

Grupo de Estudo de Operação de Sistemas Elétricos

VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA FACE A AMEAÇAS CLIMÁTICAS: FUNDAMENTOS E PROPOSTAS PARA O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

AFONSO HENRIQUES MOREIRA SANTOS(1); RICARDO ALEXANDRE PASSOS DA CRUZ(1); LUÍS FERNANDO BADANHAN (2); CÁSSIA GABRIELE DIAS (1); PRISCILA DA SILVA TAVARES (1); LEOPOLDO UBERTO RIBERIO JUNIOR (1); ROBERTO DE MATTOS (1); JOSE WANDERLEY MARANGON LIMA (1); JOÃO CARLOS DE OLIVEIRA MELLO (1); BÁRBARA KAROLINE FLAUZINO (1); BENEDITO CLAUDIO DA SILVA (3)

**IX Estudos e Projetos Ltda. – EPP, Itajubá – MG, Brasil (1);
Ministério de Minas e Energia, Brasília - DF, Brasil (2);
Universidade Federal de Itajubá (3).**

RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo do “Produto 2: Estado da arte da vulnerabilidade do setor elétrico”, “Produto 3: Modelagem climática para a geração elétrica” e do “Produto 5: Análise da mudança climática junto ao planejamento de expansão de sistemas elétricos”, do Contrato nº 12/2018, TDR nº 66, intitulado “Análise dos reflexos das mudanças climáticas nas metodologias de planejamento de sistemas elétricos” do Projeto META. O trabalho realizado indica a necessidade de se evoluir o planejamento do setor elétrico, de forma a incorporar os estudos de vulnerabilidade, notadamente aqueles ligados às mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE

Vulnerabilidade, Setor Elétrico, Planejamento, Resiliência, Mudança Climática

1.0 - INTRODUÇÃO

Assim como a forma de gerar energia afeta o clima, a geração de energia também é fortemente impactada pela mudança climática. A produção e a eficiência dos sistemas de suprimento de energia são altamente sensíveis ao aumento de temperatura, tornados, incêndios florestais, deslizamentos de terra, inundações e secas. O aumento do nível do mar e as tempestades também são uma preocupação quando se trata de instalações de energia.

A infraestrutura do setor elétrico, que foi construída para suportar uma gama conhecida de condições históricas, está se tornando cada vez mais vulnerável a essas mudanças climáticas. Dessa forma, o desempenho adequado do sistema elétrico depende de ações antecipadas, que permitam a manutenção de sua capacidade de produção e o fornecimento de energia de forma segura, confiável e econômica. Para isso é importante avaliar como o sistema se comporta frente às ameaças decorrentes das mudanças climáticas, ou seja, quais são as fragilidades do sistema frente a essas ameaças e qual é a capacidade do sistema se reestruturar e se reestabelecer em casos de danos.

Portanto, o entendimento das alterações climáticas e uma maior resiliência às ameaças decorrentes, serão essenciais para a viabilidade técnica do setor de energia elétrica e sua capacidade de atender, de forma sustentável, às crescentes demandas de serviços de energia elétrica impulsionadas pelo crescimento econômico e populacional global. Em geral, a literatura foca em impactos generalizados que podem ser observados nas estações geradoras e na infraestrutura de transmissão e distribuição. De acordo com (1), essa perspectiva sistêmica concentrou a atenção na possível instabilidade ou ruptura por meio de eventos específicos (por exemplo, picos de demanda, interrupção de transmissão), bem como riscos materiais associados a custos de operação e manutenção (desgaste, perda, etc.).

Mudanças no clima podem impactar os sistemas energéticos, tanto na produção de energia quanto no seu consumo (2). O sistema elétrico brasileiro apresenta-se nos dias atuais como um sistema essencialmente hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidroelétricas (3). No entanto, fontes renováveis como a eólica, biomassa e solar, vêm ganhando destaque nos últimos anos na composição da matriz energética brasileira. Portanto, por se tratar do aproveitamento energético de recursos que são susceptíveis às mudanças

climáticas, avaliar as variáveis climáticas que as influenciam, por meios de projeções, é de extrema importância para atenuar possíveis impactos no setor. Considerando o exposto, este trabalho expõe, de forma sintética, o impacto das mudanças climáticas nos sistemas elétricos de potência e apresenta propostas de aperfeiçoamentos do planejamento dos mesmos.

2.0 - VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA FACE A AMEAÇAS CLIMÁTICAS: FUNDAMENTOS

As mudanças climáticas apresentam riscos para o setor de energia e identificar os impactos das mudanças climáticas neste setor, assim como suas vulnerabilidades, é essencial para a formulação de políticas de adaptação e avaliação de alternativas tecnológicas para a formulação de políticas energéticas em um país (4). Tendo em vista esta necessidade, vários países já apresentam o Plano Nacional de Adaptação (PNA). O PNA é uma estrutura de estratégia básica, para a obtenção das metas de adaptação para os países, visando melhorar o planejamento e a ação nacional de adaptação dos mesmos (5).

