



EVOLUÇÃO DOS MODELOS PARA INCORPORAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS

NOVAS TECNOLOGIAS

em transmissão de energia elétrica



Jovanio Santos
Thymos Energia, Brasil
Sócio e Diretor de Novos Negócios

São Paulo, 06 de fevereiro de 2025.

CONFIDENCIAL E PROPRIETÁRIO | O conteúdo deste material pode ser citado, desde que com a devida referência

Conheça as empresas que fazem parte do grupo Thymos:

**Thymos Energia**

Apoiamos o mercado de energia com conhecimento e visão estratégica, sustentando as melhores decisões e investimentos em um setor-chave para o desenvolvimento do país.

**Nottus**

Empresa especializada em meteorologia para negócios, formada pela parceria entre a Thymos Energia. Apresenta um amplo portfólio de serviços que atende a diversos setores, como agricultura, varejo e seguros.

**Thymos Capital**

Uma empresa voltada exclusivamente aos serviços de assessoria financeira e estratégica, dedicada a toda a cadeia do setor elétrico. Atendemos companhias como geradoras, transmissoras, distribuidoras e comercializadoras.

**wisebyte**

Empresa de tecnologia criada para tornar negócios mais eficientes através das mais modernas e sofisticadas tecnologias disponíveis no mercado. Construímos junto com nossos clientes soluções disruptivas e inteligentes que agregam valor e otimizam processos.

