta Tensão da Distribuidora (ATD)
- N3: sistema de Distribuição Primária e Secundária (DPS) que abrange as redes nos níveis de Média e Baixa tensão da distribuidora.

NÍVEL N1 - REDE BÁSICA



NÍVEL N2/N3 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO



	N1	N2 / N3
	Expansão Hierárquica G&T	Co Otimização: Importar recursos do N1 e investir no N2/N3
RED	<ul style="list-style-type: none"> • Endógeno: AD e RD 	<ul style="list-style-type: none"> • Endógeno: GD (FV, EOL, CGH, UTE), AD • Exógeno: VE
REDE	<ul style="list-style-type: none"> • Representação Detalhada da Rede de Transmissão • Expansão da RB • Representação de perdas 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de Representação da Rede de Distribuição • Não contempla expansão da infraestrutura da rede • Representação de perdas

PROPOSTA DE METODOLOGIA

► A metodologia proposta possui um diferencial frente aos métodos reunidos através da revisão da literatura uma vez que permite contemplar todos os aspectos na análise de difusão endógena dos REDs.

	Planejamento em Multi Etapas	Representação de incertezas (geração renovável)	Rede de Transmissão	Rede de Distribuição	Perda Técnica	Trade-off entre recurso centralizado e distribuído
Método Proposto	✓	✓	✓	✓	✓	✓

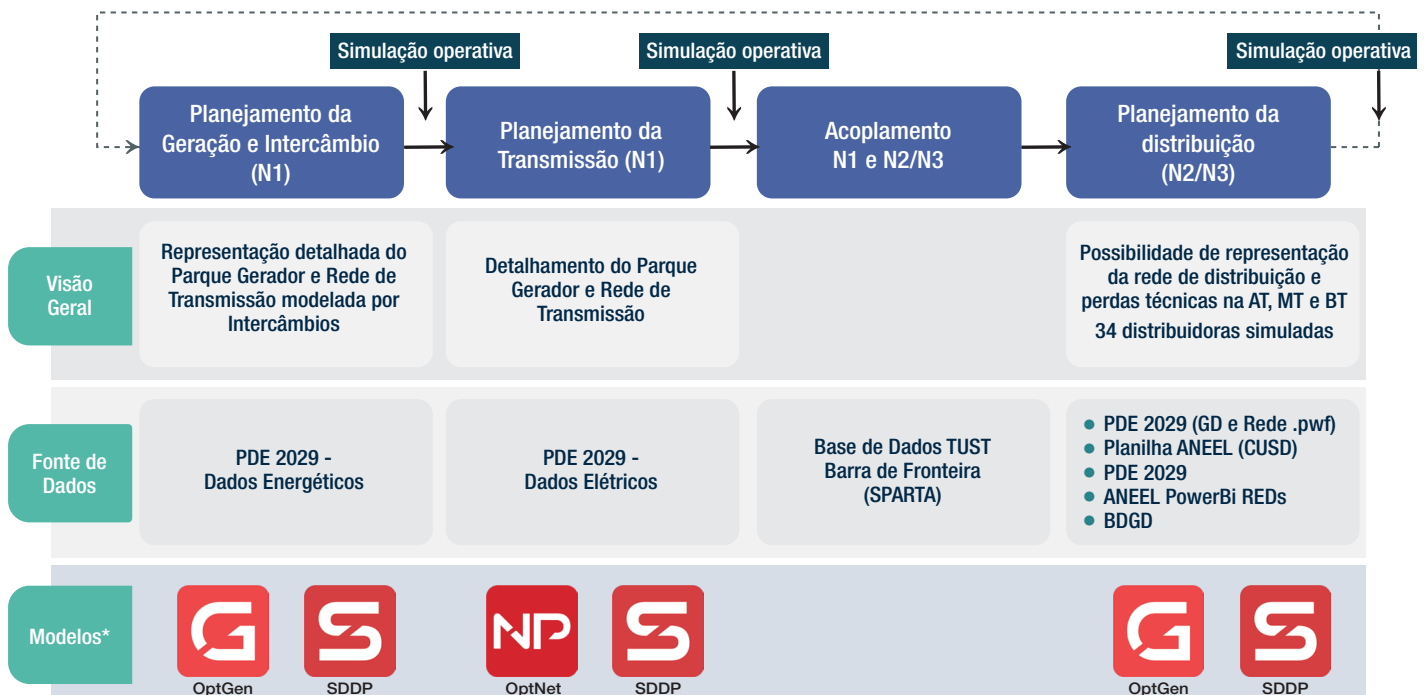
► O processo N1-N2/N3 deve ser repetido por algumas iterações até que a convergência seja atingida. Na metodologia proposta busca-se um equilíbrio entre os problemas N1 e N2/N3, de forma que o problema decomposto alcance a mesma solução do problema integrado original.