Com relação à energia, em geral, a literatura foca em impactos (das mudanças climáticas) generalizados que podem ser observados nas estações geradoras e na infraestrutura de transmissão e distribuição. De acordo com (1), essa perspectiva sistêmica concentrou a atenção na possível instabilidade ou ruptura por meio de eventos específicos (por exemplo, picos de demanda, interrupção de transmissão), bem como riscos materiais associados a custos de operação e manutenção (desgaste, perda etc.). Há também, um volume crescente de trabalhos mostrando que a implementação de opções de mitigação de energia pode levar a uma série de co-benefícios socioeconômicos, por exemplo, emprego, segurança energética e melhor acesso a serviços de energia em áreas rurais (6). Ainda de acordo com (6), o desempenho, o custo de muitas tecnologias e a capacidade das energias renováveis têm avançado substancialmente nas últimas décadas (desde o quarto relatório do IPCC; AR4 - 2007). Entretanto, estes autores citam ainda, que nenhuma opção isolada de mitigação no setor de fornecimento de energia será suficiente para manter o aumento na temperatura média global abaixo de 2°C, sugerindo que as principais opções de mitigação no setor de energia são:

- Melhorias na eficiência energética;
- Redução das emissões evasivas dos Gases de Efeito Estufa (GEE), exceto CO₂;
- Mudança de combustíveis fósseis com altas emissões específicas de GEE (ex.: carvão) para aqueles com menores (ex.: gás natural);
- O uso de eletricidade para substituir outros combustíveis e;
- Uso de energia renovável, nuclear e Captura e Armazenamento de Carbono (CCS, do inglês *Carbon dioxide capture and storage*).

Já (1) comenta que também é necessário um foco no gerenciamento de riscos climáticos no setor de energia elétrica, uma vez que redes elétricas fornecem uma base social, cultural e econômica fundamental. Além disso, a indústria energética é formada por uma infraestrutura complexa, desde a produção até a transmissão, sendo desta forma exposta a uma ampla gama de ameaças que, em algumas regiões específicas, apresentam risco extremo devido aos impactos das mudanças climáticas. Os autores citam como exemplo, que o aumento de temperatura tem influência direta no sistema de transmissão, aumentando o risco de incêndios, pois o aumento da temperatura diminui a umidade do solo e da vegetação. Neste estudo, ainda é destacado que se devem ter investimentos em pesquisa em áreas onde existem lacunas sobre os impactos das mudanças climáticas (por exemplo, incêndios florestais ou mudanças nos padrões de vento) para que se possa fornecer uma compreensão mais completa dos riscos e estratégias potenciais de adaptação.

Entre os agentes interessados no risco climático no setor energético e elétrico, podem se destacar investidores, credores, seguradoras, analistas de mercado e financeiros, governos e agências reguladoras, consumidores, comunidades locais e ONGs. Vários trabalhos apontam a importância de um engajamento entre as partes interessadas, dentre eles (1); isso envolve uma interação entre empresas privadas e instituições públicas para assim conseguir respostas adaptativas mais eficazes. Como exemplo, (1) cita o trabalho da concessionária californiana Pacific Gas and Electric Company que busca desenvolver estratégias para se adaptar a reduções da camada de neve nas montanhas de Sierra Nevada que são fundamentais para energia hidrelétrica na região. O setor de transporte precisa de energia motriz, enquanto o setor de energia também depende do transporte para fornecer recursos, como carvão, petróleo e gás natural. Além disso, o setor de comunicações exige eletricidade para operar; já o setor de energia depende de sistemas de comunicação para monitorar e gerenciar a rede elétrica. Nesse panorama fica evidente a necessidade de políticas com colaborações entre diferentes setores. Entretanto (1) destaca que embora seja reconhecida a importância deste engajamento intersetorial nas abordagens de riscos climáticos no setor elétrico e energético existe pouca ação sendo executada. Esse engajamento poderia contribuir na ampliação da quantidade de dados e informações sobre o clima local; desenvolver métodos para avaliar riscos e promover um conjunto de práticas tecnológicas, comportamentais e institucionais necessárias para uma maior resiliência. Destaca ainda, que um envolvimento entre as partes interessadas é fundamental para implementação efetiva de estratégias de adaptação, uma vez que a falha em um setor pode acarretar problemas em diversos outros setores. Mitchell et al. (2011) ainda diz que, se todos os setores interessados forem incluídos no projeto de energias renováveis, sua aceitação torna-se um compromisso mais duradouro a longo prazo. Além disso, essa rede intersetorial pode ser um importante canal para intercâmbio de experiências e conhecimentos; esta por sua vez, apoia o processo de aprendizagem e estimula a mudança, como exemplo, políticas ou instituições que ajudem o desenvolvimento sustentável das energias renováveis.

Observando as mudanças climáticas e no quanto elas poderão afetar no setor elétrico brasileiro, a matriz elétrica já vem incluindo fontes alternativas de energia, que complementam a oferta de energia hidroelétrica, principal geradora de energia no país. A inclusão de fontes, como a solar, eólica e de biomassa, atualmente ajuda e no futuro poderá ajudar ainda mais, a garantir a segurança energética, mas é necessário analisar as projeções e vulnerabilidades destas fontes. Há estudos que indicam projeções de pequenas reduções no potencial solar brasileiro ao longo do século XXI (7; 3), entretanto, destacam que estas reduções não são consideradas significativas, uma vez que o país ainda se encontrará no intervalo considerado adequado para a produção de energia solar. Vale destacar que fatores pertinentes, como o desenvolvimento tecnológico, melhoria na eficiência das placas solares e melhor aproveitamento da incidência direta dos raios, também tendem a influenciar o futuro do desenvolvimento da energia solar.