Conteúdo

05
SIN Brasil

09
Ciclo Hype EUA x
Brasil

10
Tecnologias e
maturidades EUA x
Brasil

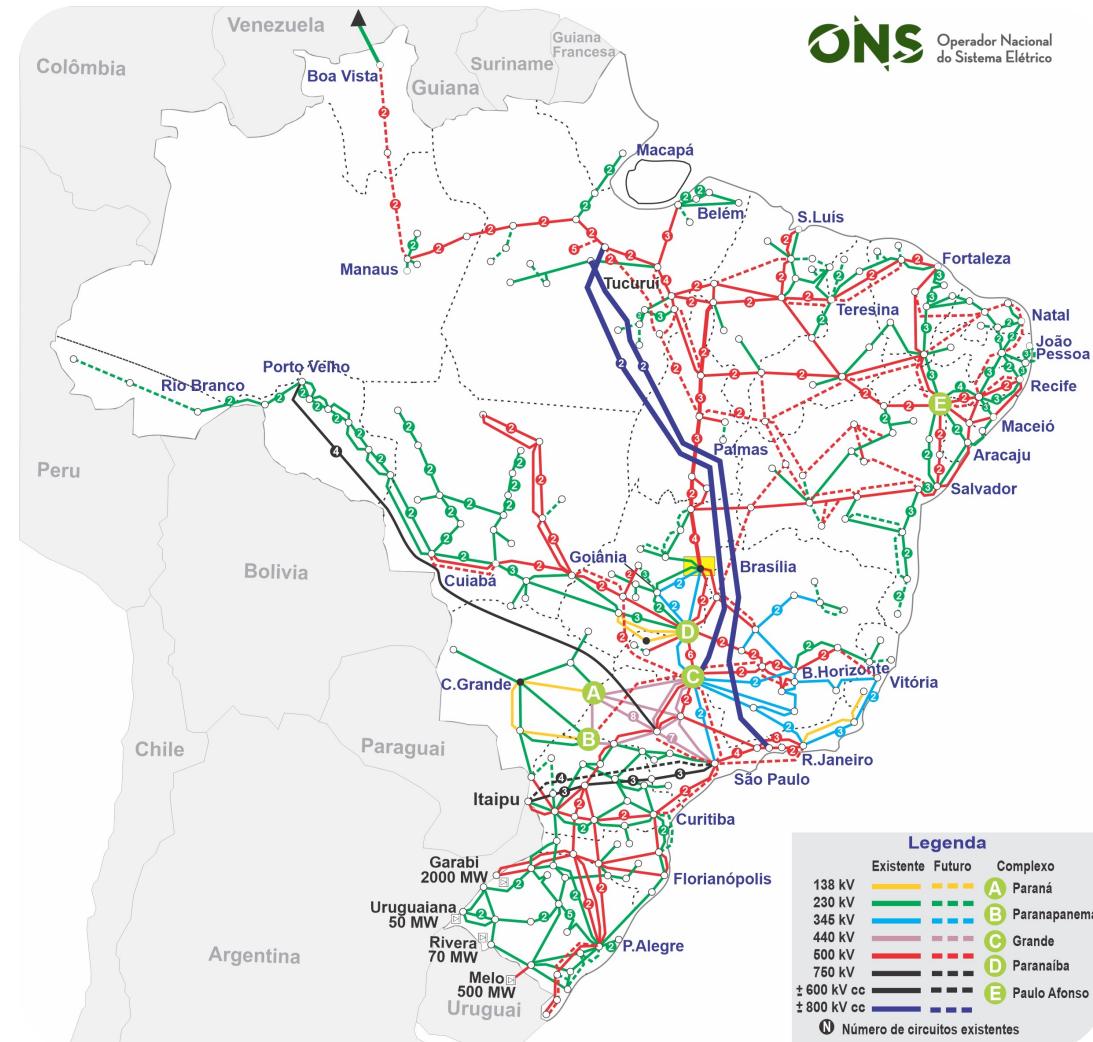
11
Modelos Regulatórios na
Transmissão

16
Eventos
Meteorológicos
Extremos

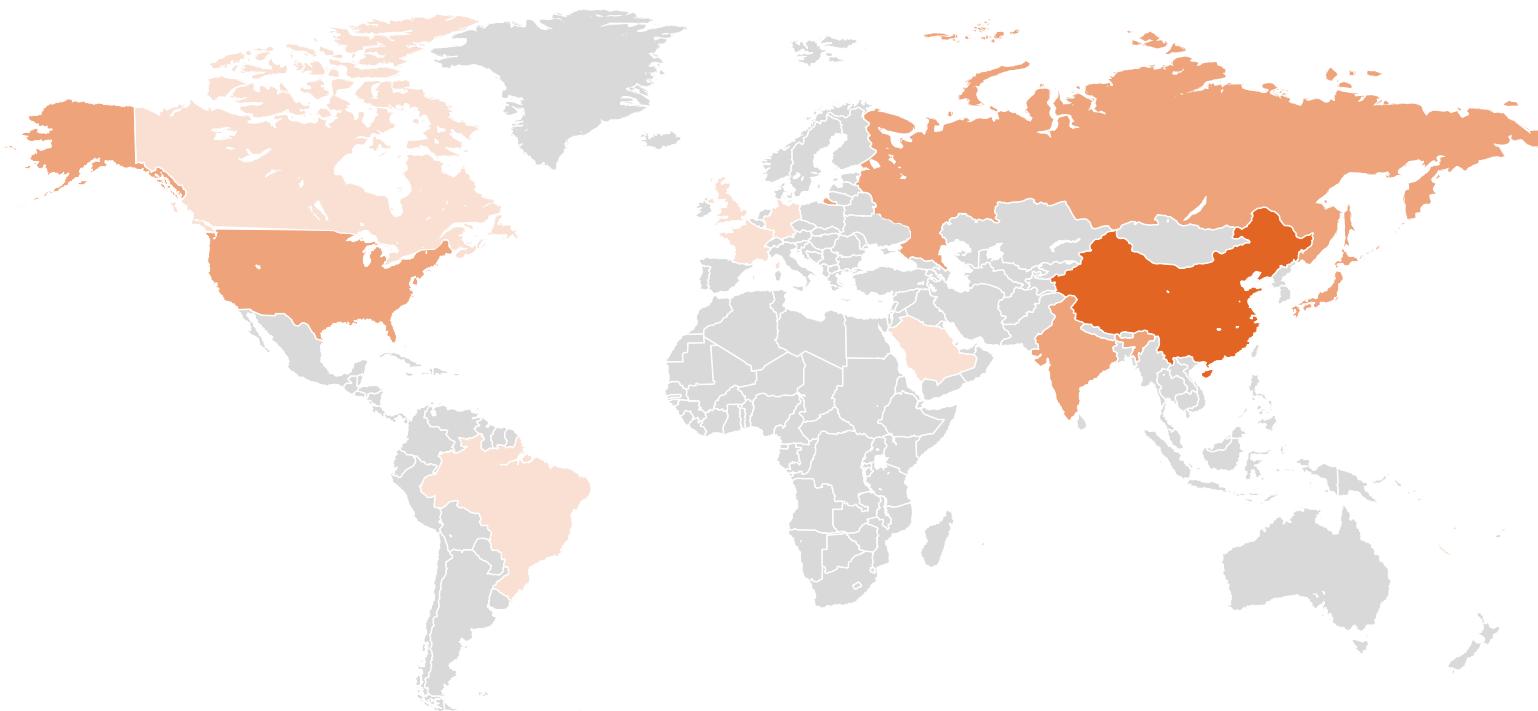
17
Teaser Projeto
P&D

18
Takeways

Brasil: top-10 PIB, com um ambiente de negócios dinâmico...



... sendo o 8º maior mercado de energia do mundo, com 87 milhões de clientes e receita anual de energia estimada em 200 bilhões de reais



