

Resiliência Climática do Setor Elétrico

Luiza Masseno Leal¹
João Pedro Silva Gomes²
Leonardo de Oliveira Gonçalves³
Vinícius José da Costa⁴

I. Introdução

O conceito de resiliência pode ser encontrado em diferentes abordagens e áreas temáticas. Na área da psicologia, por exemplo, entende-se que uma pessoa é resiliente quando é capaz de voltar ao seu estado habitual de saúde (física e mental) após passar por uma experiência difícil. Assim, a resiliência seria a capacidade de enfrentar e superar adversidades. No âmbito do setor elétrico, o conceito de resiliência também está relacionado à essa capacidade, existindo diversos tipos, como resiliência contra ataques terroristas, resiliência cibernética e resiliência climática, foco de análise do presente artigo.

Segundo o IPCC (2022), as mudanças climáticas, impulsionadas pelo comportamento do ser humano, incluem eventos extremos mais frequentes e intensos. Esses eventos causaram impactos adversos generalizados relacionados à natureza e às pessoas, além da variabilidade climática natural. As mudanças climáticas ocasionaram danos substanciais e perdas cada vez mais irreversíveis nos ecossistemas marinhos, terrestres, de água doce e costeiros. Destaca-se que a extensão e magnitude dos impactos das mudanças

¹ Pesquisadora do Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL) e mestranda no Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ.

² Pesquisador do GESEL e mestrando no Programa de Políticas Públicas Estratégicas e Desenvolvimento do IE/UFRJ.

³ Pesquisador Júnior do GESEL e graduando em Ciências Econômicas pela UFRJ.

⁴ Pesquisador Júnior do GESEL e graduando em Ciências Econômicas pela UFRJ.

climáticas são maiores do que o estimado em avaliações anteriores (IPCC, 2022).

Os eventos climáticos extremos, como ondas de calor, incêndios florestais, ciclones tropicais e inundações, se tornam mais intensos em muitos países. Esses eventos são muitas vezes responsáveis por cortes mais longos no fornecimento de energia elétrica, com efeitos negativos na economia e na sociedade. Neste sentido, tais efeitos negativos decorrem, segundo World Bank (2019a), das interdependências do fornecimento de energia com outros sistemas de infraestrutura crítica, como transporte, comunicação, aquecimento e resfriamento.

Vale ressaltar ainda que o processo de transição energética, em meio às mudanças climáticas já presentes e sentidas ao redor do mundo, tem como desafio a conciliação da expansão das fontes de energia renovável e com os possíveis desafios diante da sua sensibilidade ao impacto decorrente da variabilidade climática.

Diante desse cenário, a Academia, os formuladores de políticas setoriais, os reguladores e os agentes do setor elétrico devem trabalhar em conjunto para desenvolver estudos, metas, políticas, regulações e estímulos a investimentos, com a finalidade de construir um sistema elétrico cada vez mais resiliente.

II. O conceito de resiliência climática no setor elétrico e seus principais pilares

A resiliência da rede elétrica é um campo de pesquisa relativamente jovem. Os estudos nesta área, em sua maioria, são datados a partir do ano de 2015 e, portanto, a resiliência da rede elétrica se caracteriza como um conceito em processo de evolução e definição. No entanto, segundo Plotney e Slay (2021), de 2016 até agora, a retórica em torno da resiliência no setor elétrico converge gradualmente em torno de uma combinação de conceitos, como

antecipação, sobrevivência, absorção, recuperação e adaptação de eventos *High Impact and Low Probability* (HILP).

Em Afzal *et al.* (2020), tal constatação é reafirmada, indicando que a resiliência dos sistemas elétricos envolve a capacidade de i) prever o evento perturbador antes que ele aconteça; ii) evitar o distúrbio; iii) prevenir os efeitos decorrentes; iv) reconfigurar o sistema com os recursos redundantes disponíveis e a mão de obra adequada, para uma rápida recuperação da infraestrutura danificada ao nível anterior ao distúrbio; e v) aprendizagem para se adaptar com a experiência e aprimorar ainda mais suas capacidades.

A *International Energy Agency* (IEA) confirma tal conceito ao definir que a resiliência climática está relacionada com a capacidade de antecipar, absorver, acomodar e se recuperar de impactos climáticos adversos (IEA, 2021b). Desse modo, o nível de resiliência da rede elétrica está associado à capacidade de manter o fornecimento de energia diante de distúrbios HILP e inclui as fases antes, durante e após as perturbações graves (RATNAM *et al.*, 2020).

