



CONTRATO Nº 12/2018

TDR Nº 66

ANÁLISE DOS REFLEXOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS METODOLOGIAS DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

PRODUTO 6

SUMÁRIO EXECUTIVO

META

PROJETO DE ASSISTÊNCIA
TÉCNICA DOS SETORES DE
ENERGIA E MINERAL



BANCO MUNDIAL
BIRD • AID | GRUPO BANCO MUNDIAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Pesquisa / Produto / 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, em 1º de março de 2012.

Dezembro/2018

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 | AS AMEAÇAS CLIMÁTICAS..... | 4 |
| 2.1 | Projeções do IPCC e seus reflexos no Brasil..... | 4 |
| 2.2 | Incertezas das projeções..... | 7 |
| 3 | VULNERABILIDADE ELETROENERGÉTICA FACE ÀS AMEAÇAS CLIMÁTICAS | 10 |
| 3.1 | Novos conceitos no planejamento | 10 |
| 3.2 | Vulnerabilidade energética | 12 |
| 3.3 | Vulnerabilidades do setor elétrico..... | 16 |
| 4 | REGIME HIDROLÓGICO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS..... | 19 |
| 4.1 | Projeções de uso consuntivo da água..... | 19 |
| 4.2 | Modelos para simulação do uso do solo e vazão afluente | 21 |
| 4.3 | Proposição de aperfeiçoamentos metodológicos para projeção de vazão | 22 |
| 4.4 | Estudo de caso: Impacto das mudanças climáticas na Bacia do rio São Francisco | 25 |
| 5 | MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O PLANEJAMENTO DO SETOR | 33 |
| 6 | PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO | 36 |
| 6.1 | Planejamento energético..... | 36 |
| 6.2 | Planejamento da geração e da transmissão..... | 39 |
| 7 | ANÁLISE CRÍTICA DO PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E PROPOSTAS FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS | 51 |
| 8 | RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS..... | 63 |

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta o sumário dos Produtos desenvolvidos no âmbito do projeto META (MME/BIRD CONTRATO Nº 12/2018), intitulado “**Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos**”, contemplando as informações mais relevantes, de uma forma mais sucinta e interligada, permitindo a compreensão do problema, o seu diagnóstico e as ações propostas. O Produto 1, intitulado “Plano de Trabalho Executivo”, o Produto 2, intitulado “Estado da Arte da Vulnerabilidade do Setor Elétrico”, o Produto 3, intitulado “Modelagem Climática para a Geração Elétrica”, o Produto 4, intitulado “Metodologia para Uso Consuntivo da Água” e o Produto 5, intitulado “Análise das Mudanças Climáticas junto ao Planejamento de Expansão de Sistemas Elétricos”, estão concatenados de forma a se ter primeiramente uma fundamentação, avançando para diagnósticos e propostas (Figura 1).

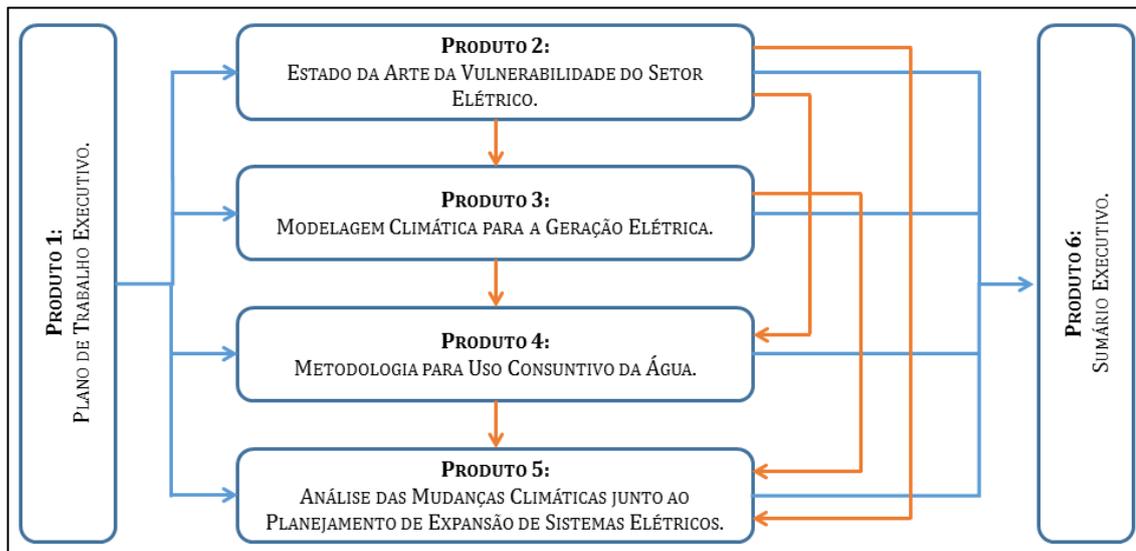


Figura 1 - Abordagem metodológica simplificada e as interações entre os Produtos do atual projeto.

Apesar do desenvolvimento deste trabalho ter seguido a sequência da Figura 1, para uma melhor compreensão deste foi sugerida outra sequência na apresentação deste sumário. Apresentam-se inicialmente as ameaças ao setor energético advindas das

alterações do clima e das incertezas na projeção das variáveis climáticas. Tendo em vista a dominância da geração hidrelétrica no país, apresentam-se os impactos das mudanças climáticas nas afluências aos reservatórios e os correspondentes valores energéticos, incluindo os efeitos das demandas consuntivas, seguindo-se um estudo de caso na Bacia do rio São Francisco. Os possíveis efeitos dessas mudanças são depois avaliados no âmbito do planejamento do setor elétrico. Ao final, faz-se uma análise do planejamento setorial nacional e, atendendo o objetivo principal deste trabalho, propõem-se evoluções para os modelos e processos do planejamento do Setor Elétrico Brasileiro (SEB), adaptando-se às ameaças das mudanças climáticas.

2 AS AMEAÇAS CLIMÁTICAS

2.1 Projeções do IPCC e seus reflexos no Brasil

Nas últimas décadas, foram intensificadas as discussões e os estudos referentes à variabilidade e às mudanças do clima, resultando em inúmeras pesquisas que comprovaram consideráveis alterações na composição da atmosfera e, de modo consequente, nas variáveis relacionadas ao clima. Essas pesquisas têm embasamento nas análises do clima desde séculos passados e de projeções climáticas para o todo século XXI. A Figura 2 é uma representação esquemática de como se geram essas projeções, em que, em geral, cenários socioeconômicos e de emissões de gases do efeito estufa (GEE) são incorporados nos Modelos Climáticos Globais (MCG), permitindo verificar trajetórias das variáveis climáticas até o final deste século. Dado que a resolução desses modelos é baixa, para uma análise mais regional, são utilizados Modelos Climáticos Regionais (MCR), os quais recebem as condições de inicialização e de contorno advindas dos MCG e geram projeções com resolução mais refinada, portanto, representando melhor as características locais.

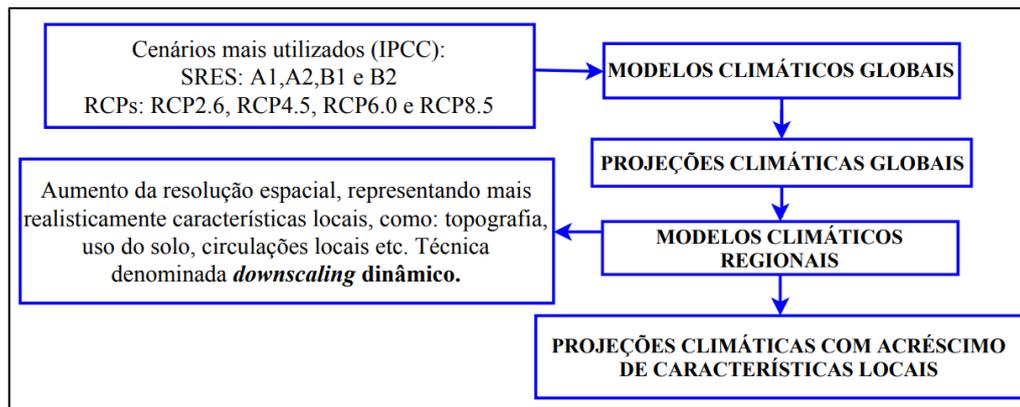


Figura 2 - Representação esquemática das etapas no processo de projeções climáticas.

O Quinto Relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC (*Assessment Report 5* ou AR5), lançado em 2014, é baseado nos caminhos representativos das concentrações dos GEE e suas forçantes radiativas no clima, sendo esses cenários denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Os modelos climáticos usados na elaboração do AR5 apresentaram melhorias em relação aos modelos utilizados AR4, como, por exemplo, a melhor representação dos oceanos e os seus efeitos na camada terrestre, conforme apresentado no Produto 3 (Modelagem Climática para a Geração Elétrica). A abordagem atual dos cenários do AR5 inicia com a evolução do nível de forçamento radiativo até 2100 com trajetórias que estão relacionadas a um espectro amplo de cenários de desenvolvimento socioeconômico, tecnológicos ou de emissões. As vantagens desses cenários é que representam um maior número de realizações de clima, com base na literatura, não sendo previsões ou resultantes de recomendações ligadas a políticas públicas. Além de que a inclusão de mais cenários de emissão possibilita considerar mais incertezas em relação às projeções do futuro.