► Para o critério de convergência utiliza-se a capacidade instalada de REDs. Assim, quando se obtém uma solução em que a expansão de REDs entre duas iterações consecutivas não se altera atingiu-se o ótimo global (expansão que minimiza os custos totais).

ESTUDO DE CASO

► Com o objetivo de validar e elucidar a metodologia proposta foi proposto um Estudo de Caso no horizonte 2030-2035, considerando a base de dados do PDE 2029 como ponto de partida para a representação do sistema de G&T. Para o sistema de distribuição simulam-se individualmente 34 distribuidoras do Brasil.

► Na imagem a seguir indicam-se as fontes de dados e informação do estudo de caso, premissas e modelos considerados na simulação.

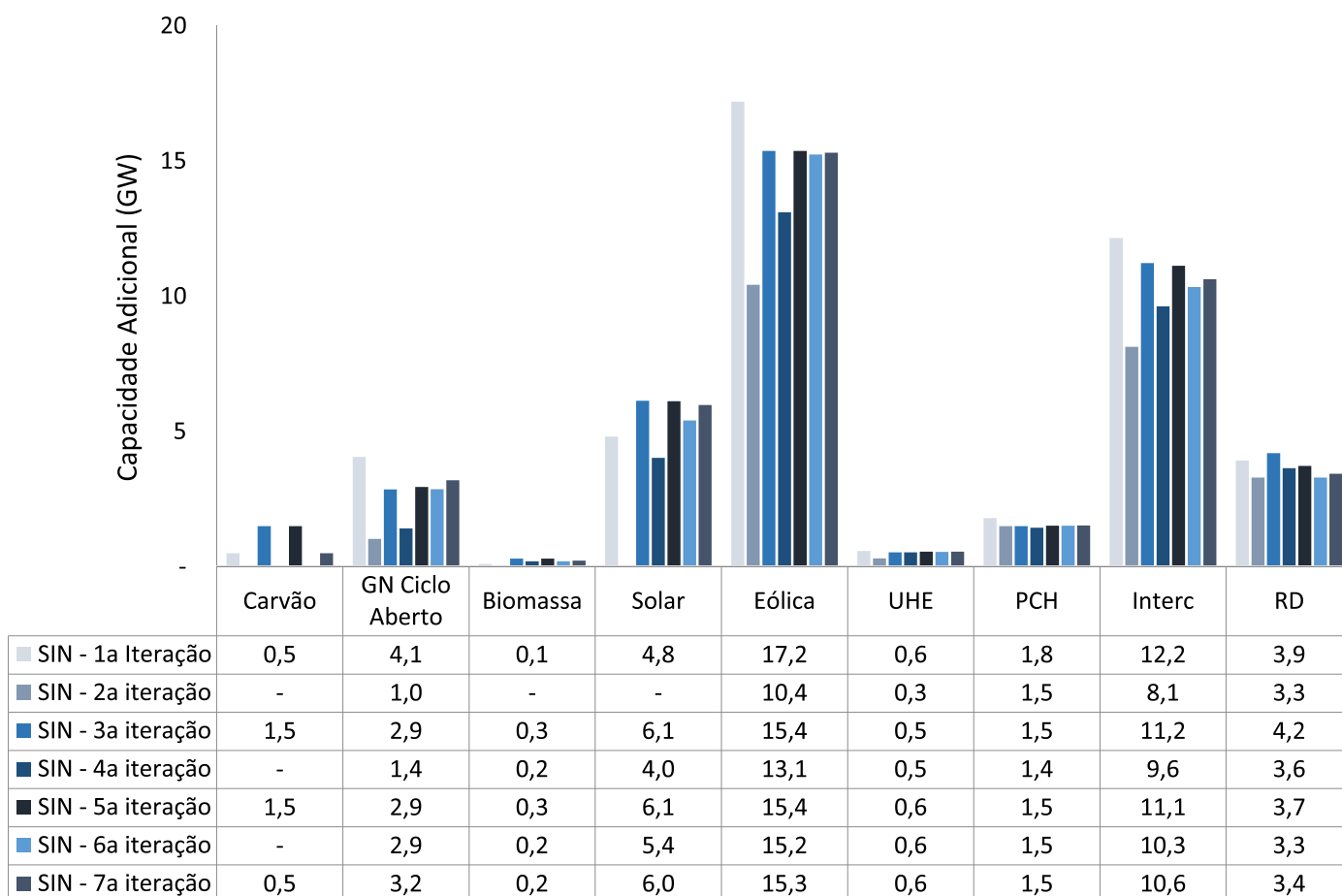