87 milhões
Unidades Consumidoras

61 GW
Consumo médio em 2022 (ou 532 TWh, incluindo geração distribuída)

R\$ 200 bilhões/ano
Receita estimada do consumo de energia

Fonte: Worldometer, EPE, CCEE, Thymos Energia

Consumo de Energia TWh



Novas tecnologias em transmissão de energia elétrica | 5

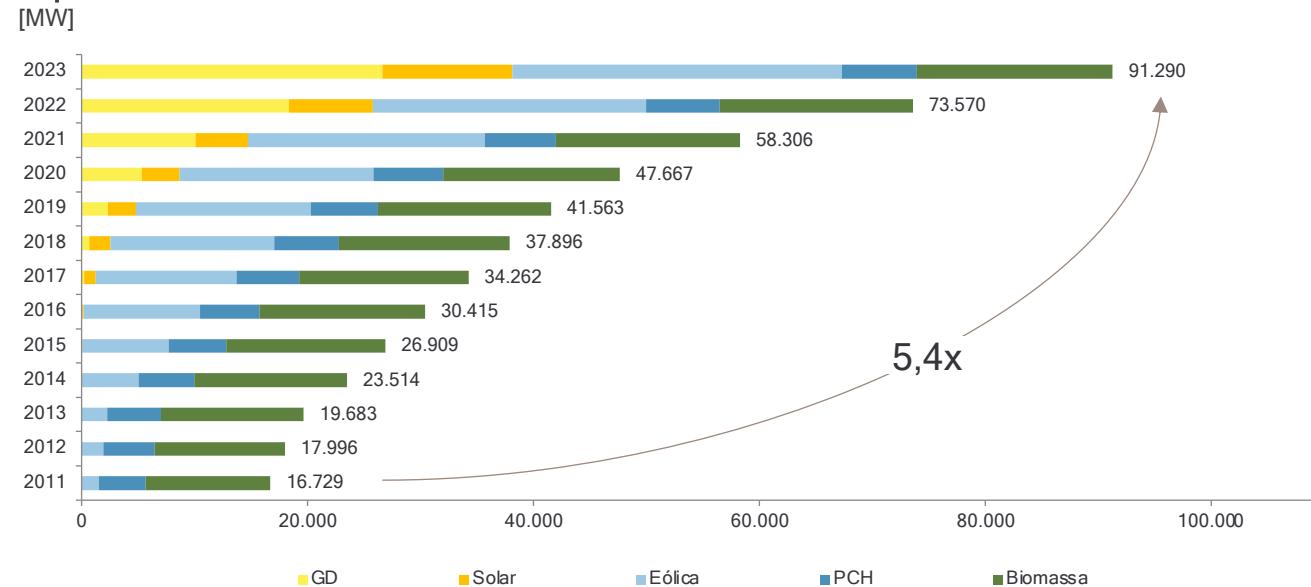
O SIN passou por várias transformações, especialmente ao longo das últimas décadas, com a utilização de novas tecnologias de geração de energia...

A alta expansão renovável tem afetado diretamente a operação dos sistemas elétricos em âmbito mundial, dada a característica naturalmente intermitente das fontes eólica e solar.

No Brasil, a adição maciça de energias renováveis desde 2010, tem apresentado desafios operacionais, especialmente em relação à volatilidade da carga líquida dada a mudança no padrão de oferta energética

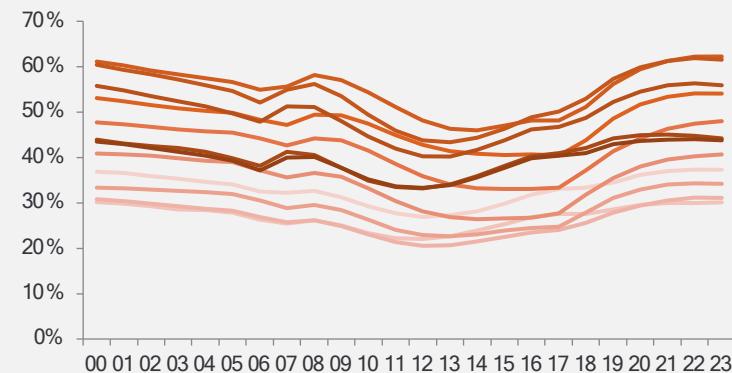
associada diretamente às fontes renováveis não controláveis e não despacháveis, principalmente a solar.

Expansão da matriz renovável brasileira

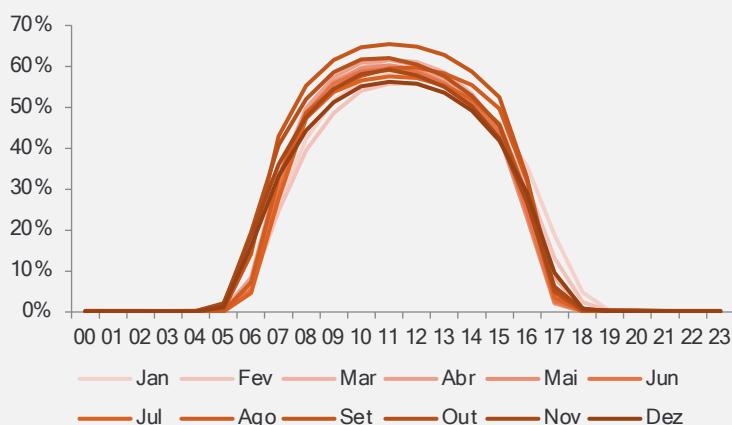


Fonte: Thymos Energia, ANEEL, CCEE

Volatilidade horária da geração eólica por mês [%]