Desde o AR4 os modelos continuaram a ser desenvolvidos e aprimorados e, muitos Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano (AOCGMs; sigla do inglês *Atmosphere–Ocean General Circulation Models*) foram aprimorados para Modelos do Sistema Terrestre (ESMs; sigla do inglês *Earth System Model*), os quais incluem representações de ciclos bioquímicos, como emissões do ciclo de carbono, enxofre ou ozônio. Esses modelos conseguem simular respostas passadas e futuras do clima ao

forçamento externo, no qual os *feedbacks* biogeoquímicos desempenham uma importante função.

Segundo estudos vistos no Produto 3 (Modelagem Climática para a Geração Elétrica), outras mudanças no AR5, em relação ao AR4, foram: o aumento da complexidade; melhoria da resolução; um considerável avanço dos modelos de simulações de eventos extremos; melhoria nas simulações do ozônio estratosférico; melhor desempenho na simulação do clima global do presente, com melhores simulações da precipitação, especialmente para as latitudes tropicais e, da temperatura da superfície. É notada também, melhorias nas simulações de trajetórias de tempestades, aquecimento e absorção de calor dos oceanos e, ciclo sazonal da extensão do gelo marinho. Porém existem tendências de modelos subestimarem a extensão do gelo marinho ártico.

No AR5, a chance de que o homem tenha causado mais da metade do aumento da temperatura média global registrada entre 1951 e 2010 passou de 90% (*muito provável*, divulgado no AR4) para 95% (*extremamente provável*). Quanto às projeções climáticas, há indicativo de aumento na temperatura média global de 0,3°C a 1,7°C de 2010 a 2100, para o cenário mais otimista (RCP2.6) e de 2,6°C a 4,8°C, para o cenário mais pessimista (RCP8.5).

Os estudos baseados nas projeções do AR5, também analisados no Produto 3 (Modelagem Climática para a Geração Elétrica), apontam para o Brasil um aumento da temperatura do ar em todo o país. De acordo com os estudos, os ventos se intensificarão durante o verão e inverno, nas regiões Sudeste, Norte e Nordeste. Para o Sul os estudos encontrados apontam para a redução do vento. Já para a região Centro-oeste não há indicativos de mudanças consideráveis.

Com relação à precipitação, a maioria dos estudos referenciados indica redução na região Norte e Nordeste, assim como aumento na região Sul. Na região Sudeste, os estudos apontam para diminuição nos meses de verão. Na região Centro-oeste os estudos mostram redução da precipitação durante o verão e não apontam alterações significativas durante o inverno. Vale destacar que ainda são escassos os estudos

realizados a partir das projeções do AR5 para outras variáveis climáticas, além de temperatura do ar e precipitação.

Com relação aos eventos climáticos extremos, as projeções até 2100 indicam um aumento de extremos de calor, bem como a diminuição de extremos de frio para todo o Brasil. As projeções também mostram o aumento dos extremos de precipitação para a região Sul, Sudeste e oeste da Amazônia, podendo estar associados a ocorrências de enchentes, inundações e deslizamentos. Indicam também, o aumento da intensidade de dias secos consecutivos no leste da Amazônia e Nordeste brasileiro. Em relação aos extremos de vento, as simulações de modelos apontam para uma redução destes extremos em resposta ao aquecimento dos oceanos tropicais.

2.2 Incertezas das projeções

As “incertezas” são elementos que fazem parte de qualquer projeção de mudanças climáticas. É preciso considerar que tais projeções são produzidas a partir de modelos climáticos e que estes não podem prever com certeza um evento climático futuro, além do mais, ainda há um conhecimento incompleto do funcionamento do sistema climático. Diferentemente da “previsão” de tempo, a qual tem por objetivo “diagnosticar” fenômenos meteorológicos e suas interações seguindo um calendário (data) para ocorrência do evento, as “projeções” climáticas tem por objetivo fornecer as condições plausíveis do clima futuro (tendências) sob uma avaliação média de um período de tempo a longo prazo – geralmente são consideradas integrações multidecenais – sob cenários de emissões dos GEE. Quanto às emissões dos GEE, não é possível “prever” as mudanças nas emissões futuras, pois dependem de diversos fatores socioeconômicos, tais como composição das fontes de energia no futuro e o caminho do desenvolvimento, além de fatores como alterações demográficas, desta forma, são considerados diferentes cenários para abranger uma gama maior de horizontes possíveis, geralmente, os definidos pelo IPCC em seus relatórios.

Na modelagem numérica da atmosfera e do processo climático, os processos físicos ou químicos que possuem escala de tempo e comprimento menores do que as representadas pela resolução do modelo, mas que seus efeitos médios na área e no

tempo não são desprezíveis, são simulados através de funções de outros parâmetros representados pelo modelo. Essa técnica é chamada de parametrização. Os principais processos físicos parametrizados são a viscosidade, a estrutura da camada limite planetária bem próxima da superfície (que afetam o vento), a radiação (solar e infravermelha) e a convecção associada às nuvens. As parametrizações dessas variáveis contribuem para a geração de incertezas na simulação, uma vez que são geradas a partir de outras variáveis, as quais já carregam certo nível de incerteza. Desta forma, há um maior nível de incerteza sobre estas variáveis do que da temperatura, por exemplo. Vale deixar claro também, que há vários métodos de parametrizações para as mesmas variáveis e o julgamento da escolha das parametrizações mais adequadas deve advir do pesquisador que irá realizar as simulações. Em relação à escolha da parametrização mais adequada, com intuito de diminuir as incertezas, não há uma solução unânime que resolva corretamente todos os processos físicos. Na bibliografia utilizada no Produto 3 (Modelagem Climática para a Geração Elétrica) nota-se que a maior parte dos estudos analisa apenas precipitação e a temperatura, estudos de outras variáveis são escassos ou inexistentes, tornando difícil afirmar o quão precisas elas são.

No AR5 é realçado que em escalas regionais, a confiança na capacidade do modelo de simular a temperatura da superfície é menor do que em escalas maiores. Apesar disso, os vieses regionais são em média quase zero para a temperatura da superfície. Resultados das simulações de nuvens também apresentaram melhoras. Entretanto, ainda há grandes incertezas, tanto para precipitação quanto para nuvens, principalmente em escalas regionais. De acordo com o AR5, essas incertezas advêm de dúvidas não apenas em relação a incertezas observacionais, mas também, há fortes indícios de que as incertezas em processos de nuvens, também explicam muito da propagação da sensibilidade climática modelada.

As principais fontes de incertezas nos modelos climáticos tanto globais como regionais, podem ser divididas em dois grupos principais, apresentados na Figura 3. Entretanto, há métodos que podem ser aplicados para reduzir tais incertezas e alguns destes estão apresentados na Figura 4.

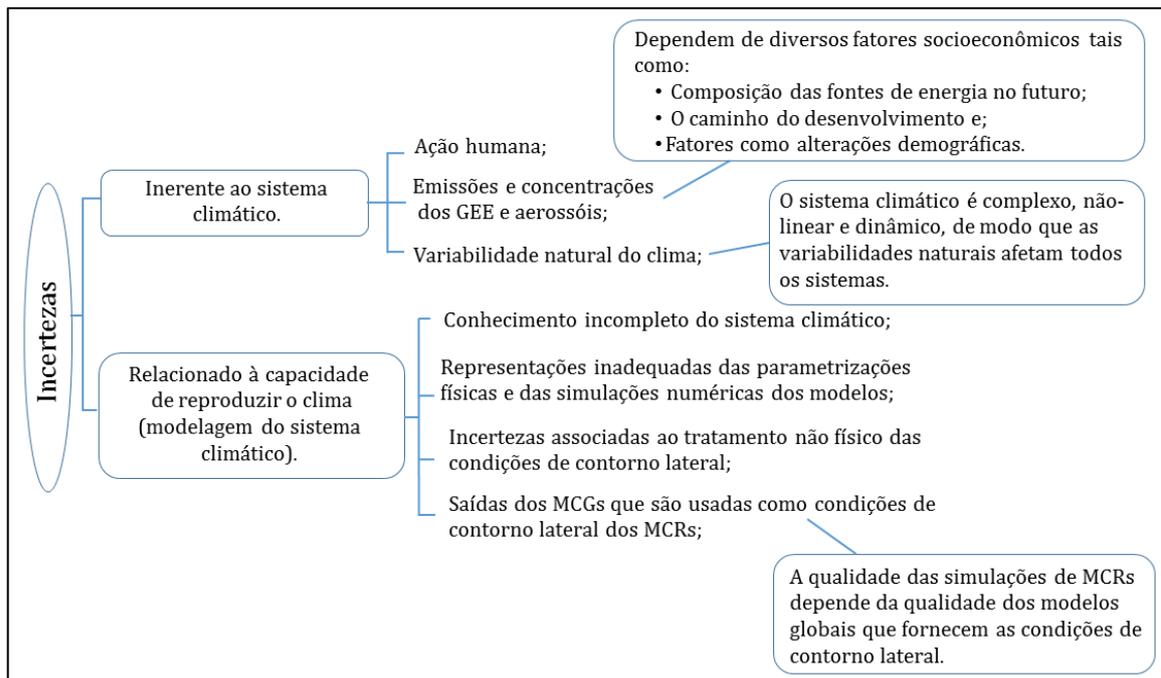


Figura 3 - Sintetização das incertezas relacionadas às projeções climáticas.