*Todos os modelos são desenvolvidos e comercializados pela PSR.

► Os REDs podem prover atributos similares a fontes centralizadas, ao mesmo tempo que podem requerer outros serviços do sistema, impactando o planejamento e expansão centralizada.

► Ao longo dos resultados das iterações é possível observar o impacto da expansão de geração distribuída (N2/N3) no planejamento da geração e transmissão e os efeitos na necessidade de novos recursos e infraestrutura no longo prazo (N1).

EXPANSÃO DA GERAÇÃO E INTERCONEXÃO (N1) ANO: 2030-2035



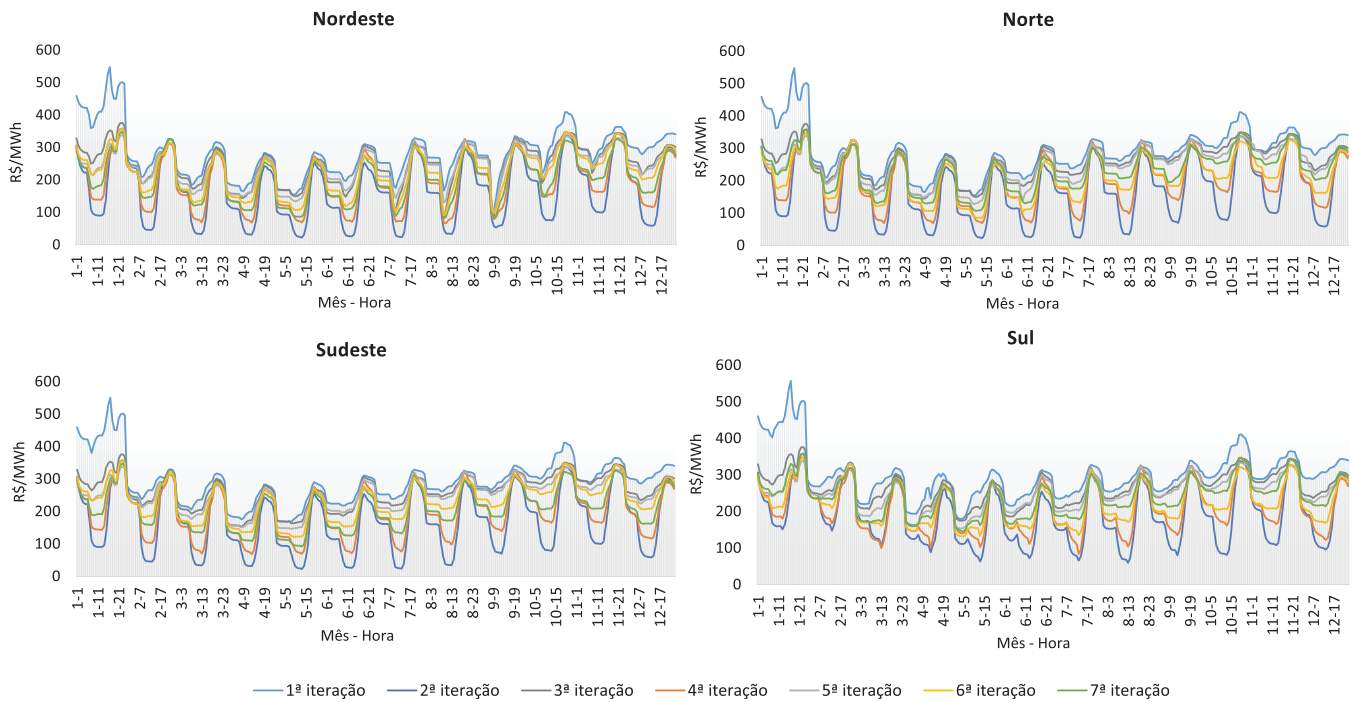
- Na 1ª iteração, não existem REDs no horizonte de estudo (2030-2035). Por isso a tendência é que na 1ª iteração haja maior investimento em recursos centralizados e interconexões.