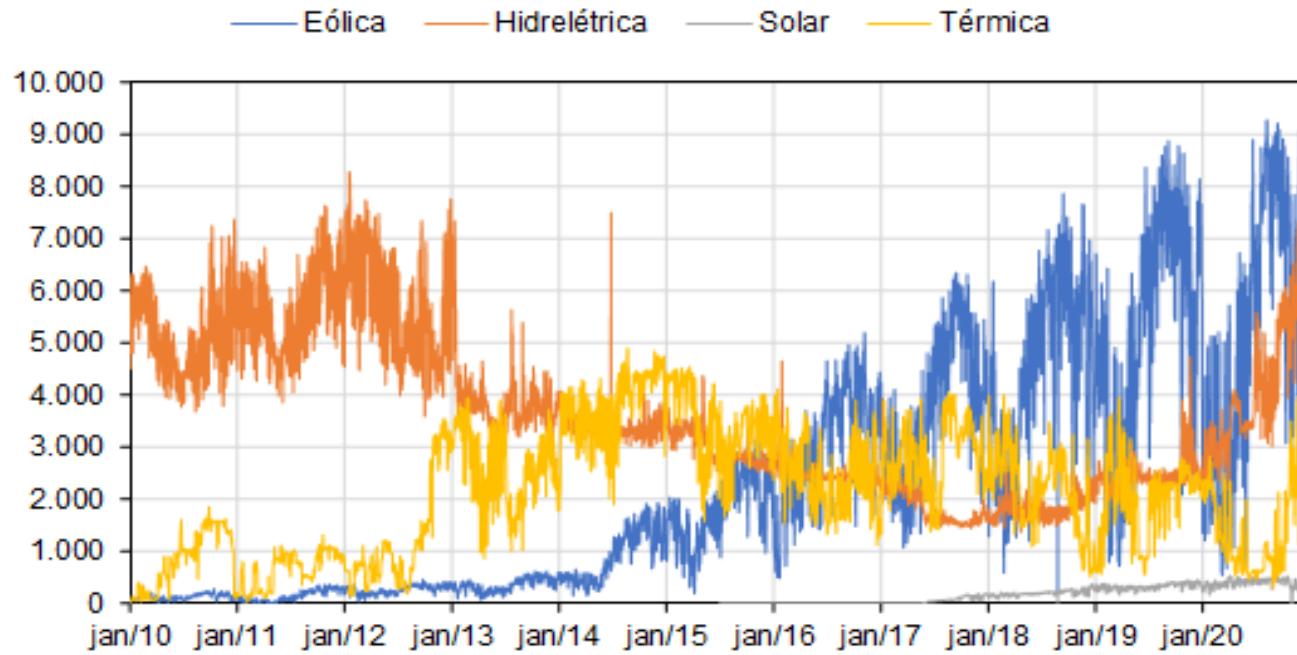
Volatilidade horária da geração solar fotovoltaica por mês [%]



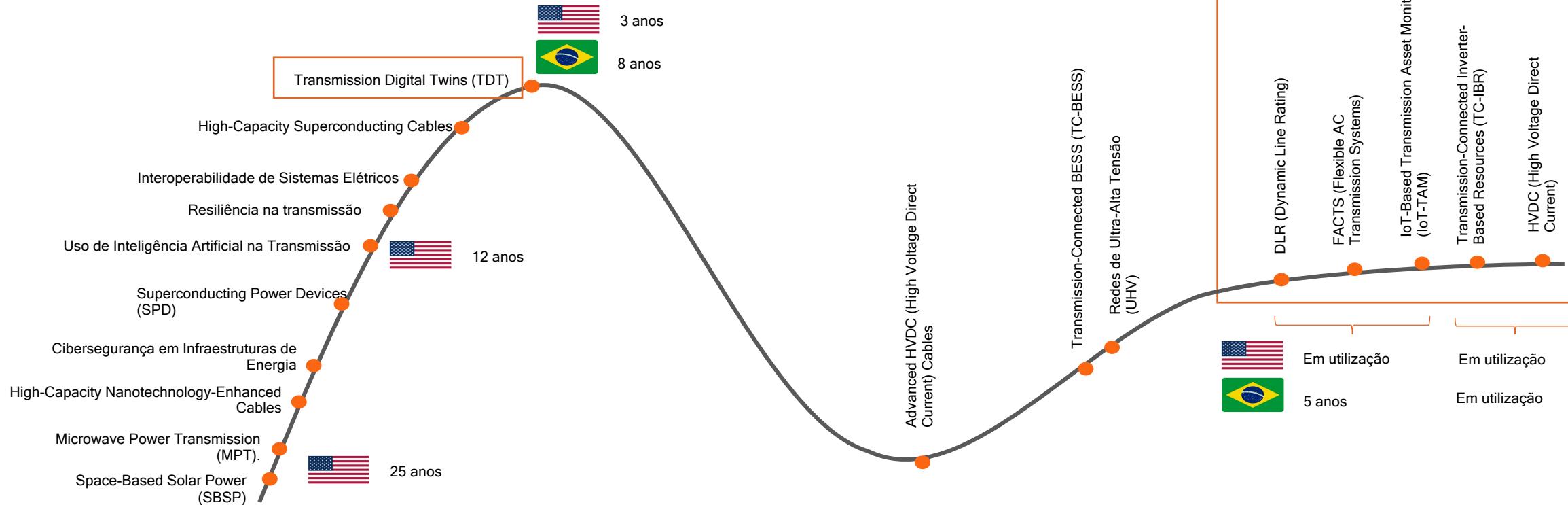


... as quais trazem consigo novos desafios operacionais, adicionando uma camada de complexidade e demando a necessidade de requisitos como inércia e flexibilidade

Mudança perfil de geração fontes de energia
[MWmed]



Tecnologias abordadas nesta apresentação: Um exercício de Ciclo Hype para tecnologias no setor de transmissão (contexto EUA vs Brasil)



- Gatilho da Inovação:** A tecnologia surge e gera interesse inicial.
- Pico das Expectativas Infladas:** O entusiasmo atinge seu auge, com expectativas exageradas.
- Vale da Desilusão:** O interesse diminui devido a dificuldades e fracassos.
- Subida do Esclarecimento:** A tecnologia amadurece e começa a ser melhor compreendida.
- Platô de Produtividade:** A tecnologia se estabiliza e é amplamente adotada.