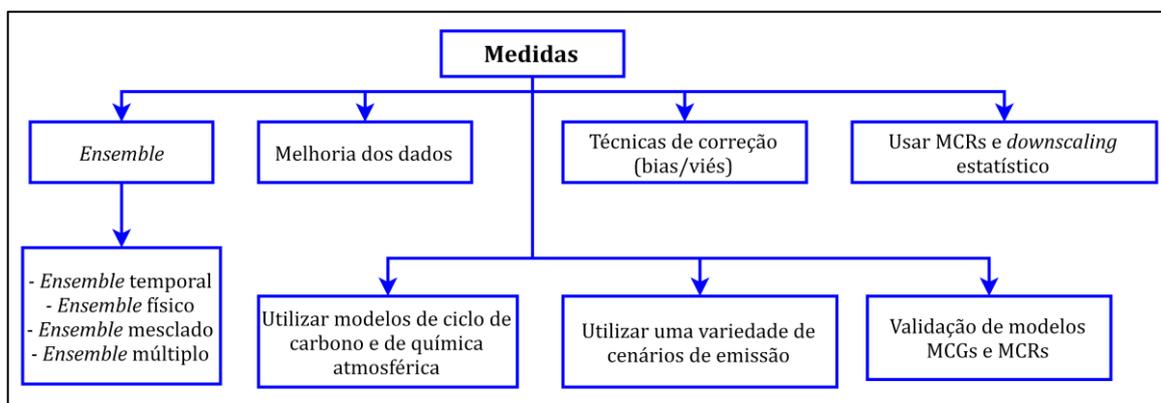


Figura 4 - Medidas para diminuir as incertezas relacionadas às projeções climáticas.

Apesar das imprecisões dos modelos climáticos, a análise das simulações destes modelos tem demonstrado trajetórias das variáveis climáticas com grande similaridade com o clima observado. Métodos combinados a partir de “ensemble” ou análise de viés podem dar informações importantes para a tomada de decisão em vários campos da atividade humana como a geração de energia elétrica.

3 VULNERABILIDADE ELETROENERGÉTICA FACE ÀS AMEAÇAS CLIMÁTICAS

3.1 Novos conceitos no planejamento

Embora o conceito de risco seja bem fundamentado dentro do pensamento técnico, a matemática desenvolvida para tal se baseia em observações do passado. Assim, a estimativa de risco assume que o futuro repete o passado, levando, com total segurança, a se dizer qual a probabilidade de se ter uma condição adversa, denominada risco. Os riscos por aí calculado têm aplicação limitada a condições específicas e não são capazes sozinhos de prever todos os eventos. Há sempre a possibilidade de ocorrer algo inusitado, muitas vezes mais danoso que um risco probabilisticamente calculado. E, pelo dano que esse pode causar, caracteriza-se como uma ameaça ou perigo (em inglês, *threat* ou *hazard*, respectivamente). Esses eventos são denominados em inglês *High Intensity and Low Probability (HILP)* (Grande Impacto e Reduzida Probabilidade).

Entende-se por ameaça ou perigo sistêmico, em um sentido mais amplo, uma condição social, ambiental ou técnica que atua sobre um sistema de interesse e que extrapola os valores usuais, podendo trazer perdas significativas e muitas vezes irreparáveis. Essa relação imbricada entre o sistema e o seu ambiente é essencial para bem defini-la. As condições de exposição do sistema a esse ambiente vão definir a ameaça, que pode ser analisada, fundamentalmente, segundo dois caminhos: probabilístico ou cenarização. Na análise probabilística, a ameaça estará associada a uma determinada probabilidade, e com isto, possibilitando a definição de risco. O conceito de risco, por sua vez, vem sendo estendido, extrapolando os métodos probabilísticos, avançando para análises possibilísticas e até mesmo para métodos qualitativos, ao invés de quantitativos. Assim também se deu com o trato da ameaça, destacando-se os métodos de cenarização, muitos deles resultantes de simulações determinísticas.

A vulnerabilidade deve ser uma medida do impacto (diretamente ou indiretamente) no usuário/receptor, provindo de uma ameaça externa sobre um sistema. Ela pode e deve (na maioria dos casos) ter uma visão transversal, indo além do serviço prestado, analisando as consequências sociais, econômicas e ambientais da não prestação do serviço.

Aparece nesse caso o conceito de fragilidade de elementos ou sistemas que não se moldam ou se transformam frente a um evento, que é uma função inversa do conceito de resiliência. Os sistemas devem buscar se adaptar, tornando-se mais resilientes, para manter a vulnerabilidade em níveis adequados, em face de determinadas ameaças. As infraestruturas, normalmente, são projetadas com margens significativas de segurança, conferindo-lhes grande resistência (pouco frágeis). A resistência, em si, é um elemento importante da resiliência, mas não é único e vem perdendo sua importância relativa com o tempo, à medida que tecnologias e procedimentos permitem reduzir o tempo de interrupção de um serviço ou o impacto dessa interrupção. Para aumentar a resiliência de um sistema deve-se torna-lo mais capaz de prever, absorver, adaptar e rapidamente recuperar de um evento disruptivo (ameaça). A Fragilidade intrínseca (Fi) de um sistema vista de forma estática, pode ser “compensada” por: desenvolvimento de instrumentos dinâmicos de Predição (Pr) que antevêm a ameaça; criação de capacidade de Adaptação (Ad), que transforma o sistema, face às predições; evolução da habilidade de Absorção (Ab), principalmente no lado do usuário impactado, reduzindo os danos; tempos relativamente reduzidos de Recuperação (Re), que reduzem os danos.

Um dos instrumentos mais adequados para se conseguir isso é a integração do sistema físico com sistemas cibernéticos (Tecnologia da Informação e da Comunicação-TIC), denominados sistemas ciber-físicos. Uma característica interessante desses sistemas integrados ciber-físicos é que, predominantemente, a camada de TIC é mais confiável que a camada física. Por outro lado, a infraestrutura cibernética é mais vulnerável a ataques. Este, talvez, seja um dos temas que vai dominar a discussão no setor energético no futuro próximo.

Resumindo, a Vulnerabilidade deve ser vista como uma operação binária entre a Ameaça, dependente do risco (R) ou cenário (C) adotado, e a Resiliência, que é função da Fragilidade intrínseca (impactando diretamente a resiliência) e das capacidades de Predição (Pr), Adaptação (Ad), Absorção (Ab) e de Recuperação (Re) (impactando inversamente a resiliência).

3.2 Vulnerabilidade energética

O sistema elétrico é um elemento do complexo sistema energético de um país ou região. No caso brasileiro, até recentemente, havia um significativo isolamento entre eles, tendo em vista a característica hidrelétrica predominante, a pouca conexão na formação de preços e a pouca elasticidade cruzada da demanda entre os diferentes energéticos. Esse quadro está passando por profundas mudanças, o que exige uma análise integrada do setor elétrico com outros setores energéticos. Assim, a área de energia elétrica pode passar a ser fortemente afetada pelas vulnerabilidades de outros setores energéticos (com destaque para os combustíveis fósseis), exigindo-se uma visão e planejamento sistêmicos.

Os agentes envolvidos no setor de energia (incluindo governos, reguladores, empresas de energia e instituições financeiras) precisam internalizar os conceitos de resiliência e adaptação às mudanças climáticas, bem como identificar as ações necessárias para enfrentar esses desafios. Nesse sentido, a Agência Internacional de Energia (IEA, sigla do inglês), a Cooperação Econômica Ásia-Pacífico (APEC, sigla do inglês) e a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, sigla do inglês) propuseram medidas para tornar o setor de energia mais resiliente, que podem ser observadas na Figura 5.