- Em todas as iterações (exceto na 2ª), entre os recursos de geração, a fonte com maior expansão, em GW, é a eólica, seguida pela solar.
- Destaca-se também a expansão do recurso Resposta da Demanda.

► Em seguida, de acordo com a metodologia, simula-se a operação hidrotérmica horária do sistema que permite obter os Custos Marginais de Operação, que junto com a TUST são utilizados para acoplamento entre os níveis N1 e N2/N3.

CUSTO MARGINAL DE OPERAÇÃO MÉDIO (CMO) ANO: 2035



- Na 1ª iteração, quando não há REDs no horizonte de estudo, os CMOs médios em 2035 são mais elevados.



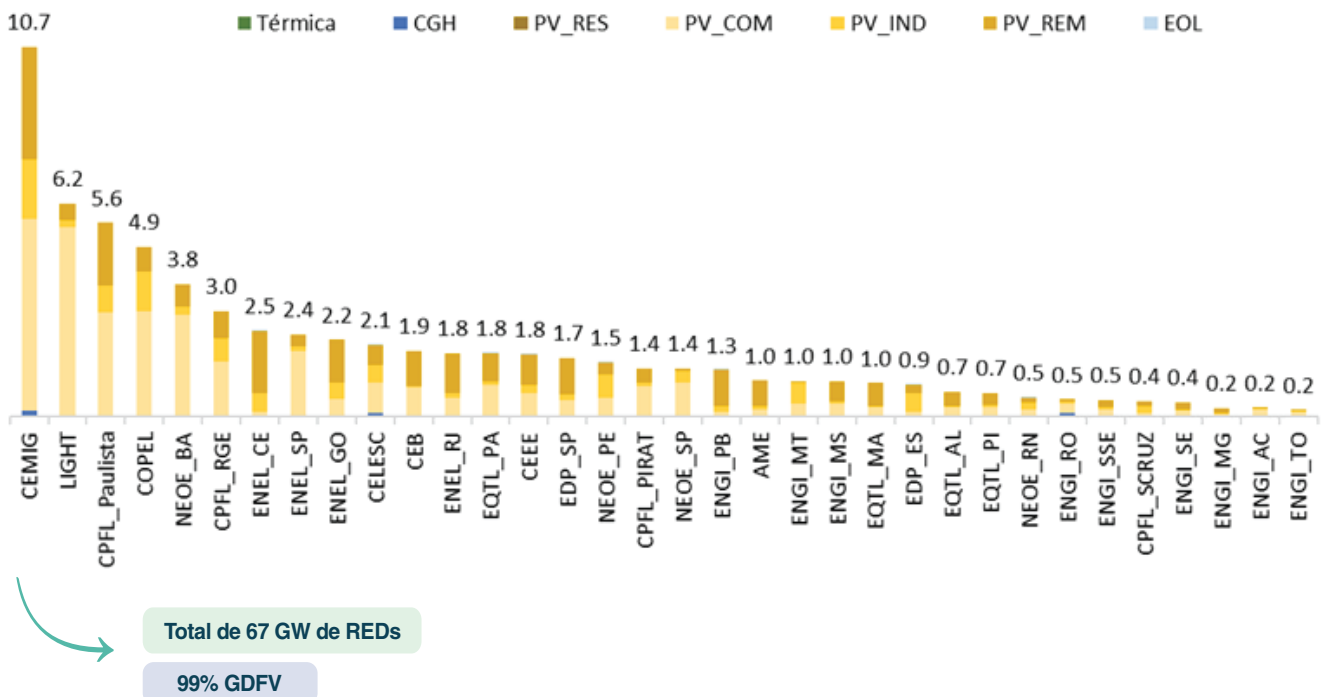
- Na medida em que há expansão de REDs no N2/N3, especialmente GDFV, observa-se redução no CMO especialmente no meio do dia (horário em que há irradiação solar).