Aplicação de tecnologias nos sistemas de transmissão e diferentes níveis de maturidade

#	Tecnologia	Descrição	Função em ativos de transmissão
1	High Voltage Direct Current (HVDC)	Sistemas de transmissão de energia que utilizam corrente contínua em vez de corrente alternada (AC), oferecendo menor perda de potência em longas distâncias.	Melhoram a eficiência na transmissão intercontinental e offshore, possibilitando integração de fontes renováveis distantes, como parques eólicos marítimos.
2	FACTS (Flexible AC Transmission Systems)	Dispositivos eletrônicos que otimizam a estabilidade, controle de potência e eficiência da transmissão em redes AC.	Melhoram a estabilidade da rede, reduzindo oscilações de tensão e maximizando a capacidade de transmissão sem necessidade de novas linhas.
3	Superconducting Cables	Cabos que utilizam materiais supercondutores para transmitir eletricidade sem perdas resistivas.	Reduzem perdas na transmissão e permitem maior capacidade de transporte de energia em corredores compactos, ideais para redes urbanas e interconexões de longa distância.
4	IoT-Based Transmission Monitoring	Sensores e dispositivos conectados que monitoram em tempo real as condições da infraestrutura de transmissão (ex.: temperatura, carga, vibração).	Permite manutenção preditiva, reduzindo falhas inesperadas, otimizando cargas e aumentando a confiabilidade da rede.
5	Transmission Digital Twins (TDT)	Modelos digitais que replicam a infraestrutura de transmissão em tempo real, usando dados de sensores e inteligência artificial.	Permitem monitoramento preditivo, simulação de falhas e otimização da operação da rede, reduzindo riscos e custos de manutenção.
6	Dynamic Line Rating (DLR)	Tecnologia que ajusta dinamicamente a capacidade de transmissão de linhas com base em condições ambientais em tempo real (ex.: temperatura ambiente, velocidade do vento).	Aumenta a capacidade de transmissão sem necessidade de novas linhas, reduzindo congestionamentos e otimizando o uso da infraestrutura existente.

Fonte: Thymos Energia a partir de diversos artigos, entre eles Ayesha, M., Numan, M., Alhussein, M., Baig, M. F., & Aurangzeb, K. (2024). Enhancing grid flexibility with coordinated battery storage and smart transmission technologies. Journal of Energy Storage, 100, 113607. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113607>



	High Voltage Direct Current (HVDC)	FACTS	IoT e DLR	TDT
	Nos EUA é utilizada em diversas interconexões interestaduais e offshore. Projetos como Pacific DC Intertie, Tres Amigas Superstation e interconexões Texas-México:	Ampla utilização PJM, ERCOT e CAISO:	Ampla utilização PJM, ERCOT e CAISO:	Em implantação:
	UHE Itaipu, Rio Madeira, Belo Monte e Xingu	Algumas subestações da CHESF e Furnas. Mas não amplamente utilizado.	Pesquisas e testes	Pesquisas

A aplicação do Performance-Based Regulation (PBR) está em debate nos EUA e Europa em intensidades diferentes. Nos EUA, a regulação ainda é baseada no modelo tradicional Cost of Service Regulation (COSR), e na Europa há um avanço maior no sentido da adoção do PBR

Historicamente, tanto nos EUA como na Europa, o modelo Cost of Service Regulation (COSR) remunera os ativos de transmissão com base nos custos operacionais e um retorno fixo sobre o capital investido. Isso incentiva investimentos em infraestrutura, mas não premia eficiência ou inovação.

No entanto, vem ganhando espaço o debate sobre a aplicação do Performance-Based Regulation (PBR) nos ativos de transmissão.

A Performance-Based Regulation para transmissão busca premiar desempenho, eficiência e inovação, criando incentivos para redução de perdas na transmissão, aumento da

resiliência, otimização da capacidade da rede e automação.

Por exemplo, o PBR tem uma melhor aderência ao inventivo de adoção de novas tecnologias para endereçar certas questões, como:

- Redução de perdas na transmissão: ex.: uso de cabos supercondutores;
- Resiliência da rede: ex.: FACTS
- Uso otimizado da capacidade da rede: Dynamic Line Rating - DLR.
- Digitalização e automação ex: IoT-based monitoring, Digital Twins.

#	Característica	Cost-of-Service Regulation (COSR)	Performance-Based Regulation (PBR)
		<i>Previsível e seguro, mas não incentiva inovação e eficiência</i>	<i>Promove eficiência e inovação, mas pode aumentar os riscos financeiros para as empresas.</i>
1	Base da Regulação	Custos incorridos pela concessionária	Desempenho e eficiência operacional
2	Ajuste de Tarifas	Revisão periódica com base nos custos declarados e aprovados pelo regulador	Tarifas ajustadas de acordo com indicadores de desempenho e metas de eficiência
3	Incentivo à Eficiência	Baixo - incentiva investimentos em infraestrutura, mas não necessariamente eficiência operacional	Alto - promove inovação e redução de custos através de metas de desempenho
4	Retorno sobre Investimento	Garantido - definido pelo regulador com base nos custos	Variável - baseado no cumprimento de metas de qualidade e eficiência
5	Foco Regulatório	Recuperação dos custos da empresa e um retorno justo sobre capital investido	Incentivar melhoria na qualidade do serviço e inovação tecnológica
6	Riscos para as Empresas	Baixo - qualquer custo adicional pode ser repassado aos consumidores	Maior - há risco financeiro caso metas de desempenho não sejam atingidas

No modelo PBR as tarifas de transmissão não seriam determinadas apenas pelos custos, mas sim por indicadores de desempenho e eficiência

No modelo COSR: A concessionária apresenta seus custos operacionais e de investimento ao regulador (ex: FERC nos EUA, ENTSO-E na Europa).