Em se tratando da energia eólica no Brasil, em geral, as projeções (8; 9; 10) indicam aumento da velocidade do vento e consequentemente, do potencial eólico, realçando que principalmente nas regiões costeiras e na região Norte e Nordeste brasileira, os parques eólicos permanecerão propícios para a geração de energia. Na geração de energia elétrica a partir de biomassa, sabe-se que os impactos das mudanças do clima estão atrelados aos efeitos sobre as culturas bioenergéticas, cuja produção, rendimento e áreas de aptidão são influenciados por fatores climáticos. Para o cultivo da cana-de-açúcar, os efeitos das mudanças climáticas projetadas são benéficos, indicando aumento da produtividade nas principais regiões produtoras do país (11). Já para o eucalipto, as mudanças climáticas irão provocar redução de áreas aptas ao plantio (12). Uma das mudanças previstas e que impacta fortemente a biomassa, é a tendência de aumento de temperatura até o final do século XXI em todo o país, mesmo no cenário mais otimista (RCP2.6) (13; 14). Entretanto, ressalta-se que o aproveitamento energético da biomassa não é função direta da produção dessas culturas, tendo em vista que os aspectos econômicos, conjunturais e estruturais, especialmente do setor sucroalcooleiro, também influenciam a geração de energia elétrica.

De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG, 2019) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a geração hidrelétrica é atualmente responsável por aproximadamente 60% da geração elétrica do país, sendo que o grande potencial hidrelétrico ainda disponível está localizado nas bacias da região amazônica. No entanto, trabalhos como o de (15; 16), mostram que a maioria das projeções de mudanças climáticas indicam reduções nas vazões afluentes das bacias hidrográficas das regiões Norte e Nordeste do Brasil e aumento de precipitação nas bacias da região Sul e parte das bacias do Sudeste, resultando em aumento das vazões afluentes e da geração de energia nas usinas hidrelétricas dessas regiões. Trabalhos como o de (14) e (13), também indicam para a região Sul do Brasil, um aumento da precipitação até o final do século, e ainda, redução da precipitação em uma grande área que se estende desde o Norte, até a região Sudeste-Sul do Brasil. Apesar de ser essencial analisar esses resultados com cuidado, dadas às incertezas e limitações nos modelos climáticos, eles são sinalizadores importante para o planejamento do setor elétrico, uma vez que representam um panorama qualitativo das tendências futuras, visto que, em partes, há convergência dos resultados dos diversos estudos apresentados. Estes estudos apontam a necessidade de considerar o efeito das mudanças climáticas nos estudos de planejamento da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

3.0 - VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA FACE A AMEAÇAS CLIMÁTICAS: PROPOSTAS PARA O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Os procedimentos, os critérios e os modelos atualmente utilizados pelo setor elétrico brasileiro não vislumbram de forma efetiva os efeitos das mudanças climáticas no planejamento de longo, médio e curto prazo. O PNE 2030, lançado em 2007, não menciona qualquer indicação de consideração dos efeitos das mudanças climáticas mesmo com a liberação do AR4 do IPCC no mesmo ano. Só com a nova versão do PNE 2050 é que se começa a incluir cenários de mudanças climáticas de forma externa, ou seja, ainda não está internalizado nos modelos. A internalização tem sido proposta como, por exemplo, o projeto MudClima do CEPEL.

No contexto do setor energético brasileiro, observa-se a ausência de documentos de referência, que possuam os procedimentos e critérios voltados ao planejamento energético, semelhantes aos encontrados, por exemplo, no ONS, ANEEL e CCEE, por meio dos procedimentos de rede, procedimentos de distribuição e procedimentos comercialização, respectivamente. Com referência à inclusão do efeito das mudanças climáticas, a partir do que foi exposto anteriormente, pode-se identificar cinco grandes grupos de estudos de planejamento, em que a atual forma de proceder deve ser mudada para incluir tais efeitos: Planejamento da Oferta de Energia; Previsão da Demanda; Planejamento da Transmissão; Planejamento do Sistema Elétrico e; Estudos de Vulnerabilidade de Ativos Físicos/Sistemas e Planos de Resiliência.

Sabe-se, que as centrais elétricas estão sujeitas às ameaças climáticas de formas distintas, portanto, é necessário que se desenvolvam modelos de avaliação destes impactos, seja para fins da operação, seja para o planejamento da expansão. A participação da geração hidrelétrica no parque gerador nacional é ainda largamente majoritária, embora venha perdendo importância nas duas últimas décadas. A importância da geração hidrelétrica continuará grande no horizonte de planejamento de longo prazo, o que evidencia a necessidade de se aprofundar nas ameaças que atuam sobre elas e suas vulnerabilidades individuais e sistêmicas. A geração térmica, embora não tenha a importância relativa que tem em grande parte dos países, ganhou relevância no parque gerador nacional, também nestas duas últimas décadas, notadamente como geração complementar, reduzindo riscos energéticos e elétricos sistêmicos. Essas centrais também são vulneráveis às mudanças climáticas, mas de maneira menos intensa que a geração hidrelétrica. As gerações renováveis alternativas, que hoje ganham espaço no parque gerador, destacando-se o parque eólico que já supera a capacidade térmica, também estão sujeitas às mudanças

climáticas, e, em alguns casos de forma benéfica. A avaliação destes impactos é essencial para o planejamento da expansão, dada a realidade de redução de custos dessas alternativas, que as faz viáveis economicamente.