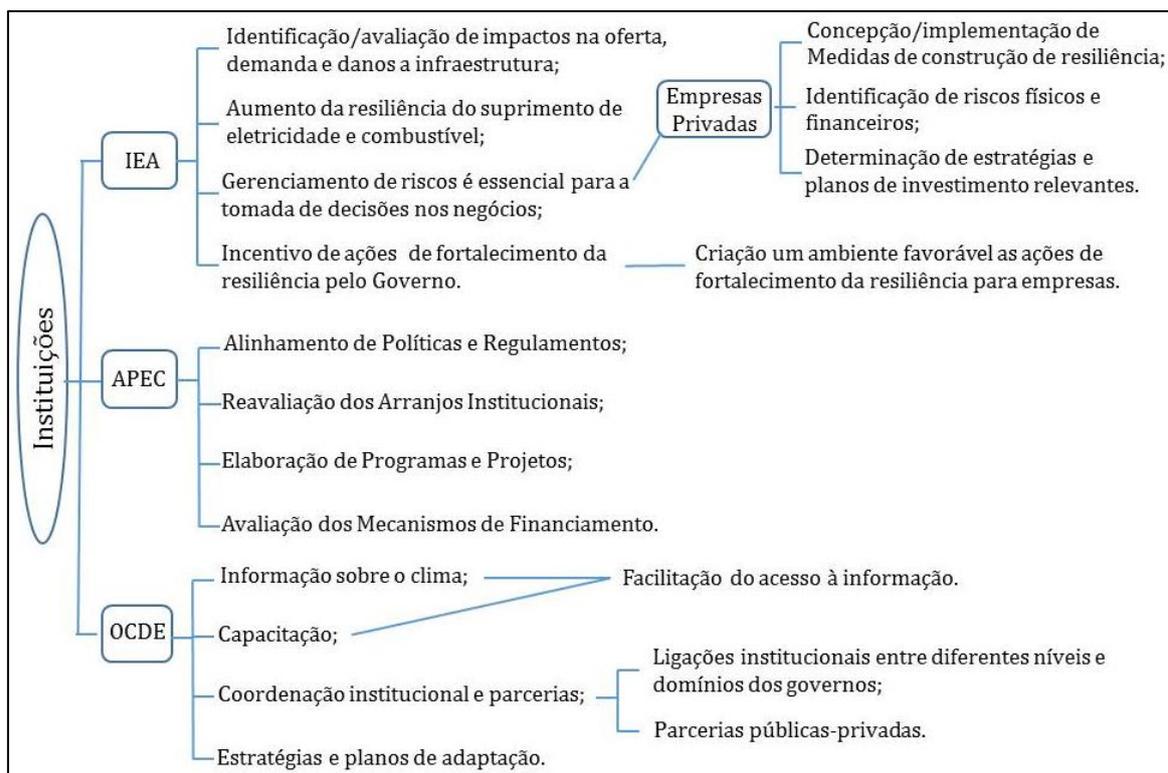


Figura 5 - Algumas medidas de resiliência propostas para o setor de energia. Adaptado do Produto 2 (Estado da Arte da Vulnerabilidade do Setor Elétrico).

O Plano Nacional de Adaptação (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. Um princípio orientador dos processos do PNA é que ele “visa aumentar a consistência da adaptação e planejamento de desenvolvimento nos países, ao invés de duplicar esforços”. O setor energético, naturalmente, tem, aí, um papel relevante, como pode ser visto na Tabela 1, que apresenta possíveis impactos das mudanças climáticas, ações adaptativas e quais são os agentes principais que devem realizar estas medidas de adaptação.

Tabela 1 - Possíveis impactos das mudanças climáticas, ações adaptativas e quais são os agentes principais que devem realizar estas medidas de adaptação. Adaptado do Produto 5 (Análise da Mudança Climática junto ao Planejamento de Expansão de Sistemas Elétricos).

| Mudança climática | Impacto | Ações adaptativas possíveis |
|---|--|---|
| Aumento da temperatura média. | Aumento da demanda para resfriamento, redução da demanda para aquecimento. | Aumentar a capacidade regional de geração de energia elétrica; planejar e implementar maior capacidade de entrega; levar em conta a mudança padrões de demanda (verão-inverno, estação úmida-seca, norte-sul) ao planejar instalações (Recursos para Futuro - Instrumentos de política, RFF-PI). |
| | | Pesquisa e desenvolvimento (P&D) na criação de espaços melhor refrigerados; construção de revestimentos mais eficientes e acessíveis; formar parcerias com centros de P&D. |
| | | Liderar pelo exemplo – climatização de edifícios por agências do governo e gerenciamento do uso de energia a fim de reduzir demandas de resfriamento. |
| | Ondas de calor mais frequentes e/ou mais longas. | Garantir que os requisitos de energia de populações especialmente vulneráveis sejam satisfeitos, especialmente durante as ondas de calor. |
| | | Melhorar a eficiência do uso de energia, especialmente residências e edifícios comerciais, por exemplo: Auditorias energéticas; estabelecimento de tarifas adequadas; contingência planejamento para prováveis interrupções de fornecimento de eletricidade sazonais. |
| | | Abordar a vulnerabilidade a ondas de calor na transmissão e sistemas de entrega. |
| Redução da eficiência e capacidade das usinas de energia devido ao aumento da temperatura ambiente. | Melhorias na eficiência da geração e entrega de energia, com investimentos em infraestrutura e sistema de arrefecimento. | |
| | Fornecer incentivos governamentais para estudar a questão da descentralização da produção de energia a fim de reduzir riscos (RFF-PI). | |
| Alterações em precipitação e disponibilidade de água. | Alterações em precipitação e disponibilidade de água. Afeta principalmente as hidrelétricas. | Desenvolver estratégias de geração de energia elétrica com menor consumo de água, especialmente para resfriamento de usinas termelétricas; Uso de fontes de água não tradicionais; planejamento de contingência e redução da geração de energia hidrelétrica, especialmente em regiões dependentes de derretimento de neve. |

| Mudança climática | Impacto | Ações adaptativas possíveis |
|--|---|---|
| | | <p>Acelerar o desenvolvimento de tecnologias de dessalinização de baixa energia; ciclos mais altos de concentração no resfriamento sistemas de água.</p> <p>Diversificar as fontes de energia para fornecer um portfólio mais robusto de opções.</p> <p>Estabelecer incentivos para a conservação da água em sistemas de energia, incluindo o desenvolvimento tecnológico e planejamento integrado de conservação de água e energia, por exemplo.</p> |
| Alterações em intensidade, tempo e localização de eventos climáticos extremos. | Extremos de velocidade do vento: Afeta principalmente parques eólicos. | Projeto e engenharia de turbinas, proteção baseada na direção. Gerenciar a vegetação; melhorar a previsão de rajadas de vento. |
| | Aumento da frequência de temperaturas extremamente altas, desencadeando: a redução da eficiência térmica e de resfriamento. | Refrigeração de edifícios e de pilhas de carvão; aumentar a capacidade do sistema, aumentar a tensão na linha para reduzir a flecha do condutor, adicionar resfriadores externos aos transformadores. |
| | Eventos de precipitação extrema: Perturbação de energia, conversão e geração. Nas hidrelétricas, por exemplo, causaria danos a barragens e turbinas, perda de produção devido à liberação de água através de canais de derivação etc. | <p>Aumentar a resiliência a interrupções de energia e outras ameaças; expandir redundância na transmissão de eletricidade e capacidade de armazenamento de combustível.</p> <p>Fortalecer as infraestruturas para suportar o aumento de vento, raios e outros estresses relacionados a tempestades; a longo prazo considerar realocação de infraestruturas para regiões menos vulneráveis.</p> |
| | Eventos de precipitação extrema: Danos mecânicos a linhas de transmissão, torres, subestações e desligamentos causados por vibrações nos cabos. | Avaliar a vulnerabilidade do setor energético regional e comunicar vulnerabilidades; planejamento de contingência; preparar-se para interrupções no fornecimento; ajustar os padrões de carga de vento e; redirecionar as linhas ao longo das estradas ou através dos campos abertos. |
| Elevação do nível do mar. | Riscos para infraestruturas em áreas de regiões costeiras vulneráveis. | Realizar análises regionais de vulnerabilidade de infraestrutura de energia em áreas costeiras para o aumento do nível do mar; defender planejamento responsável do uso da terra e planejamento de contingência. |

3.3 Vulnerabilidades do setor elétrico

Assim como a forma de gerar energia elétrica afeta o clima, esta também é fortemente impactada pelo clima. As variáveis climáticas, de uma forma geral, afetam diretamente as fontes primárias das centrais renováveis, e, também, as formas de conversão, independentemente de serem renováveis ou não, postas as características técnicas das centrais.

Vale ressaltar, que não é apenas a geração de energia que é fortemente impactada pelas mudanças do clima, a infraestrutura do setor elétrico, que foi construída para suportar uma gama conhecida de condições históricas, também é vulnerável a essas mudanças. 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 quais são as fragilidades do sistema frente a essas ameaças e qual é a capacidade do sistema de se reestruturar e se reestabelecer em casos de danos.

O Brasil possui um parque gerador essencialmente renovável, mas disperso, com um sistema de transmissão interligando todo ele, o que lhe infere características peculiares de vulnerabilidade. As fontes renováveis são fortemente afetadas pelo clima, com alterações sensíveis nas afluências energéticas e que têm forte caráter geográfico.