Uma estrutura conceitual para a resiliência climática do sistema elétrico delinea as dimensões críticas do sistema, quais sejam, robustez, desenvoltura e recuperação (IEA, 2021b). A robustez é a capacidade de um sistema de energia de resistir às mudanças graduais e de longo prazo nos padrões climáticos e continuar operando. Por exemplo, usinas termelétricas que utilizam água de recirculação para resfriamento podem ser mais resistentes ao aumento do calor do que aquelas que usam fontes externas, como rios ou lagos.

A desenvoltura, por sua vez, é a capacidade de continuar a operação durante choques imediatos, como eventos climáticos extremos. Por exemplo, uma usina hidrelétrica com reservatório de controle de enchentes é mais resiliente a possíveis enchentes do que outras sem este mecanismo. Por fim, a recuperação pode ser definida como a capacidade de restaurar a função do sistema após uma interrupção resultante de riscos climáticos. Por exemplo, um sistema elétrico mais resiliente e com um plano de contingência bem

coordenado contará com ativos temporários e força de trabalho que permitirão uma recuperação mais rápida das interrupções causadas pelos impactos climáticos.

Outros atributos da resiliência que também são incorporados por entidades e organizações em suas definições são ilustrados abaixo na Tabela 1, a seguir.

Características Extraídas da Resiliência									
Autores/ Organizações	Tolerância	Resistência	Robustez	Antecipação	Adaptação	Absorção	Recuperação	Aprendizado	Serviços Alternativos
MCEER	X				X		X		
UKERC	X				X		X		X
UK Cabinet Office				X	X	X	X		
NIAC			X		X		X	X	
SRC			X		X		X		X
IPCC				X	X	X	X		
PPD-21		X		X	X		X		
UN-ISDR		X	X				X	X	

Tabela 1: Principais características da resiliência incorporadas por diferentes entidades e organizações

Fonte: Mohamed *et al.* (2019).

Destaca-se que os debates e estudos acerca da resiliência climática no setor elétrico ganham importância no âmbito internacional a partir da percepção e da avaliação do potencial e da intensidade das ameaças que os eventos climáticos extremos representam para a sociedade.

III. Resiliência climática: desafios e ameaças

As crescentes anomalias nos padrões climáticos impactam toda a cadeia de produção dos sistemas elétricos em diferentes estágios, englobando as etapas de geração, transmissão e distribuição de energia, bem como a demanda pelo lado do consumidor (IEA, 2020a). Os eventos climáticos

extremos afetam diretamente aspectos, como i) a disponibilidade de combustível e demais recursos; ii) a eficiência da geração de usinas termelétricas e renováveis; iii) a resiliência física das redes de transmissão e distribuição, com danos físicos, maiores perdas de energia e mudanças na capacidade de transferência; e iii) padrões de demanda dos consumidores (IEA, 2021b).

Diferentes regiões do mundo já sentiram impactos econômicos e sociais devido a problemas no fornecimento de energia decorrentes de eventos climáticos extremos. Em 2021, por exemplo, o Texas passou por uma tempestade de inverno altamente rigorosa, gerando diversos impactos no sistema elétrico, além de perdas econômicas e de vidas. Mesmo sendo o estado com a maior produção de gás natural, petróleo e energia eólica dos EUA, mais de quatro milhões de residentes sofreram cortes de energia por 72 horas (EL PAÍS, 2021) e o preço da energia elétrica no atacado chegou a subir 10.000% (CLIMA INFO, 2021).

Outro exemplo é a Zâmbia, país onde apenas 30-40% da população tem acesso à eletricidade e já é afetado negativamente pelas mudanças climáticas. Uma estação chuvosa mais curta e secas mais frequentes representam um desafio para a geração de energia hidrelétrica, que atualmente produz mais de 80% da eletricidade da Zâmbia. Em fevereiro de 2016, os níveis de água da barragem de Kariba, a maior fonte de eletricidade do país, caíram 88%, provocando apagões, racionamento de energia e uma desaceleração no desenvolvimento econômico (IEA, 2020a).

De acordo com a IEA (2021b), o primeiro passo para aumentar a resiliência climática de qualquer sistema elétrico é a realização de uma avaliação abrangente e sistemática de seus riscos e impactos, considerando evidências científicas e geográficas. Os riscos climáticos referem-se aos fatores que estão associados a potenciais consequências das mudanças climáticas e são o resultado da interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade do sistema. Sendo assim, é essencial que todos os países avaliem os riscos e

impactos climáticos em seu setor elétrico, podendo se beneficiar da colaboração com outras nações ou organizações internacionais (IEA, 2020a).