Não restam dúvidas, porém, que a geração hidrelétrica merece a priorização dos estudos de planejamento, dadas as consequências imediatas na operação e no planejamento da operação. A variação nas aflúências aos reservatórios das usinas hidrelétricas deve ser avaliada buscando o impacto conjunto no bloco hidráulico, que é um dos resultados do modelo NEWAVE. As previsões de aflúências são tratadas por meio de um modelo periódico autorregressivo (PAR), que é alimentado por um conjunto de séries hidrológicas históricas transformadas em séries sintéticas, para dar uma consistência estatística. As séries utilizam a premissa de que o modelo é estacionário, ou seja, o comportamento do passado irá se reproduzir no futuro tanto no nível como na sazonalidade. Esta premissa é posta em xeque com os efeitos verificados das mudanças climáticas. Já é possível ter uma simulação do comportamento da precipitação nas diversas regiões do Brasil a partir dos MCGs e MCRs. O projeto MudClima do CEPEL já indicou a utilização do Eta-MIROC e Eta-HadGEM, nos modelos MELP e NEWAVE. O Modelo de Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico (PLANEL) foi utilizado para os estudos de longo prazo da oferta de energia elétrica, como aqueles que embasaram a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) brasileira no setor de Energia. Todavia, não há publicação dos estudos de oferta de energia elétrica do PNE (Plano Nacional de Energia) 2050. A formulação do PLANEL é muito similar à do MELP. Já no PDE (Plano Decenal de Energia) são utilizados os modelos MDI (para decisão de expansão) e NEWAVE (para simulação da operação do parque futuro). Um outro ponto crítico no cálculo das aflúências está relacionado ao uso consuntivo da água. Atualmente a metodologia adotada baseia-se em um diagnóstico bastante incompleto. Como já referido, a ANA está evoluindo os modelos de avaliação e de coleta de dados, o que permitirá fazer projeções adequadas ao planejamento, inclusive considerando o efeito das mudanças climáticas.

Uma limitação relevante do NEWAVE para incluir as incertezas nas variáveis climáticas prende-se às centrais de energia renováveis (eólica, biomassa e solar), pois suas modelagens específicas não foram ainda introduzidas. A soma da capacidade instalada das fontes representa hoje quase 19% do total da matriz de energia elétrica nacional, excluindo-se as importações. Esse montante de geração é tratado como carga negativa no modelo, ou seja, mesmo as incertezas históricas não são representadas. É necessário modelar essas incertezas e suas relações com as variáveis climáticas para o cálculo da garantia energética a ser usada no planejamento. A partir disso, a incorporação dos efeitos das mudanças climáticas poderia ser feita de forma similar ao sugerido com a precipitação. Os modelos de previsão de demanda de curto-prazo utilizam a temperatura como um parâmetro importante de correlação com a variação da carga, principalmente nos segmentos comercial e residencial. Os efeitos das mudanças climáticas, notadamente as ondas de calor que têm sido verificadas, levam à necessidade de se melhorar os modelos usuais, normalmente com base em regressões sobre históricos. O que se tem verificado nos países desenvolvidos é um grande descolamento das projeções econométricas com o mercado real, especialmente por causa de uma grande penetração de novas tecnologias, como geração distribuída, armazenamento e equipamentos eficientes. Observa-se que, grande parte deste desenvolvimento tecnológico, foi consequência de políticas ambientais objetivando a redução de GEE.

Nas projeções de médio prazo (horizonte de cinco anos) há uma interface EPE-ONS no processo de previsão de carga, para os estudos e política de operação energética, além de intercâmbio de dados, informações e modelos computacionais. Os referidos efeitos das mudanças tecnológicas serão sentidos de forma mais intensa nesta etapa do planejamento, bem como os efeitos da variabilidade climática, que, como se disse, compromete os modelos econométricos na previsão da demanda. As práticas de cenários como “*Business as Usual*” (BAU) e de introduções tecnológicas não estão sendo capazes de captar essas evoluções, necessitando-se, pois, de construção de novos modelos e procedimentos para as projeções de demanda de longo e longuíssimo prazo. A espacialização dos estudos de demanda torna-se ainda mais necessária, dado que as mudanças climáticas têm efeitos geográficos distintos, com diferentes consequências sobre a sociedade, seja no consumidor final ou na produção. Hoje a prática do planejamento, para diversos estudos, é a projeção da demanda em um processo *bottom-up*, somando as projeções de diferentes agentes/regiões. Necessita-se evoluir para uma combinação de modelos *top-down* com outros *bottom-up*, permitindo, assim, incorporar os efeitos de maior escala nos estudos regionais, como é o caso das ameaças climáticas.

Com relação à transmissão, há dois aspectos relevantes nesse tema e que merecem atenção dos planejadores e operadores do sistema elétrico nacional: os critérios e os procedimentos associados à concepção das linhas, propriamente ditas, e os sistemas de transmissão, que envolvem um conjunto de linhas interligadas, incluindo as subestações. As mudanças climáticas têm levado ao aumento das intensidades das rajadas de vento e de chuvas e, em outros casos, criado condições mais favoráveis a queimadas, dados o aumento de temperatura e a redução da umidade. Essas ameaças expõem os ativos de geração a condições vulneráveis e, como consequência, os próprios sistemas de transmissão. Há de se dizer uma vez mais que os estudos de vulnerabilidade são distintos dos estudos de confiabilidade, dado, principalmente, que o estabelecimento das ameaças é baseado em eventos extremos de baixa probabilidade de ocorrência. Os estudos de vulnerabilidade fundamentarão os planos de melhoria de resiliência, que não só indicará reforços no sistema com novas linhas (expansão), mas, também, poderão indicar redução das fragilidades de linhas em operação, como reforços nas torres, mudanças de cadeias de isolamento, dentre outros.