A infraestrutura de transporte também pode ser afetada em sua segurança operacional. Destacam-se entre estas ameaças o aumento das condições propícias para as queimadas e as descargas atmosféricas, além do aumento das cheias e das rajadas de vento. Com relação às descargas atmosféricas, verifica-se uma forte correlação positiva com o aumento de temperatura. Dessa forma, mesmo não havendo evidências da influência das mudanças climáticas na ocorrência de tempestades elétricas, efeitos localizados de aumento de temperatura podem fazer aumenta-las.

A Figura 6 apresenta uma síntese dos impactos climáticos sobre fontes eletroenergéticas e estruturas de transporte de energia elétrica, destacando ações de melhoria de resiliência.

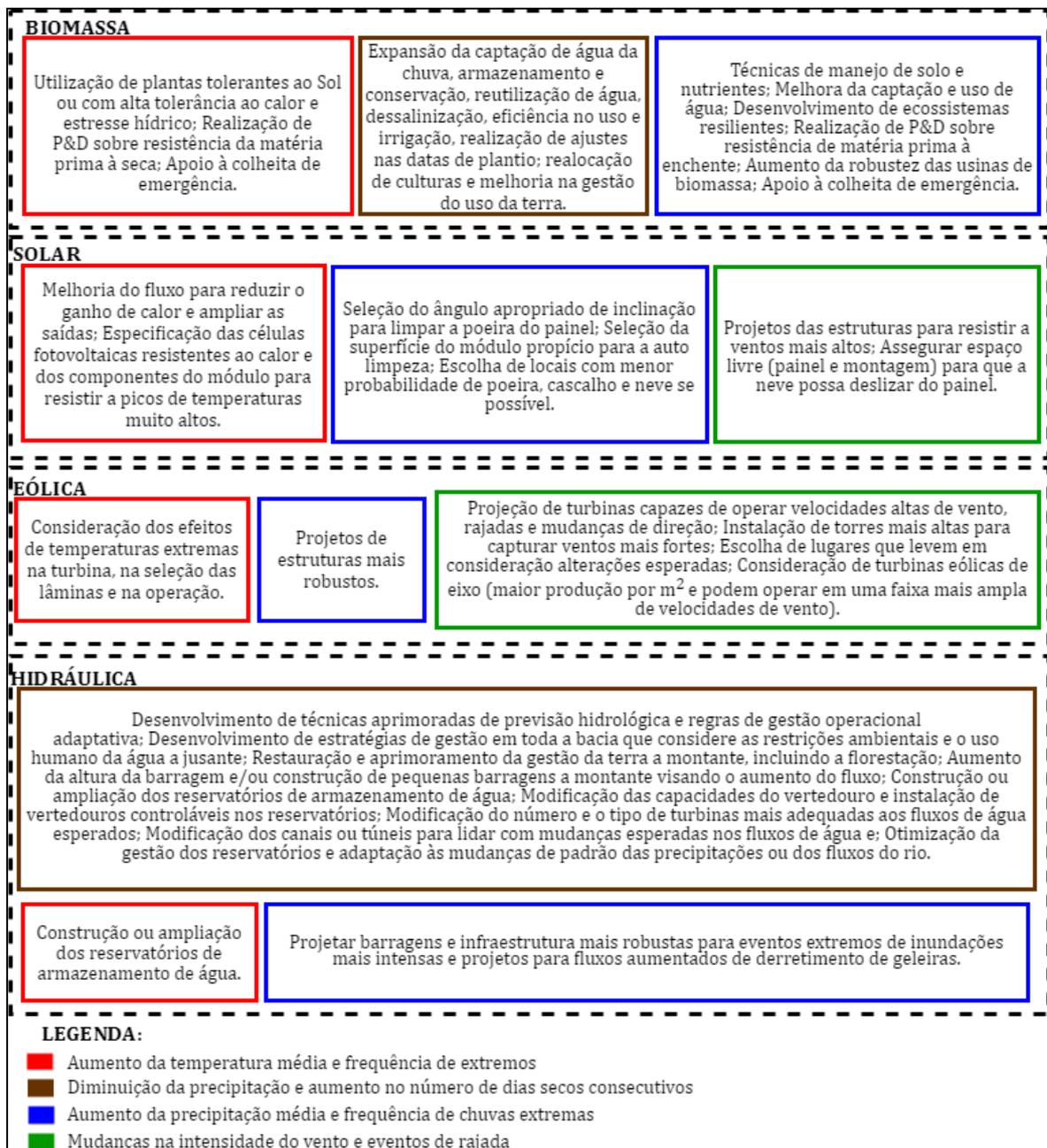


Figura 6 - Exemplos de medidas de resiliência para diferentes fontes energéticas.

Adaptado da tabela elaborada pela APEC.

A Tabela 2 exemplifica um conjunto de medidas para cada tipo de impacto climático que podem ser consideradas, tanto em sistemas de transmissão quanto na distribuição de energia (T&D).

Tabela 2 - Exemplos de Medidas de Resiliência para T&D. Elaborado pela APEC.

| Impacto Climático | Medida de Resiliência |
|---|--|
| Aumento de temperatura | <ul style="list-style-type: none"> • Especificação de mecanismos de resfriamento mais eficazes para subestações e transformadores; • Especificação de Tecnologias de Comunicação e Informação certificadas, com componentes resilientes à temperatura e umidade. |
| Precipitação e inundação | <ul style="list-style-type: none"> • Construção de um sistema de transmissão de alta capacidade resiliente; • Medidas de proteção projetadas contra inundações de equipamentos em subestações montadas no solo; • Proteção de equipamentos contra precipitações, condições instáveis do solo, inundações e mudanças na umidade. |
| Altas velocidades de ventos | <ul style="list-style-type: none"> • Reforço das estruturas de transmissão e distribuição existentes e construção de sistemas de distribuição subterrâneos especialmente em áreas de floresta; • Exigência de padrões mais altos em projetos para linhas de distribuição; • Construção de pequenas extensões de linhas de distribuição. |
| Eventos extremos (inundações, seca, tufões) | <ul style="list-style-type: none"> • Mudança de rota de linhas aéreas ao longo das estradas, poda das árvores, uso de condutores cobertos e/ou isolados; • Evitar a construção de circuitos em paralelo utilizando a mesma rota; • Aumento de geração de energia descentralizada; • Permissão de desvios em casos de interrupção; • Proteção contra raios na rede de distribuição; • Redundância em projetos de informação e comunicação em sistemas de tecnologia; • Uso de "transformadores inteligentes" e "redes inteligentes". |

Os efeitos das mudanças climáticas também afetam o comportamento da demanda de eletricidade, principalmente aquela que é utilizada para os sistemas de controle térmico. O aumento na demanda por resfriamento aumenta a demanda máxima do sistema, exigindo capacidades de geração adicionais.

Com relação à vulnerabilidade do setor elétrico incorporando o lado da demanda da sociedade, a modelagem do comportamento térmico urbano é particularmente importante para a avaliação da demanda de energia elétrica para resfriamento (ar condicionado) para curto e longo prazo.

A distribuição geográfica de serviços essenciais (como hospitais e escolas), a organização da sociedade no espaço geográfico, bem como as relações e as dependências espaciais entre os parâmetros que caracterizam sua vulnerabilidade são essenciais para a avaliação da vulnerabilidade da sociedade. Cada um desses componentes também é dependente de energia elétrica em algum grau. O nível de insatisfação da sociedade à falta de cada um desses serviços essenciais pode ser interpretado como fragilidade da própria sociedade à falta de energia.

4 REGIME HIDROLÓGICO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

4.1 Projeções de uso consuntivo da água

A estimativa e a projeção dos usos da água, especialmente os consuntivos, é de fundamental importância no planejamento e na gestão dos recursos hídricos, haja visto que subsidiam, dentre outros, as análises de riscos com vistas à segurança hídrica e à garantia dos usos múltiplos da água. Entretanto, no Brasil, a estimativa destes usos é ainda bastante imprecisa, face, principalmente, à falta de dados históricos consistentes. Neste sentido, merece destaque a primeira publicação das “Contas Econômicas Ambientais da Água” (CEAA, sigla do inglês), publicado pela Agência Nacional de Águas em conjunto com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2018, com base no “*International Recommendations Water Statistics*”, elaborado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2012. Os procedimentos de contabilização combinados de recursos hídricos e contas macroeconômicas permitem o acompanhamento de índices de produtividade hídrica, bem como permitem a projeção das demandas hídricas correlacionadas às projeções econômicas.

De maneira geral, as estimativas de uso consuntivo da água são baseadas em métodos indiretos e as projeções desses usos consideram cenários econômicos e ainda não incorporam cenários de mudanças climáticas (Tabela 3). Como na maioria das bacias, o consumo mais importante ocorre na irrigação, sendo recomendado que os cenários de projeção considerem a componente mudança climática nas estimativas visto que o impacto é significativo. O efeito no consumo por irrigação deve-se a mudanças na

evapotranspiração, que pode ser calculada por meio das variáveis geradas pelos modelos climáticos. Nos demais usos consuntivos as relações não são diretas, mas é possível incluir alterações devido ao clima, sempre que se tratar de usos significativos.