Em seguida, nota-se que medidas adequadas reduzem potencialmente a duração da interrupção do fornecimento e aceleram o processo de restauração da rede. Ou seja, reduzindo o tempo de duração de uma queda de energia e acelerando o processo de restauração, é possível aumentar a resiliência geral da rede.

Assim, segundo Ratnam *et al.* (2020), o aumento da resiliência da rede elétrica inclui i) o fortalecimento da infraestrutura; ii) a expansão da infraestrutura para atender a um maior número de condições de interrupção, como estabelecimento de redundâncias; e iii) o aperfeiçoamento da inteligência da rede elétrica, por meio da utilização de sensores avançados, redes de comunicação aprimoradas e armazenamento de energia.

Já em Mahzarnia *et al.* (2020), são apontadas como ferramentas impulsionadoras da resiliência i) o fortalecimento das linhas, postes e demais componentes da rede de distribuição; ii) a substituição de linhas aéreas por redes subterrâneas; iii) a instalação de linhas adicionais, disjuntores e transformadores; iv) a adição de recursos energéticos distribuídos nas redes de distribuição; v) o fomento da operação do sistema de distribuição como um sistema de multimicrorredes; vi) o avanço em direção à descentralização; e vii) o desenvolvimento de tecnologias de rede inteligente.

Além disso, o sistema elétrico desempenha um papel central na resposta às alterações climáticas, enfrentando um período de transição em direção a um sistema de baixo carbono. No entanto, a transição do setor elétrico, a partir da crescente participação da geração de energia a partir de fontes renováveis, trará uma mudança estrutural de sistemas em todo o mundo.

Neste sentido, serão ampliados os desafios relacionados às crescentes preocupações em relação aos eventos meteorológicos extremos, visto que um sistema elétrico com alta participação de fontes renováveis pode se tornar mais

vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas, uma vez que fontes renováveis, como solar, eólica e hídrica, tendem a ser sensíveis a estes impactos.

Como exemplo, de acordo com World Bank (2019a), os parques eólicos foram considerados particularmente vulneráveis a ventos e detritos com força de furacão, resultando em danos em Porto Rico e no Texas. Além disso, danos a instalações geotérmicas nas Filipinas foram percebidos devido aos impactos decorrentes do tufão Haiyan.

Em suma, os sistemas elétricos mais resilientes serão capazes de reduzir os danos e as perdas causados pelas mudanças climáticas, além de fornecerem maiores benefícios do que custos. Estes sistemas serão capazes de auxiliar os países a enfrentar as ameaças imediatas impostas pelos riscos climáticos e de garantir um acesso confiável à eletricidade.

De acordo com a IEA (2021b), os benefícios gerados pelos investimentos em maior resiliência climática provavelmente se tornarão tangíveis apenas após alguns anos ou mesmo décadas, enquanto o custo de capital da implementação é incorrido de forma imediata. Porém, o World Bank (2019b) estima que, para cada dólar americano investido em infraestruturas resilientes, seis são economizados e se as ações para aumentar a resiliência forem atrasadas em 10 anos, o custo quase dobrará.

Por outro lado, os benefícios dos sistemas resilientes e os custos dos impactos climáticos tendem a ser distribuídos de forma desigual em toda a cadeia de produção do setor elétrico. Este fator, inevitavelmente, gera discussões acerca da responsabilidade pelo fornecimento das medidas de resiliência e de seu financiamento (World Bank, 2019a).

De modo geral, as empresas do setor elétrico têm responsabilidade e interesse direto em proteger seus próprios ativos e fornecer serviços confiáveis a seus clientes. Entretanto, alguns fatores, na prática, podem estar

desestimulando que algumas companhias adotem medidas de resiliência ao clima. Neste sentido, em IEA (2021b), aponta-se que condições de mercado monopolistas e a falta de concorrência em alguns países desencorajam os provedores de serviços a investir em medidas de resiliência climática para melhorar a qualidade dos serviços de eletricidade.

A partir dessa análise, verifica-se que a resiliência se torna cada vez mais um elemento central dos planos e regulamentos de energia e clima no âmbito internacional. Assim, os planos e as estratégias nacionais que incluem medidas de promoção à resiliência climática apresentam o potencial de incentivar as empresas e os investidores do setor elétrico a fortalecerem a resiliência de seus sistemas elétricos nas fases de projeto, operação e manutenção.