O regulador define uma tarifa baseada nesses custos, garantindo um retorno fixo sobre os investimentos.

O modelo não incentiva a eficiência operacional, pois empresas podem ser compensadas por gastos ineficientes.

No modelo PBR: As tarifas não são determinadas apenas pelos custos, mas sim por indicadores de desempenho e eficiência.

Há incentivos financeiros para inovação, como o uso de HVDC, Digital Twins, cabos supercondutores e FACTS. Empresas são recompensadas se conseguirem reduzir custos e melhorar a confiabilidade da rede.

#	Característica	Cost-of-Service Regulation (COSR)	Performance-Based Regulation (PBR)
1	HVDC (High Voltage Direct Current)	Regulada como qualquer outro ativo físico, sem incentivos específicos	Pode receber incentivos adicionais se aumentar a eficiência da transmissão
2	Digital Twins	Não há incentivos para implementação	Incentivos baseados em melhorias na eficiência e na previsão de falhas
3	FACTS (Flexible AC Transmission Systems)	Reguladores aceitam investimentos, mas sem motivação para adoção acelerada	Incentivos baseados na melhoria da estabilidade da rede
4	IoT-Based Monitoring	Sem incentivos diretos para digitalização	Incentivos financeiros se a tecnologia reduzir custos operacionais

Diferentes estágios de discussão e aplicação do PBR nos EUA e Europa. Nos EUA, o foco é modernização da rede. Na Europa, aumento de eficiência



A PBR não foi amplamente adotada para transmissão pela FERC.

A regulação de transmissão (≥ 230 kV) nos EUA ainda é baseada em COSR, com ajuste de tarifas baseado em fórmulas.

A FERC tem resistido à aplicação da PBR para ativos de transmissão, ao contrário do que ocorre na distribuição.

Incentivos regulatórios para transmissão são limitados. A FERC aplica incentivos específicos, como: Taxas de retorno elevadas para novos investimentos em transmissão.

Redução de riscos para investidores em grandes projetos HVDC e FACTS.

No entanto, esses incentivos são focados em expansão de rede, não necessariamente em eficiência operacional.



Mais avançada em relação aos EUA na aplicação do PBR para ativos de transmissão.

Utiliza PBR para incentivar modernização da rede.

Promove HVDC e interconexões transnacionais. Impulsiona a digitalização da transmissão com IoT, Digital Twins e FACTS.

Destaca-se o modelo RIIO (Revenue = Incentives + Innovation + Outputs), aplicado inicialmente no Reino Unido e expandido para outros países.

A ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) supervisiona a regulação para garantir integração do mercado europeu de eletricidade.

Diferente dos EUA, onde a transmissão é regulada pela FERC, na Europa a regulação é descentralizada, mas com diretrizes comuns da União Europeia.

A Europa já regula diretamente a adoção de tecnologias enquanto nos EUA a adoção depende mais de decisões individuais das concessionárias.

Nos EUA, a regulação ainda está baseada no modelo tradicional de COSR, o que retarda a adoção de novas tecnologias e a integração eficiente da rede.

Por sua vez, a Europa regula a transmissão de forma mais integrada, com incentivos para modernização da rede, enquanto nos EUA a regulação é mais fragmentada e depende de cada operador regional.

A Europa está mais avançada do que os EUA na regulação da transmissão (≥ 230 kV), pois:

- Utiliza PBR para incentivar modernização da rede.
- Promove HVDC e interconexões transnacionais.
- Impulsiona a digitalização da transmissão com IoT, Digital Twins e FACTS.



#	Característica	Europa	EUA
1	HVDC (High Voltage Direct Current)	Incentivos para interconexões transfronteiriças (ex.: Noruega-Holanda, Reino Unido-França).	EUA têm menos interconexões HVDC devido à estrutura regulatória interestadual.
2	FACTS (Flexible AC Transmission Systems)	Regulamentação europeia incentiva estabilidade da rede e controle de fluxo de potência.	Implementação mais fragmentada nos EUA, sem incentivos regulatórios diretos.
3	Digital Twins para Transmissão (TDT)	Projetos-piloto em países como Alemanha e Reino Unido, com suporte regulatório.	Nos EUA, ainda em fase inicial, sem incentivos claros.
4	IoT-Based Transmission Monitoring	Obrigação regulatória para operadores de transmissão adotarem monitoramento digital.	EUA têm implementação crescente, mas sem exigência regulatória.
5	Dynamic Line Rating (DLR)	Já é usado na regulação para otimizar uso de redes existentes.	Nos EUA, há incentivos financeiros para implementação, mas regulação ainda fragmentada.



Com relação à eventos meteorológicos extremos, mais do que tecnologia, será necessária a integração de soluções. Exemplo: projeto ResNet Reino Unido

A Figura (a) ao lado ilustra a rede de transmissão reduzida do Reino Unido, utilizada como modelo para avaliar a resiliência do sistema elétrico a eventos climáticos extremos, particularmente tempestades de vento.

Essa rede é composta por 29 nós, representando subestações e centros de carga, além de 98 linhas de transmissão de circuito duplo e uma linha de circuito simples.