Tabela 3 - Variáveis consideradas na estimativa e projeção das demandas de uso consuntivo.

| Uso | Estimativa da Demanda | | | Projeção da Demanda | |
|----------------------|--|---|--|--|---|
| | Vazão de Retirada | Vazão de Retorno | Vazão de Consumo | | |
| Irrigação | Produtos da área irrigada (ha) pelos coeficientes técnicos de retirada, retorno e consumo (L/s/ha ⁻¹). Os coeficientes são baseados na necessidade de água das culturas, características dos sistemas de irrigação e informações climáticas. | | | Aplicação de taxas de incremento das áreas irrigadas. | |
| Abastecimento Animal | Produtos do efetivo do rebanho (cabeças) pelos coeficientes de retirada (l/cabeça/dia), consumo (%) e retorno (%), de acordo com o tipo de rebanho. | | | Aplicação de taxas médias de crescimento dos rebanhos. | |
| Abastecimento Humano | Urbano | Produto da população urbana (habitantes) pelo coeficiente de consumo per capita urbano (L/habitante/dia). | Aplicação de um coeficiente de 0,8 na vazão de retirada. | Resultado da subtração da vazão de retirada e da vazão de retorno. | Considera as projeções da população urbana. |
| | Rural | Produto da população rural (habitantes) pelo coeficiente de consumo per capita rural (L/habitante/dia). | Aplicação de um coeficiente de 0,8 na vazão de retirada. | Resultado da subtração da vazão de retirada e da vazão de retorno. | Considera as projeções da população rural. |
| Indústria | Produto do número de empregados pelo coeficiente de retirada (L/empregado/dia), que varia por tipologia industrial. | Resultado da subtração da vazão de retirada e da vazão de consumo. | Produto do número de empregados pelo coeficiente de consumo (L/empregado/dia), que varia por tipologia industrial. | Aplicação de taxas de incremento nas vazões. | |

A projeção de demanda hídrica de longo prazo (que afeta o planejamento do setor elétrico) deve estar associada às projeções econômicas e a cenários tecnológicos de

eficiência de uso, bem como devem considerar mudanças nas necessidades específicas dos usos face às mudanças climáticas. A partir disso, são estabelecidas projeções para a intensidade hídrica econômica, que pode ser inferida com base nos seus históricos (se existirem) combinados com cenários. Dessa forma, com base no crescimento econômico, pode-se multiplicar a variável econômica de fluxo, geralmente o Produto Interno Bruto (PIB), pela intensidade hídrica projetada, obtendo-se a demanda hídrica para o referido período e setor. E após calcular a demanda total para o território, devem-se empregar técnicas de desagregação com base nas vocações territoriais. Embora esta demanda seja um tema pouco explorado, sua importância é crescente, notadamente no setor elétrico brasileiro.

No caso dos usos consuntivos, a Agência Nacional das Águas (ANA) tem feito estimativas para todas as bacias brasileiras, aplicando aprimoramentos metodológicos a cada nova revisão das demandas. Entretanto, ainda não incorporam cenários de mudanças climáticas. Dos estudos analisados no Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água), apenas o “Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Grande” considerou um cenário de mudanças climáticas nas estimativas.

4.2 Modelos para simulação do uso do solo e vazão afluente

As vazões das bacias hidrográficas são afetadas pelas mudanças climáticas de forma direta e indireta. Diretamente, por interferir no balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera e indiretamente por alterar as retiradas de água para usos consuntivos e o uso e cobertura do solo.

Com relação ao uso e cobertura do solo, com intuito de conhecer a interação entre homens e o sistema terrestre, têm sido desenvolvidos os modelos de mudanças de uso e cobertura da terra/solo denominados modelos *Land Use and Cover Change* (LUCC). A Figura 7 apresenta um resumo das abordagens consideradas nos modelos LUCC (*Top-down* e *Bottom-up*). Destaca-se que nem todos os modelos matemáticos incorporam cenários de mudanças climáticas, mas permitem essa possibilidade. O Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água) apresenta modelos de mudança de uso e cobertura do solo aplicados às questões do país.

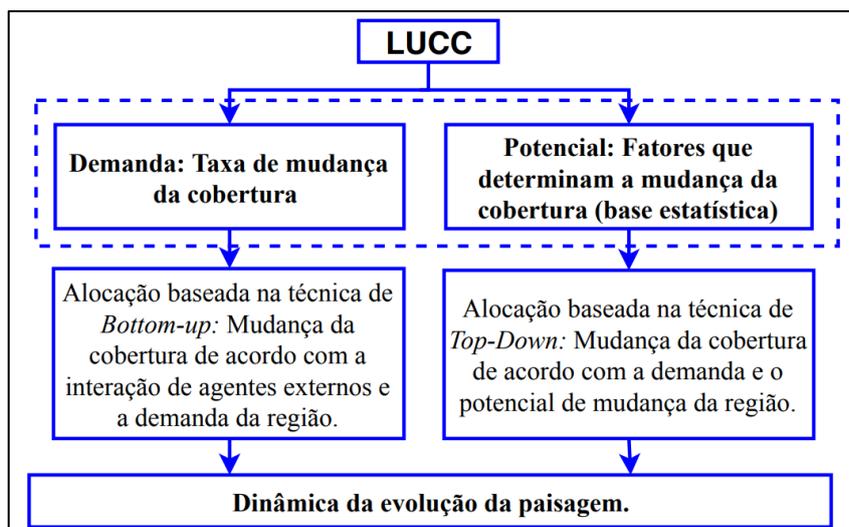


Figura 7 - Representação esquemática das abordagens consideradas nos modelos LUCC.

A integração dos diversos efeitos, diretos e indiretos, das mudanças climáticas sobre as vazões pode ser feita por meio de modelos hidrológicos do tipo transformação chuva-vazão. O tipo ideal de modelo para essa finalidade é o modelo semi-conceitual e distribuído, com forte embasamento físico e que permite considerar mudanças no uso e cobertura do solo e retiradas pontuais de água para usos consuntivos. Exemplos desse tipo de modelo são: MGB-IPH, SWAT, VIC, dentre outros.

4.3 Proposição de aperfeiçoamentos metodológicos para projeção de vazão

Com base nos levantamentos obtidos no Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água), fica evidente que nos últimos anos ocorreram avanços importantes nas diferentes áreas que envolvem a estimativa de vazões de bacias hidrográficas em condições de mudanças climáticas.

Na Figura 8 é apresentado um esquema de como podem ser analisadas as relações entre mudanças climáticas, a cobertura e uso do solo, bem como os usos consuntivos da água, para influenciar nas vazões das bacias hidrográficas. Esses componentes estão intrinsecamente ligados.

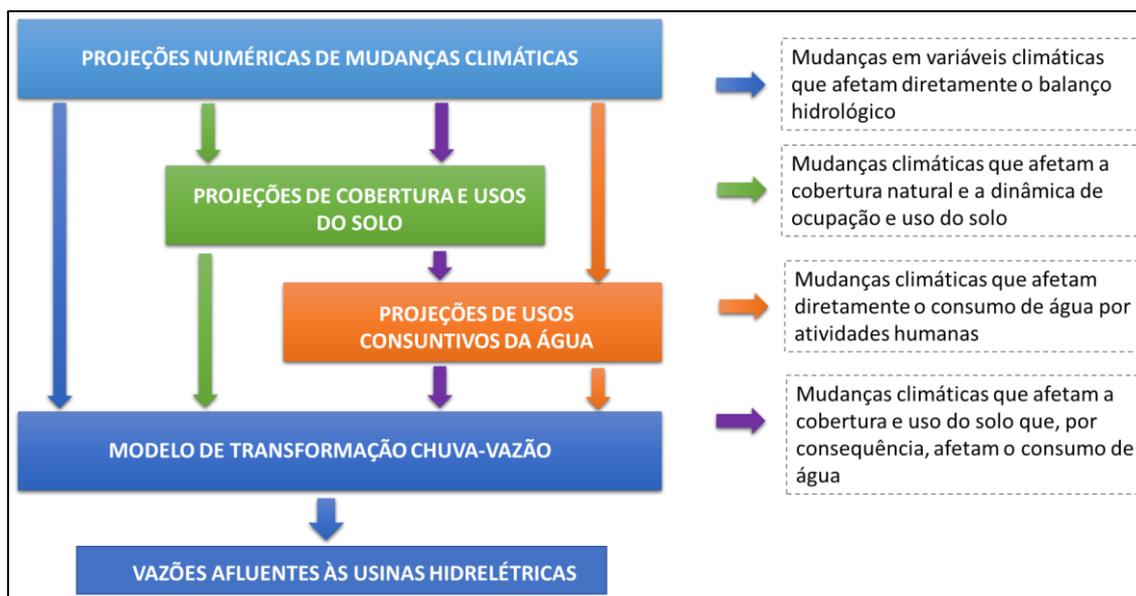


Figura 8 - Fluxo de processos para projeção de impactos de mudanças climáticas nas vazões de bacias hidrográficas.