Outro ponto importante, associado ao planejamento e aos leilões, refere-se às rotas a serem escolhidas para o assentamento das torres. Hoje, o roteamento é definido preliminarmente, cabendo ao investidor a definição final do encaminhamento. Também, as condições ambientais extremas não têm sido consideradas nessas definições, mesmo sem considerar os impactos das mudanças climáticas. Parece necessário que os procedimentos de

planejamento das linhas exijam estudos de vulnerabilidade, bem como se proceda estudos de vulnerabilidade em intervalos regulares (por exemplo, a cada dez anos), que poderiam ser suportados pelos próprios proprietários dos ativos.

Além do exposto, é natural, por questões de custo de manutenção e sinergias construtivas, que vários circuitos sejam construídos próximos e, por isso, muitas vezes têm ameaças originárias de eventos de causa comum e estes acabam apresentando saídas forçadas conjuntas, quando de eventos extremos, o que gera perdas múltiplas, podendo ocasionar blackouts não previstos pelo critério (N-1). As ameaças associadas às mudanças climáticas impactam, nesses casos, de forma muito intensa o sistema, podendo estes impactos possuírem caráter ainda mais abrangente que o descrito, correlacionando o aumento das ameaças com abrangência geográfica bastante ampla. O critério de planejamento de transmissão deve ser repensado, notadamente pela crescente magnitude das ameaças e pelo aprofundamento das vulnerabilidades, em decorrência do aquecimento global. Faz-se necessário incorporar atributos econômicos que valorizem a redução da vulnerabilidade (ou melhoria da resiliência) dos sistemas, como redução do risco de blackouts. Hoje, o custo incorrido quando de um grande desligamento tem impactos tanto econômicos como sociais, destacando-se a segurança pública. Essas variáveis devem ser introduzidas na escolha das alternativas de expansão da transmissão.

A observação das tendências nas variáveis associadas aos cenários de mudanças climáticas, principalmente temperatura e vento, pode auxiliar ainda na avaliação do desempenho da rede quanto aos aspectos de eficiência e capacidade de transmissão dos ativos. Atualmente, a determinação das capacidades operativas sazonais de linhas de transmissão é feita com base na Metodologia para Cálculo da Capacidade Sazonal de Projeto de Linhas de Transmissão a Serem Licitadas, do ONS. Destaca-se a importância de utilização de resultados provenientes de modelos climáticos regionais acoplados a modelos globais para avaliar a influência de diferentes cenários de mudanças climáticas na capacidade operativa. Essa análise pode ser feita não apenas para o planejamento, mas também para empreendimentos em operação de forma a verificar vulnerabilidades e fragilidades da infraestrutura existente. Dessa forma, uma melhor caracterização dos atributos de confiabilidade poderá subsidiar os estudos de planejamento da transmissão, tendo em vista que as características de falha de determinado ativo existente podem variar em função de parâmetros como tempo de operação e localização geográfica, por exemplo.

Analisando o sistema elétrico em seu conjunto (ativos de geração e transmissão interligados e a carga a ser atendida), todos seus ativos estão sujeitos aos efeitos das mudanças climáticas, em maior ou menor grau. O planejamento desses sistemas divide-se, basicamente, na operação (quando o parque é estático) e na expansão (quando o parque produtor é dinâmico). Enquanto os modelos de expansão estão preocupados em incorporar os efeitos das mudanças climáticas, em todos os modelos de operação pesquisados não existe menção quanto à inclusão dos mesmos. Algumas variáveis dos ativos de geração e de transmissão podem estar fortemente correlacionadas, seja considerando as tendências de afluências energéticas, como centrais eólicas em mesma região, seja nos estudos de segurança dos ativos físicos, como se dá nas cheias de hidrelétricas em cascata. Para as térmicas, por exemplo, um aumento regional de temperatura poderá restringir a capacidade geradora de todas as centrais localizadas na região afetada, comprometendo a operação do sistema.

Um instrumento importante na operação dos sistemas elétricos, seja para fins energéticos, tanto quanto para fins elétricos, são os sistemas de armazenamento. Na expansão indicativa do Plano Decenal mais recente (PDE 2027) já estão sendo consideradas as tecnologias de armazenamento, como por exemplo, baterias. O principal atributo comentado nesse plano é que elas tenham baixo custo fixo, já que seu papel no sistema seria similar ao de um seguro, ou seja, operarem por curtos períodos de tempo. Como dito anteriormente, estudos climáticos regionais devem ser incorporados nos estudos dos sistemas elétricos, pois podem existir fortes correlações entre as falhas motivadas por eventos climáticos. Há ainda a necessidade de se avaliar de forma continuada o comportamento das variáveis climáticas e, se possível, tentar prevêê-las, tendo em vista a intensidade das mudanças climáticas.