► O planejamento da expansão do sistema de distribuição considera o trade-off de investir em novos recursos, utilizar os existentes e importar os serviços do N1.

► Maiores custos de “aquisição” do N1 estimulam a inserção de REDs. Assim, CMOs mais elevados do N1 na 1ª iteração resultam em maior expansão de REDs por distribuidora.

EXPANSÃO DA DISTRIBUIÇÃO (N2/N3) - 1ª ITERAÇÃO ANO: 2030-2035



- O processo é ITERATIVO.



- Os resultados da expansão do N2/N3 servem de input para o N1 e uma nova iteração inicia até que a convergência do método seja alcançada.

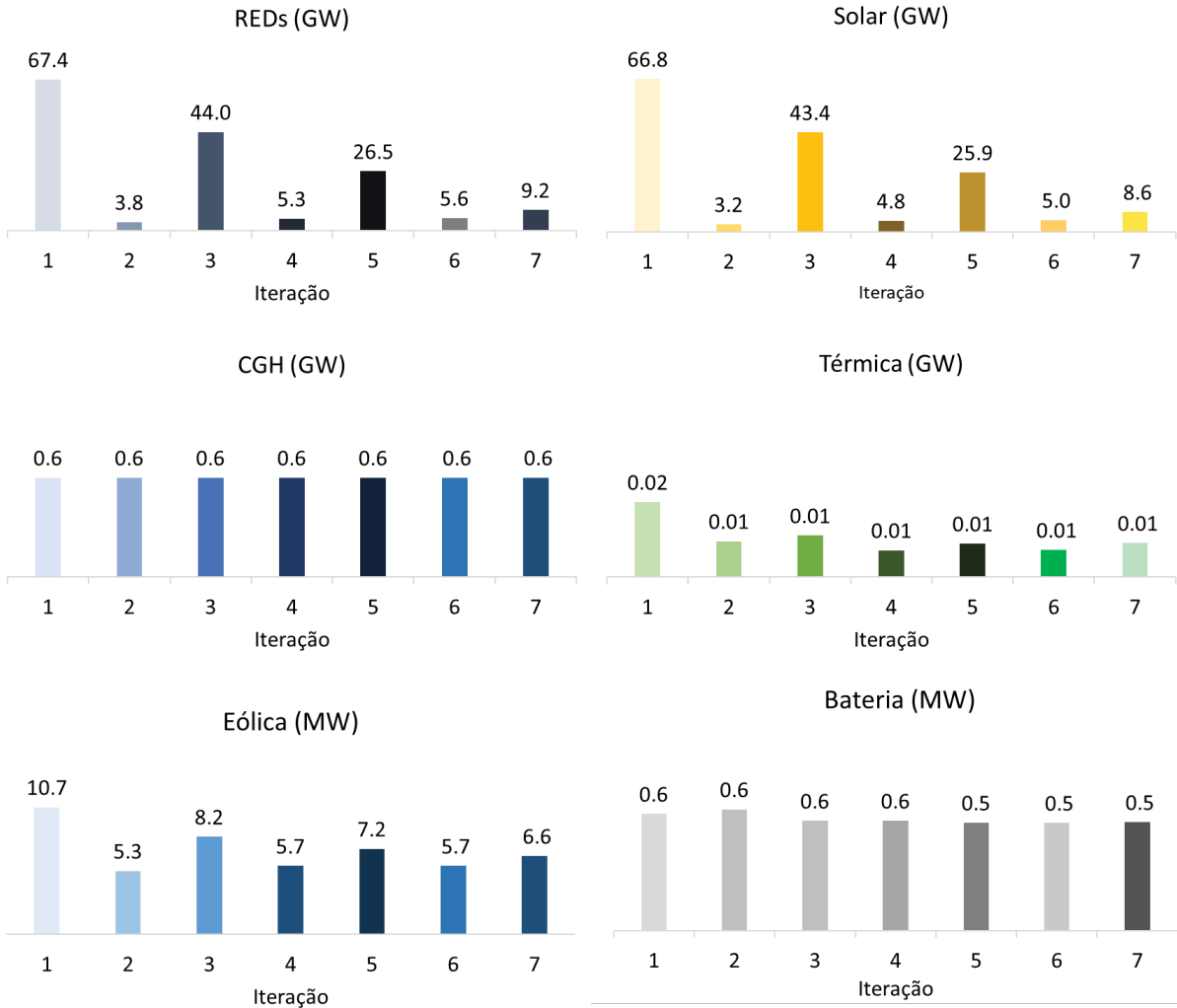


- Somente a partir da 2ª iteração que o planejamento centralizado (N1) vai visualizar a presença de REDs.