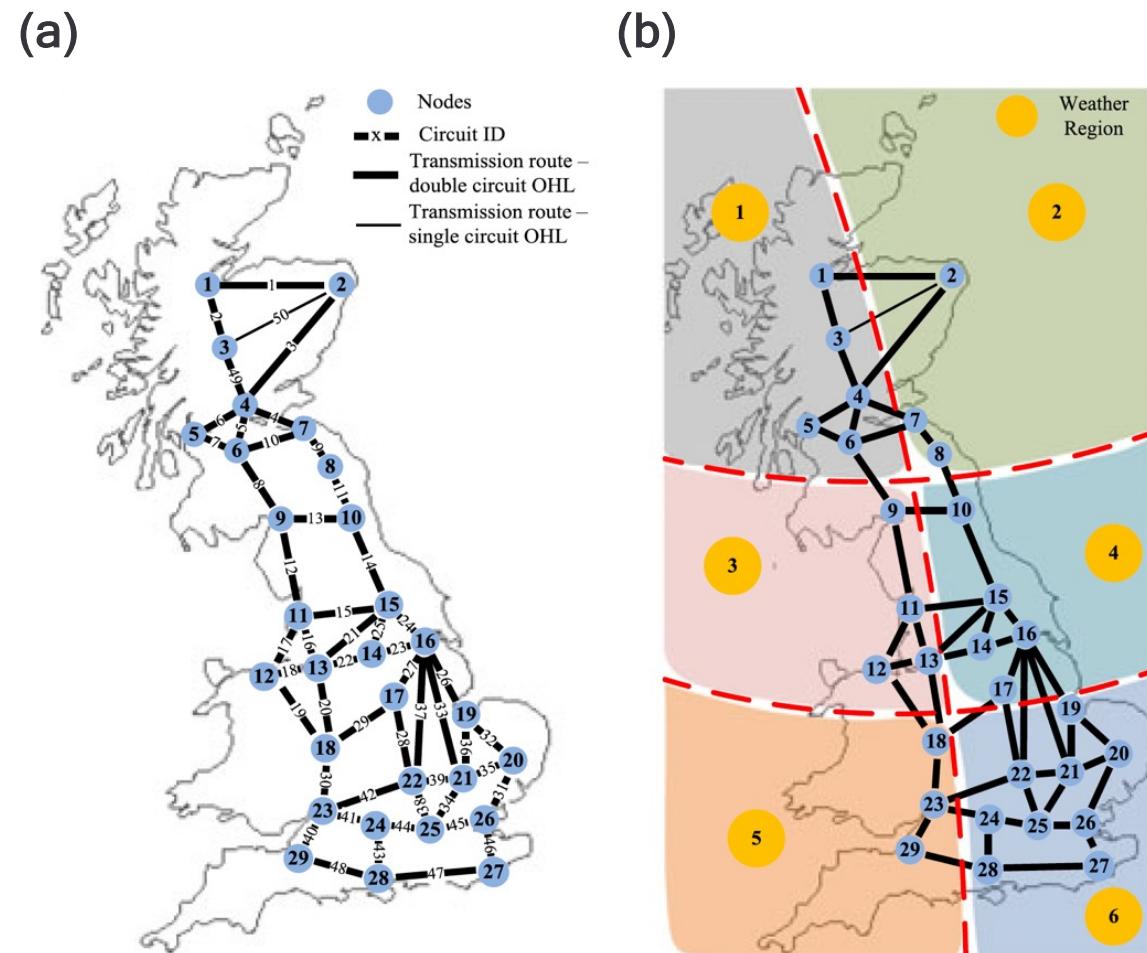
A Figura (b) ao lado ilustra a mesma rede dividida em 6 regiões meteorológicas. Cada uma dessas regiões é submetida a diferentes perfis de vento, simulados em **Digital Twin**, garantindo que a metodologia possa captar a evolução espacial e temporal de uma tempestade de vento cruzando a rede.

A segmentação regional permite analisar

como diferentes partes do sistema são afetadas de maneira desigual e como certos corredores de transmissão podem estar mais vulneráveis a falhas em função da severidade do evento meteorológico.

A partir desse modelo, os pesquisadores puderam testar diferentes estratégias de adaptação: aumento da robustez estrutural das torres e linhas, adição de redundância para minimizar impactos de falhas e otimização da resposta operacional para reduzir os tempos de restauração.

Dessa forma, a figura desempenha um papel central na análise da eficácia de diferentes estratégias de reforço, permitindo aos pesquisadores determinar quais abordagens oferecem o maior benefício na melhoria da resiliência da rede elétrica diante de eventos extremos.



Projeto P&D Nottus, Thymos e Wise Byte: O desafio dos eventos meteorológicos extremos nos ativos de transmissão e a necessidade de integração entre diferentes tecnologias

1

Quais novos sensores instalar e em que locais instalar em função dos sensores existentes, do bioma e dos histórico de eventos

2

Modelagem da rede para estudos de confiabilidade, mapas de fragilidade

3

Desenvolvimento de índices climáticos extremos e de alertas aos centros de operação