Os estudos convencionais de análise de contingência levam a crer que, quanto mais malhado for o sistema, mais confiável ele é. Entretanto, em estudos de vulnerabilidade sistêmica, em que as ameaças ocorrem geograficamente espalhadas e muitas vezes simultâneas sobre os ativos da rede elétrica, uma forte interconexão faz propagar, com maior profundidade e abrangência, os efeitos das interrupções das linhas. É importante que o planejamento observe se os esquemas praticados pela operação nas emergências múltiplas terão efetividade. Por exemplo, avaliar um critério em que se defina qual o corte de carga aceitável para se manter a resiliência do sistema dentro de um nível aceitável. Destaca-se a necessidade premente de se realizar estudos de vulnerabilidade e a implementação de ações para melhoria de resiliência, tanto para ativos elementares, quanto para os sistemas. Apresenta-se, pois, uma proposição de se criar uma etapa de planejamento denominada Plano de Resiliência, ainda inexistente nos procedimentos atuais no Brasil, mas que já têm sido implementadas em vários países, atendendo as novas necessidades da sociedade e do setor elétrico, em consequência dos câmbios climáticos vividos. Assim, propõe-se um fluxograma para a elaboração de planos de resiliências, entendendo-se o Plano de Resiliência como sendo um planejamento de ações e investimentos a serem feitos de forma hierárquica para reduzir a vulnerabilidade de um ativo físico específico ou de um sistema elétrico mais complexo, face às ameaças associadas às mudanças climáticas (Figura 1).

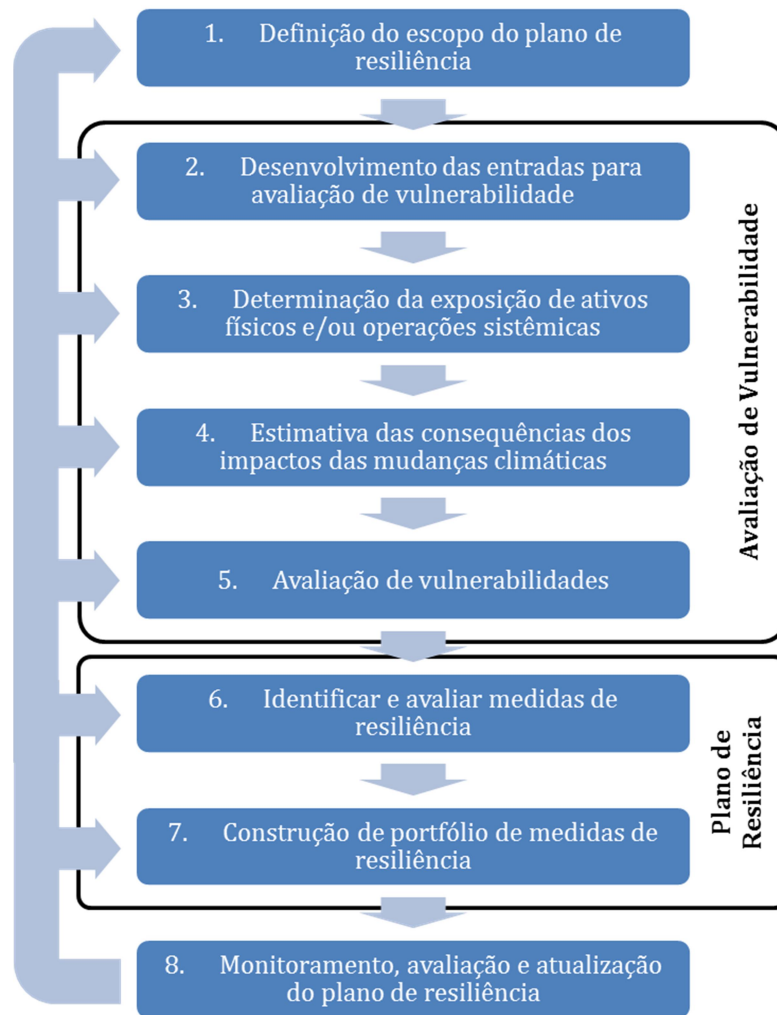


Figura 1- Fluxograma para elaboração do plano de resiliência.

As etapas descritas nesta figura podem ser, de forma sumária, assim descritas:

1. **Definição do escopo do plano de resiliência:** Motivações (mudanças climáticas); Definição do foco (produção ou consumo); Descrição técnica (geração, transmissão, distribuição e consumo, ativos elementares ou sistemas); Delimitação geográfica e social (regiões e características gerais); Consideração dos tipos de eventos climáticos a serem considerados (tendências e/ou eventos críticos).
2. **Desenvolvimento das entradas para avaliação de vulnerabilidade:** Levantar os principais impactos a serem analisados; Identificar e levantar as informações e dados necessários para caracterizar os riscos climáticos futuros e os possíveis impactos; Selecionar quais cenários de mudança climática serão considerados; Escolher quais projeções climáticas, recursos de dados e ferramentas usar.
3. **Determinação da exposição de ativos físicos e/ou operações sistêmicas:** Identificar os tipos de ameaças relacionadas às mudanças climáticas e às vulnerabilidades associadas ao ativo/sistema do setor elétrico focado; Definir os métodos para avaliação da vulnerabilidade; Entender as limitações das estimativas das variáveis focadas oriundas dos modelos climáticos de grande escala e dos métodos de regionalização (*downscaling*); Estabelecer métodos de medição dos danos como procedimento de avaliação da vulnerabilidade; Modelagem técnica dos ativos/sistemas para fins de avaliação dos danos.
4. **Estimativa das consequências dos impactos das mudanças climáticas:** Definir metodologia de avaliação de custos dos impactos climáticos (monetizáveis, como investimentos e custos operacionais, e não monetizáveis, como custos ambientais e sociais, ou outras formas de se associar a intensidade do impacto); Considerar, se necessário, os efeitos extraordinários sobre os custos, como em caso de catástrofes; Calcular os custos associados às ameaças para os elementos/sistemas definidos.
5. **Avaliação de vulnerabilidades:** Agrupamento dos ativos/sistemas para o desenvolvimento do estudo; Definir de forma técnica a ameaça (intensidade associada a um risco ou cenário, por exemplo); Estabelecer critérios para ordenamento das vulnerabilidades dos ativos/sistemas (matriz de risco-dano, por exemplo).