Todas essas possibilidades, representadas na Figura 8 podem ocorrer ao longo do período de projeção. Em alguns casos os efeitos de algum componente podem não ser significativos, permitindo que seja desconsiderado, devendo ser analisado para cada caso específico. Uma análise completa dos efeitos das mudanças climáticas deveria considerar as seguintes possibilidades:

- i. Influência direta das variáveis climáticas sobre o balanço hídrico natural da bacia, simulada diretamente por um modelo hidrológico chuva-vazão (seta azul na Figura 8);
- ii. Efeitos das mudanças climáticas sobre a cobertura e uso do solo, que afetam o balanço hídrico natural das bacias, tais como desmatamento, reflorestamento, mudanças de culturas, aumento de áreas irrigadas, crescimento de cidades, dentre outras alterações na superfície. As projeções dessas modificações podem ser incorporadas aos dados de entrada do modelo chuva-vazão, para que seus efeitos sejam quantificados (seta verde na Figura 8);
- iii. Efeitos das mudanças climáticas sobre demandas de água que são diretamente afetadas pelo clima, como no caso da agricultura irrigada, que mesmo sem

aumento de área ocupada terá um incremento na vazão consumida, devido ao aumento de temperatura e umidade do ar. Também podem ocorrer aumentos no consumo humano, devido aos mesmos motivos. As essas retiradas podem ser simuladas em modelos chuva-vazão, para análise dos impactos (seta laranja na Figura 8);

- iv. Mudanças climáticas podem alterar o padrão de ocupação do solo, criando condições favoráveis a usos que possuem taxas diferentes de consumo de água. Aumentos de temperatura podem, por exemplo, favorecer a expansão das áreas de cana-de-açúcar irrigada, alterando os usos consuntivos. A cobertura vegetal natural, como florestas tropicais, pode ser afetada pelas mudanças do clima, sendo substituídas por pastagens. Neste caso altera-se o balanço hídrico natural e aumentam-se os usos consuntivos devido à pecuária. Esses são efeitos combinados, que igualmente podem ser incorporados a um modelo hidrológico para verificação dos efeitos (seta roxa na Figura 8).

Todas essas possibilidades, representadas na Figura 8 podem ocorrer ao longo do período de projeção. Em alguns casos os efeitos de algum componente podem não ser significativos, permitindo que seja desconsiderado. Mudanças no uso do solo e cobertura vegetal não serão significativas para a região Sudeste nas próximas décadas, mas podem ser muito acentuadas em algumas bacias da Amazônia. Para cada caso devem-se avaliar quais componentes são importantes para serem considerados ou não.

Além do processo geral, ainda podem ser melhorados pontos específicos na modelagem de cada um dos componentes da Figura 8. Algumas sugestões:

- i. **Projeções climáticas:** utilizar sempre um conjunto de projeções, com o maior número possível de modelos climáticos e cenários de emissões de gases de efeito estufa;
- ii. **Modelos hidrológicos:** Aprimorar modelos de transformação chuva-vazão com forte embasamento físico, do tipo distribuído, que permita considerar mudanças no uso do solo e retiradas pontuais de água por usos consuntivos.

Como exemplo de modelos desse tipo pode-se citar: MGB-IPH, SWAT, VIC, SWIM, dentre outros;

- iii. **Projeções de usos consuntivos:** Na maioria das bacias o consumo mais importante se dá pela irrigação. Por esse motivo, recomenda-se que os cenários de projeção considerem a componente mudança climática nas estimativas. O efeito no consumo por irrigação se deve a mudanças na evapotranspiração, que pode ser calculada por meio das variáveis geradas pelos modelos climáticos. Nos demais usos consuntivos as relações não são diretas, mas é possível incluir alterações devido ao clima, sempre que se tratar de usos significativos;
- iv. **Projeções de usos do solo:** Devem ser aprimorados os modelos de projeção de uso do solo, para que sejam gerados cenários de referência a serem incorporados em estudos de mudanças climáticas. Preferencialmente, os cenários devem considerar alterações no clima em suas projeções. As mudanças de uso e ocupação podem então ser assimiladas por modelo hidrológicos de transformação chuva-vazão.

No item seguinte é apresentado um estudo de caso para a bacia do rio São Francisco, que considera alguns aspectos aqui mencionados.

4.4 Estudo de caso: Impacto das mudanças climáticas na Bacia do rio São Francisco

Foi desenvolvido no Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água) um estudo preliminar das afluências hidroenergéticas nas usinas do rio São Francisco, por ser esta uma das mais importantes bacias produtoras de hidroeletricidade no país, com objetivo de ilustrar o efeito das mudanças climáticas. Ressalta-se que esse estudo de caso se trata de um estudo básico, não possuindo o objetivo de ser exaustivo e nem conclusivo, mas com a finalidade de apenas demonstrar a viabilidade da utilização da metodologia. Utilizou-se o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), visando demonstrar como os aperfeiçoamentos metodológicos propostos podem ser

aplicados para estimativa de vazões afluentes a usinas hidrelétricas em cenários de mudanças climáticas. A metodologia proposta está esquematizada na Figura 9.

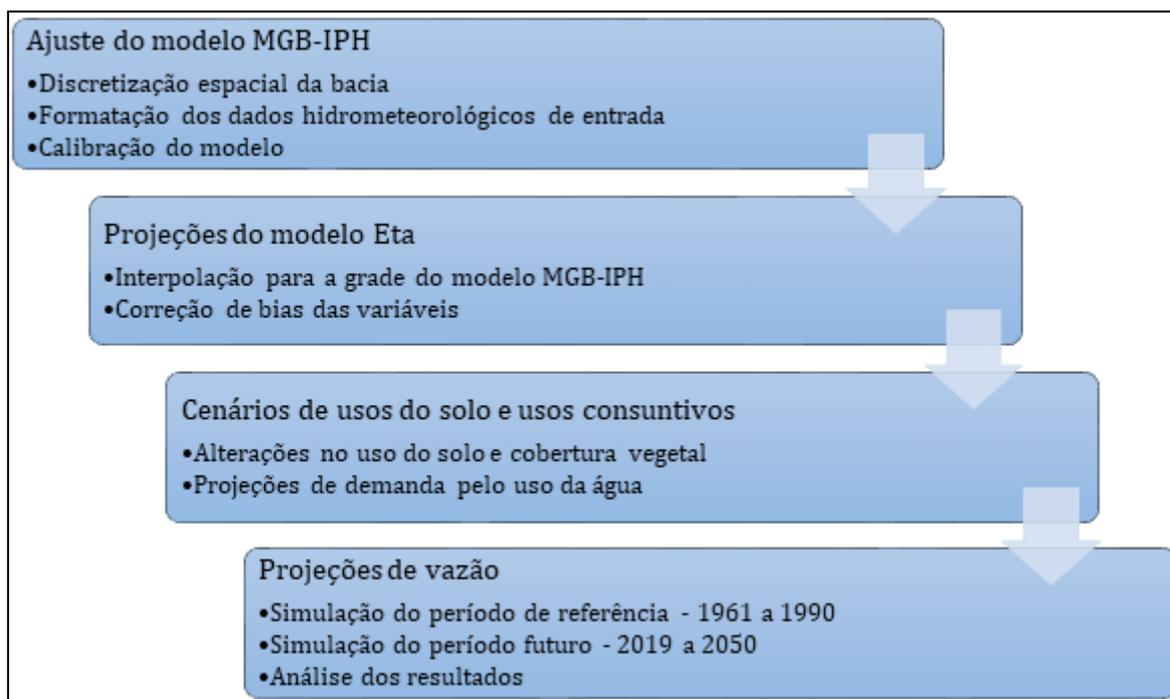


Figura 9 - Metodologia para projeções de vazões para a bacia do rio São Francisco.

A Tabela 4 apresenta um resumo das características das principais usinas da bacia.

Tabela 4 - Dados básicos das principais usinas hidrelétricas da bacia.

| Usina | Rio | Área (km ²) | Vazão Média (m ³ /s) | Potência Instalada (MW) |
|------------------------------|---------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Queimado | Preto | 3.816 | 56 | 105 |
| Retiro Baixo | Paraopeba | 11.071 | 158 | 82 |
| Três Marias | São Francisco | 50.785 | 691 | 396 |
| Sobradinho | São Francisco | 503.964 | 2.666 | 1.050 |
| Itaparica | São Francisco | 596.522 | 2.746 | 1.500 |
| Complexo Paulo Afonso-Moxotó | São Francisco | 609.260 | 2.763 | 4.281 |
| Xingó | São Francisco | 612.193 | 2.763 | 3.162 |

Para o processo de calibração do modelo hidrológico foram utilizados dados observados de diversas variáveis e fontes ao longo do rio São Francisco e seus afluentes. Os dados utilizados são apresentados na Tabela 5. Vale ressaltar, que a

maioria dos postos pluviométricos e climáticos estão concentrados na parte mais alta da bacia, devido a importância do relevo na precipitação.