4

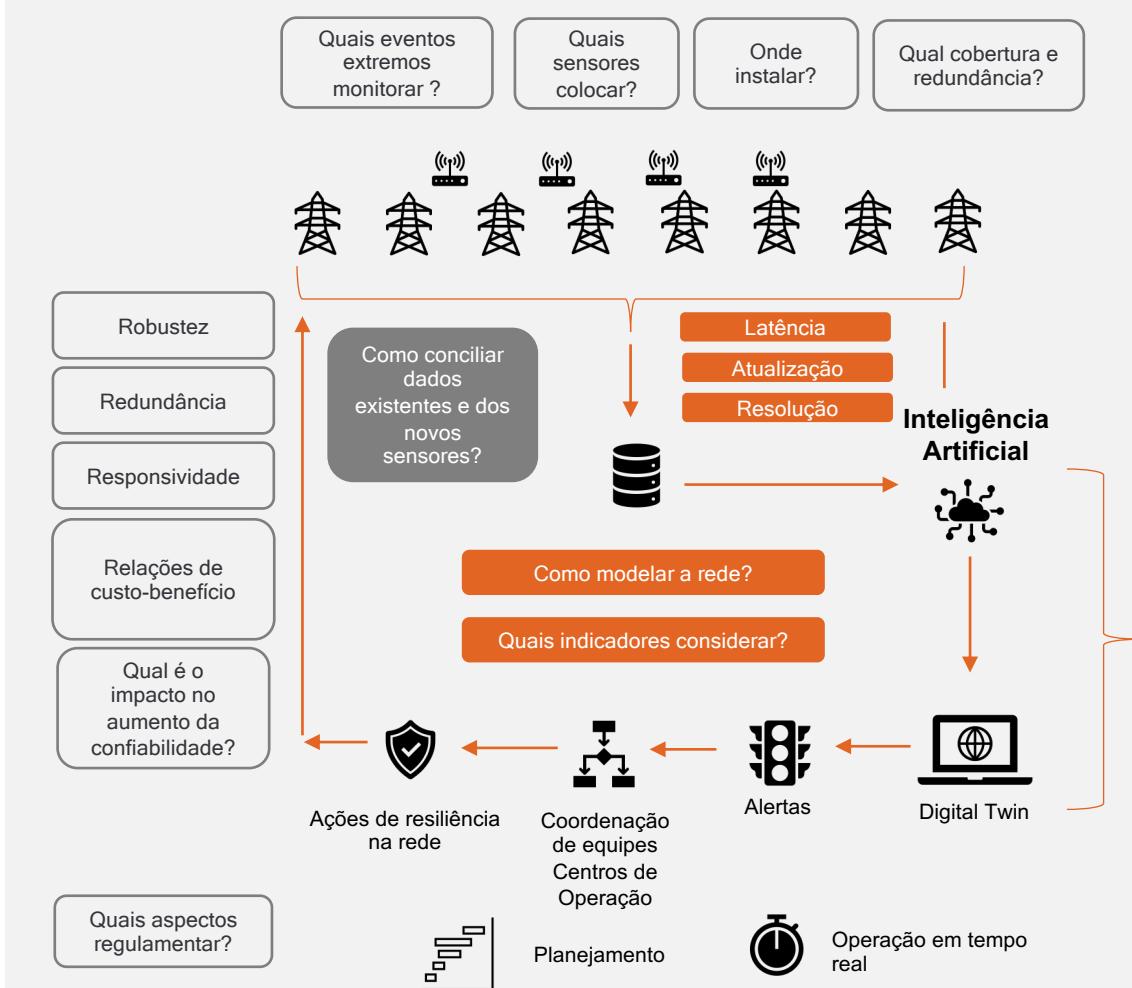
Estudos de confiabilidade elétrica, energética, mapas de fragilidade dos ativos de transmissão

5

Desenvolvimento de índices de robustez ativos existentes e critérios de robustez em projetos

6

Avaliação da relação de custo e benefício das ações de resiliência





Takeaways: Brasil precisa aperfeiçoar incentivos regulatórios e financeiros para acelerar a digitalização e eficiência dos sistemas de transmissão

1

Avaliar a implantação de sandboxes regulatórios para testar a implementação do modelo Performance Based Regulation (PBR) e testar a premiação de algumas tecnologias, como por exemplo, Digital Twins, IoT ou FACTS.

2

O Brasil ainda prioriza redes HVAC, limitando a eficiência em longas distâncias. Avaliar a ampliação de HVDC para interconexões de longa distância e FACTS para controle de fluxo de potência. Avaliar as relações de custo e benefício dessa flexibilidade operacional e integração de renováveis ao sistema.

3

No Brasil, o monitoramento da rede ainda é baseado em inspeções físicas e dados limitados. Incentivar uso de sensores IoT para manutenção preditiva e Digital Twins para modelagem da transmissão. Benefício esperado: Redução de falhas, custos operacionais menores e otimização da manutenção.

4

O Brasil ainda não utiliza o Dynamic Line Rating (DLR) em larga escala, o que limita a capacidade real das linhas de transmissão. Solução: Regular o uso de DLR para ajuste dinâmico da capacidade da linha com base em condições ambientais. Benefício esperado: Aproveitamento total da infraestrutura existente sem necessidade imediata de novas linhas.

5

O Brasil ainda não investe significativamente em cabos supercondutores, enquanto outros países já testam essa tecnologia. Estabelecer parcerias com universidades e indústrias para P&D de cabos supercondutores de alta capacidade. Benefício esperado: Redução de perdas e aumento da capacidade de transmissão em áreas densas.

6

Promover a Resiliência da Transmissão Contra Eventos Climáticos Extremos. Exemplos de soluções: Integrar modelagem climática (IA), Digital Twins e FACTS para otimizar resiliência da rede. Benefício esperado: Maior confiabilidade e menor impacto de eventos extremos na operação do sistema.

Obrigado!



Jovanio Santos

- jovanio.santos@thymosenergia.com.br
- (11) 9 7292-7705 | (11) 3192-9108
- www.thymosenergia.com.br
- Av. das Nações Unidas, 11541 | 10º andar | 04578-907 | Brooklin | SP