6. **Identificar e avaliar medidas de resiliência:** Identificar opções para melhorar a resiliência de ativos/sistemas; Estimar custos de medidas de resiliência; Estabelecer critérios para ordenar as ações de melhoria de resiliência (análise incremental da vulnerabilidade face a investimentos, por exemplo).
7. **Construção de portfólio de medidas de resiliência:** Avaliar as medidas de resiliência; Priorizar e selecionar medidas de resiliência; Integrar as ações de melhoria de resiliência com planos de expansão; Estabelecer o plano de melhoria de resiliência;
8. **Monitoramento, avaliação e atualização do plano de resiliência:** Monitorar a implementação do plano de resiliência; Atualização das informações e modelos de mudanças climáticas; Atualização das informações técnicas do ativo/sistema; Avaliação do impacto desta atualização no plano de resiliência; Atualização do plano de resiliência usando novas informações e experiência recente.

Embora se tenha claro que a implementação desse processo em todos os níveis de planejamento e para todos os tipos de ativos físicos exija muito tempo, entende-se que deve se ter uma primeira seleção, considerando aspectos regionais e técnicos, para priorizar os ativos e os sistemas que serão submetidos a esse planejamento.

Esta nova visão contrasta em alguma medida com a tendência de se identificar atributos para cada fonte de energia e precificá-los com o propósito de se obter um custo individualizado e utilizá-los na tomada de decisão de planejamento de médio e longo prazo. Essa tendência é interessante na análise de custo e benefício individualizado para cada ativo, mas não se pode esquecer do efeito sistêmico e das inter-relações entre as fontes e o transporte de energia.

As instituições hoje existentes são suficientes e, com pouco esforço de capacitação e apoio de consultoria especializada, podem suportar a evolução proposta aqui para o planejamento do setor elétrico.

4.0 - CONCLUSÃO

O setor elétrico nacional tem vivenciado fortes efeitos das mudanças climáticas, com estios mais extensos e prolongados e aumento das rajadas de ventos, com fortes impactos e, consequentemente, no sistema como um todo. É necessário, portanto, estabelecer novos conceitos, modelos, métodos e procedimentos para o planejamento setorial, seja da operação ou da expansão. Este trabalho buscou apresentar um mapeamento das principais ameaças sobre o setor elétrico e as consequências destas face às fragilidades do mesmo. Essa combinação de ameaça e fragilidade leva à vulnerabilidade setorial. Desenvolveu-se um estudo das ferramentas utilizadas e em desenvolvimento para o planejamento do setor elétrico observado que já há movimentos importantes de inclusão das mudanças climáticas nas suas modelagens. Entretanto, a visão de longo prazo, oriunda de estudos globais, deve ser incorporada de forma mais efetiva nas ferramentas de planejamento, reforçando a interação entre os modelos de distintos horizontes. Em síntese, a matriz energética tem que ter um papel relevante na ligação das transformações globais de longo prazo com as ameaças de médio prazo de caráter mais local, o que reforçará a robustez do planejamento. Finalmente, propõe-se que se crie duas novas ferramentas de planejamento, sendo a primeira um estudo de vulnerabilidade dos ativos e a segunda um plano de melhoria de resiliência.

5.0 - AGRADECIMENTOS

Este artigo tem como base o trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD), gerenciado pelo Ministério de Minas e Energia – MME (17) e executado pela iX Estudos e Projetos Ltda. – EPP.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GERLAK, A.K.; WESTON, J.; MCMAHAN, B.; MURRAY R.L.; MILLS-NOVOA, M. Climate risk management and the electricity sector. *Climate risk management*, 9, pp. 12-22, 2018;
- (2) SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P.; BORBA, B. S. M. C.; NOGUEIRA, L. P. P.; FLEMING, F. P.; TROCCOLI, A.; Harrison, M. E Boulahya, M. S. Energy Sector Vulnerability to Climate Change: a review. *Energy*, 38: 1-12, 2012;
- (3) PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A.R.; COSTA, R.S.; LIMA, F.J.L.; RÜTHER, R.; ABREU, S.L.; TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G. Atlas brasileiro de energia solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.: il. (E-BOOK). ISBN 978-85-17-00089-8;
- (4) WILBANKS, T. J.; V. BHAJ, D. E; BILELLO, S. R.; ET AL. Introduction In Effects of climate change on energy production and use in the United States, a report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, D.C. 2007;
- (5) NAP GLOBAL NETWORK. About the Network. 2018a. Disponível em: <http://napglobalnetwork.org/about/>. Acesso em: 25 jul. 2018.
- (6) BRUCKNER T.; ET AL. Energy Systems. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [EDENHOFER, O., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 511-597, 2014;