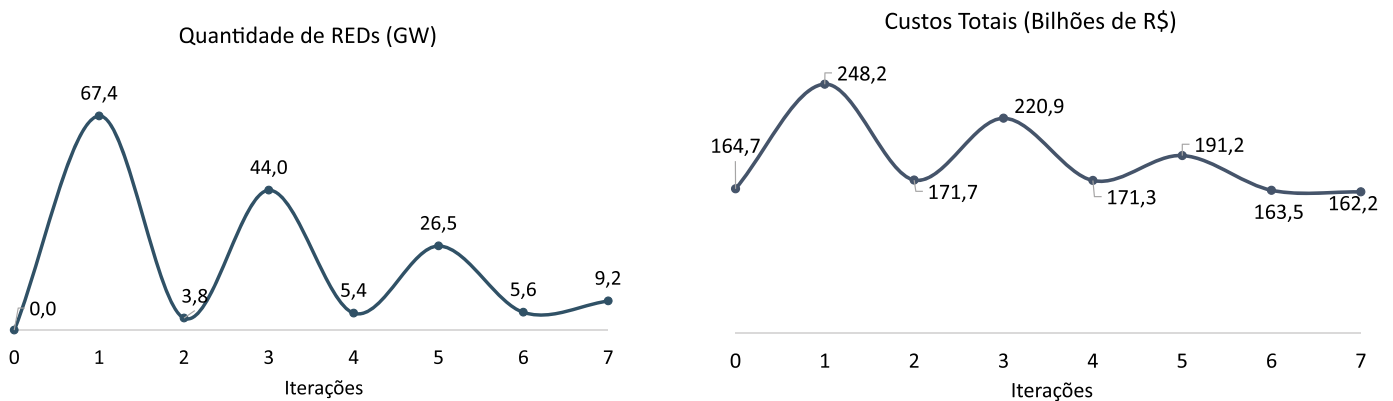


RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

EXPANSÃO ENDÓGENA DOS REDS POR FONTE | ANO: 2030-2035



CONVERGÊNCIA ANO: 2030-2035



• Realizou-se o estudo de caso até a 7ª iteração, sendo possível observar a tendência de equilíbrio da expansão dos REDs ao longo das iterações e dos custos totais.



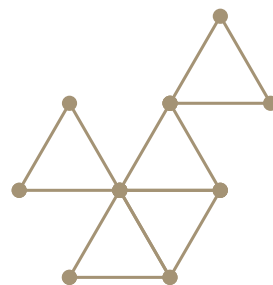
• Quanto mais iterações são simuladas, melhor é a solução encontrada.



• No limite, quando a expansão de REDs for exatamente igual de uma iteração para a outra, obtém-se a solução de equilíbrio e, portanto, a solução ótima que minimiza o custo total de expansão.



SIGLASUL
Consultores em Regulação



PSR