Deste modo, os formuladores de políticas públicas possuem um papel fundamental a desempenhar na construção de sistemas elétricos resilientes, colaborando com as empresas e adotando medidas eficazes que podem, inclusive, evitar possíveis falhas de mercado (IEA, 2021b).

IV. Considerações finais

Diante do cenário atual de intensificação das mudanças climáticas, o sistema elétrico está testemunhando uma pressão crescente. Os eventos climáticos extremos já representam uma ameaça à segurança do fornecimento de energia elétrica, bem como à qualidade de vida e ao desempenho econômico da sociedade.

O conceito de resiliência climática se configura, em geral, como a capacidade de antecipar, sobreviver, absorver, recuperar e se adaptar de problemas climáticos adversos de alto impacto e baixa probabilidade, incluindo as fases antes, durante e após as perturbações graves. Diante disso, surge a necessidade de estabelecer metas e investimentos para a promoção da resiliência do setor elétrico. Destaca-se que a implementação de medidas de resiliência climática nos sistemas elétricos facilitará o processo de transição do setor.

O estabelecimento de responsabilidades, incentivos e regras claras em todo o setor elétrico é fundamental para garantir a segurança do fornecimento diante de eventos climáticos extremos. Contudo, a resiliência climática ainda deve ser analisada nos planos estratégicos e regulamentos nacionais de energia e clima, incentivando os investimentos em resiliência nos sistemas elétricos.

V. Referências

AFZAL, S. *et al* (2020). State-of-the-art review on power system resilience and assessment techniques. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 14, pp. 6107-6121.

CLIMA INFO (2021). Caos elétrico no Texas destaca risco da mudança do clima às redes de distribuição de energia. ClimaInfo, 25 de fevereiro de 2021. Disponível em: <https://climainfo.org.br/2021/02/24/caos-eletrico-no-texas-destaca-risco-da-mudanca-do-clima-as-redes-de-distribuicao-de-energia/>.

IEA, International Energy Agency (2021a). Climate Impacts on Latin American Hydropower. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/8fa86b9d-470c-41a6-982e-70acd3fbdda4/ClimateImpactsonLatinAmericanHydropower_WEB.pdf.

IEA, International Energy Agency (2020a). Climate Impacts on African Hydropower. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4878b887-dbc3-470a-bf74-df0304d537e1/ClimateimpactsonAfricanhydropower_CORR.pdf.

IEA, International Energy Agency (2021b). Climate Resilience. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/cd69028a-da78-4b47-b1bf-7520cdb20d70/Power_systems_in_transition.pdf.

IEA (2020b). Power System in Transition - Challenges and opportunities ahead for electricity security. Disponível em:

https://iea.blob.core.windows.net/assets/cd69028a-da78-4b47-b1bf-7520cdb20d70/Power_systems_in_transition.pdf.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). Summary for Policymakers [PÖRTNER, H. -O.; ROBERTS, D. C.; POLOCZANSKA, E. S.; MINTENBECK, K.; TIGNOR, M.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; MÖLLER, V.; OKEM, A. (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [PÖRTNER, H. -O.; ROBERTS, D. C.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E. S.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; MÖLLER, V.; OKEM, A.; RAMA, B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

EL PAÍS (2021). LABORDE, A. Desastre do Texas revela a fragilidade dos Estados Unidos diante da crise climática. EL PAÍS, 21 de fevereiro de 2021. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/internacional/2021-02-21/desastre-do-texas-revela-a-fragilidade-dos-estados-unidos-diante-da-crise-climatica.html>.

PLOTNEK, J. J.; SLAY, J. (2021). Power systems resilience: Definition and taxonomy with a view towards metrics. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, 33, 100411. doi:10.1016/j.ijcip.2021.100411

MAHZARNIA, M. *et al.* (2020). A Review of the Measures to Enhance Power Systems Resilience. **IEEE Systems Journal**, v. 14, pp. 4059-4070.

MOHAMED, M. A. *et al.* (2019). Proactive Resilience of Power Systems Against Natural Disasters: A Literature Review. **IEEE Access**, v. 7, 163778-163795.

RATNAM, E. L. *et al.* (2020). Electricity system resilience in a world of increased climate change and cybersecurity risk. **The Electricity Journal**, v. 33, 106833.

WORLD BANK (2019a). Resilience and Critical Power System Infrastructure - Lessons Learned from Natural Disasters and Future Research Needs. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/31920/WPS8900.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.

WORLD BANK (2019b). Stronger Power - Improving Power Sector Resilience to Natural Hazards. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/200771560790885170/pdf/Stronger-Power-Improving-Power-Sector-Resilience-to-Natural-Hazards.pdf>.