- (7) OSCAR JR, A.; SILVA, W. L.; RUFFATO, V.; BARRETO, R.; FREITAS, M. Evaluation of Renewable Energy Vulnerability to Climate Change in Brazil: A Case Study of Biofuels and Solar Energy. *Smart Grid and Renewable Energy*, 6(8): 221, 2015. <https://doi.org/10.4236/sgre.2015.68019>;
- (8) PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; PES, M.P.; DA CRUZ SEGUNDO, E.I.; LYRA, A.A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. *Renewable Energy*, 49: 107-110, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.053>;
- (9) PES, M.P. Impactos das variações e mudanças climáticas sobre os ventos extremos e seus efeitos no setor elétrico brasileiro. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2015. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.25.13.26/doc/publicacao.pdf/>. Acesso em: 09 Jul. 2019;
- (10) REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; SOUZA, M. R. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. *Climate Dynamics*, 51(1-2): 187-205, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3913-5>;
- (11) ASSAD, E.; PINTO, H. S. (COORD.). Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil. EMBRAPA e UNICAMP. 2008. https://www.agritempo.gov.br/climaeagricultura/CLIMA_E_AGRICULTURA_BRASIL_300908_FINAL.pdf/. Acesso em: 10 jul. 2019;
- (12) NUNES, D. S.; COLLICCHIO, E. Efeito das Mudanças Climáticas no Zoneamento Agroclimático do Eucalyptus urophylla no Estado do Tocantins. III Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa, Extensão e Cultura. Universidade Federal do Tocantins. Palmas. 2016. Disponível em: <http://eventos.uft.edu.br/index.php/sic/XII/paper/viewFile/2679/699/>. Acesso em: 09 Jul. 2019;
- (13) CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3: 512-527, 2014a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>;
- (14) MAGRIN, G.O. ET AL. Central and South America in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (eds. Barros, V.R. et al.), 1499-1566. 2014. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap27_FINAL.pdf. Acesso em: 09 Jul. 2019;
- (15) LIMA, J.W.M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J.A. (ED.). Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. São Paulo: AES Tietê. Hunter Books Editora, 2014. 360 p;
- (16) NETO, A.R.; PAZ, A.R.; MARENGO, J.A.; CHOU, S.C. Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(12): 1103-1127, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>;
- (17) PROJETO META. Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral; Banco Mundial, Ministério de Minas e Energia, 2018a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/projeto-meta/dados-abertos/>. Acesso em: 09 Jul. 2019.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Afonso Henriques Moreira Santos possui graduação em Engenharia Elétrica (1978), mestrado em Engenharia Elétrica (1981), ambos pela Universidade Federal de Itajubá. Possui doutorado em Engenharia Elétrica (Planejamento de Sistemas Energéticos) pela Universidade Estadual de Campinas (1987) e pós-doutorado pelo Centro International de la Recherchesur l'Environnement et le Développement - CIRED, da Ecole de Hautes Etudes en Sciences Sociales - EHESS, Paris, França (1990- 91). Atualmente é Livre Docente na Universidade de São Paulo – USP e Universidade Federal de Itajubá.

Ricardo Alexandre Passos da Cruz é Engenheiro Eletricista (2003) com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá, tendo obtido o título de Mestre em Engenharia da Energia (2009) também pela Universidade Federal de Itajubá. Foi pesquisador do Centro de Excelência em Eficiência Energética (EXCEN) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) (2004/2008). Atualmente, é Diretor Geral da iX Estudos e Projetos Ltda.

Luis Fernando Badanhan possui graduação em engenharia pela Universidade de São Paulo (1993), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (1997) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2001).

Cássia Gabriele Dias possui graduação em Ciências Atmosféricas (2015) e Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (2017) pela Universidade Federal de Itajubá. Atualmente é Meteorologista pela iX Estudos e Projetos.

Priscila da Silva Tavares possui doutorado em Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mestrado em Meteorologia pelo INPE; Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Atualmente, é consultora do Projeto CSI - Ampliação dos Serviços Climáticos em Investimentos de Infraestrutura, financiado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em parceria com a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

Leopoldo Uberto Ribeiro Junior é doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Estadual de Campinas, possui mestrado em Engenharia da Energia e graduação em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá.

Roberto de Mattos é bacharel em Ciências Contábeis pela Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas do Sul de Minas (2000) e mestrado em Engenharia de Energia pela Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI (2003). Doutorado em Engenharia de Água e Solo pela Universidade Federal de Lavras, UFLA (2009). Graduando em Gestão Ambiental pela UNICESUMAR. Atualmente é Gestor Técnico da FUNDAÇÃO ROGE e diretor do Núcleo Integrado de Capacitação Técnica NICATEC.

Jose Wanderley Marangon Lima possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia (1979), graduação em Administração de Empresas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1980), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1990) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1994), pós-doutorado na University of Texas at Austin, USA (2006). Atualmente é professor titular voluntário da UNIFEI, presidente da FAPEPE e consultor.

João Carlos de Oliveira Mello recebeu os títulos de Engenheiro, Mestre em Ciências e Doutor em Ciências, todos em Engenharia Elétrica, na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ) em 1983, 1988 e 1994 respectivamente. Atualmente Dr. João Carlos é Sócio Presidente da Thymos Energia Consultoria.

Bárbara Karoline Flauzino possui graduação em Engenharia Ambiental (2008) pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (2012) também pela UNIFEI, desenvolvendo pesquisas na área de Conservação dos Solos. Desde 2008 é Engenheira Ambiental na iX Estudos e Projetos.

Benedito Cláudio da Silva possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (1996), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (2000) e doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2005). Atualmente é professor Adjunto na UNIFEI.