Tabela 5 - Variáveis utilizadas para o processo de calibração do modelo hidrológico, incluindo sua origem, período e quantidade de postos de medição.

| Variável | Fonte dos dados | Quantidade de postos/estações | Período |
|---|-----------------------------|-------------------------------|-----------|
| Vazão | Postos fluviométricos | 122 | 1960-1990 |
| Precipitação | Postos pluviométricos (ANA) | 228 | 1960-1990 |
| Temperatura, Umidade Relativa; Velocidade do vento; Pressão atmosférica; Radiação ou Insolação; Precipitação. | Estações meteorológicas | 26 | 1961-1990 |

A bacia foi discretizada em um total 2.502 células, sendo 1.567 células com resolução de 0,1 grau (cerca de 10 x 10 km) na parte alta da bacia e 935 células com resolução 0,2 grau (cerca de 20 x 20 km) na parte baixa da bacia. No final, a bacia foi dividida em 27 sub-bacias para ajuste do modelo hidrológico.

Para calibrar o modelo, foi utilizado o período de 1970 a 1979. Já a verificação do ajuste foi realizada no período entre 1961 e 1990, correspondente ao período de referência nas projeções dos modelos climáticos. A calibração foi realizada utilizando-se dados diários de chuva e vazão. Os parâmetros do modelo foram determinados pela metodologia de calibração automática multi-objetivo, com base na técnica de “algoritmos genéticos” e, de maneira geral, observou-se que o ajuste do modelo é muito bom na grande maioria das sub-bacias. As análises dos efeitos das mudanças climáticas foram realizadas para as Usinas Hidrelétricas (UHE) de Três Marias e Sobradinho. Na Figura 10 são apresentadas as vazões naturais afluentes médias, simuladas para as UHEs de Três Marias e Sobradinho, para o período de 1961 a 1990. As vazões simuladas foram geradas alimentando-se o modelo MGB com as projeções do modelo Eta aninhados aos MCGs, MIROC5 e HadGEM2-ES, após a correção de vieses, as quais passaram a se chamar Eta-MIROC e Eta-HadGEM, respectivamente. Ambos os modelos foram capazes de representar a sazonalidade anual da bacia do rio São Francisco.

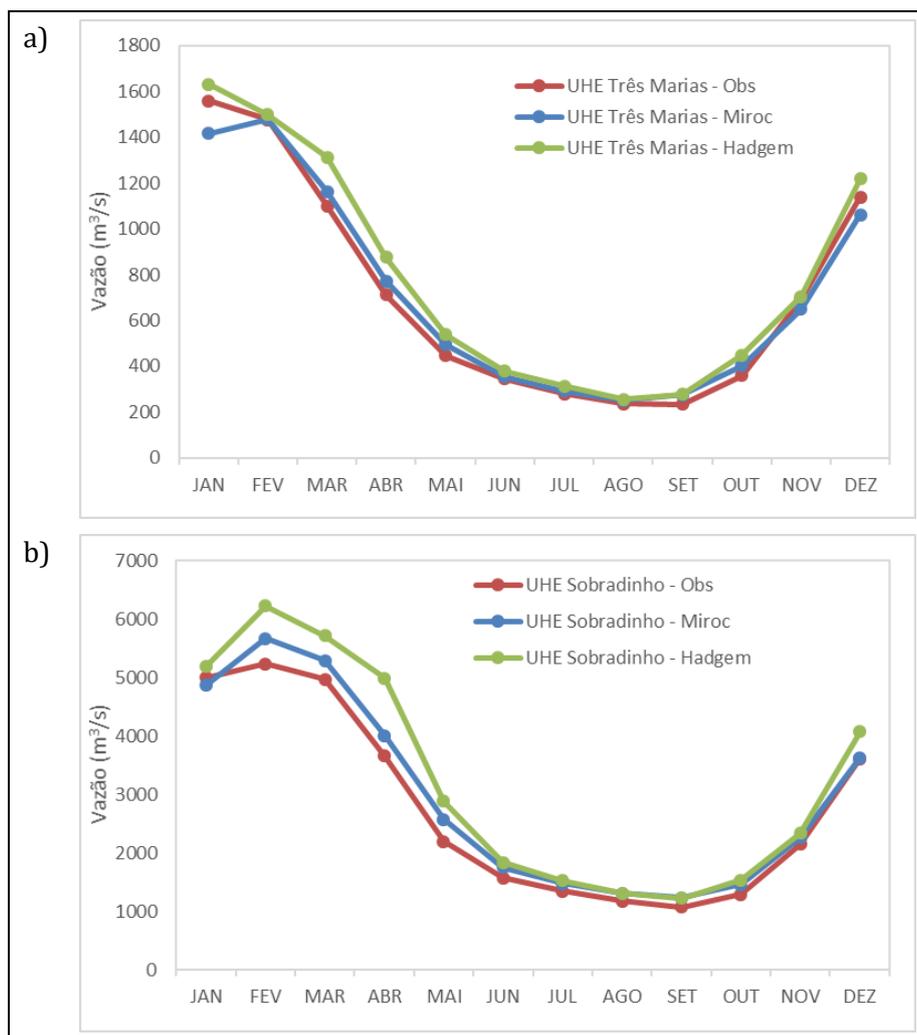


Figura 10 - Simulações de vazões médias para as UHEs Três Marias (a) e Sobradinho (b), no período de referência (1961 a 1990), com base nas simulações do modelo Eta-MIROC e Eta-HadGEM.

Devido às diferenças observadas no comportamento médio das simulações, a análise das projeções para os períodos futuros é realizada separadamente para cada um dos modelos, comparando-se as vazões futuras de cada modelo com as suas respectivas vazões simuladas para o período de referência (1961 a 1990). Dessa forma, não se comparam as projeções com as vazões observadas e busca-se avaliar a tendência projetada pelo modelo no futuro em comparação com as vazões geradas pelo modelo no passado.

O estudo desenvolvido assumiu que as vazões em cenários climáticos futuros foram geradas alimentando-se o modelo MGB-IPH com as projeções Eta-MIROC e Eta-HadGEM, considerando os cenários RCP4.5 (intermediário) e RCP8.5 (pessimista), resultando em 4 projeções: Eta-HadGEM 4.5, Eta-HadGEM 8.5, Eta-MIROC 4.5 e Eta-MIROC 8.5. Neste caso, as características dos MCGs foram transferidas para as projeções dos MCRs, uma vez que eles servem de condições iniciais e de contorno para os MCRs. É importante enfatizar também que projeções realizadas com o mesmo cenário de concentração, a partir de diferentes modelos, podem produzir resultados distintos uma vez que os modelos apresentam características estruturais diferentes.

Reforça-se que em estudos de impactos é altamente recomendado considerar um conjunto de modelos (*ensemble*) e cenários climáticos, a fim de se obter avaliações mais representativas e uma indicação sobre o nível das incertezas envolvidas, uma vez que os modelos climáticos globais possuem estruturas diferentes, sendo que alguns são mais ou menos sensíveis às condições de emissão de CO₂.

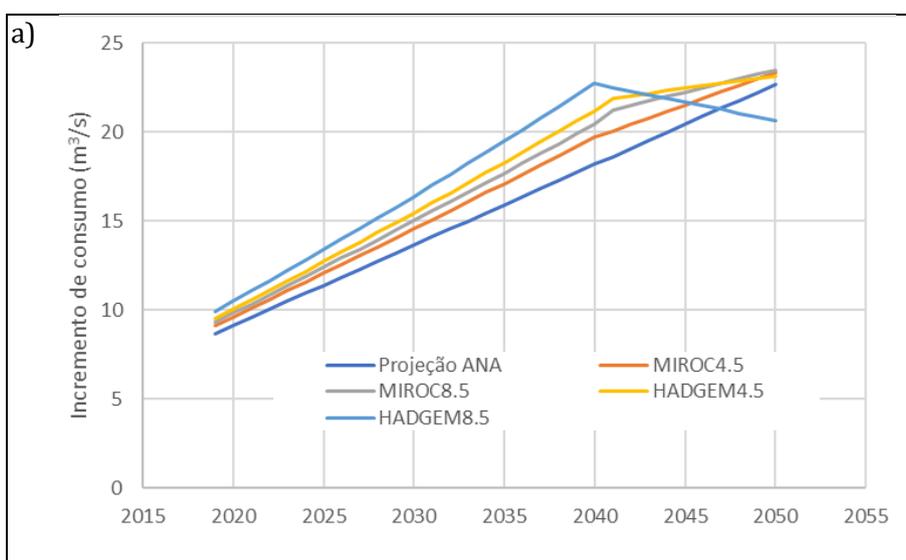
Para construção dos cenários de projeção de usos consuntivos na bacia do rio São Francisco foram consideradas como bases principais, as estimativas de demandas de água realizadas pelo ONS em 2005 e as mais recentes estimativas de consumo de água disponibilizadas pela ANA.

As estimativas de retiradas totais de água na bacia contribuinte a UHE Xingó, praticamente toda bacia do São Francisco, somavam 156,66 m³/s, dos quais 100,1 m³/s representavam as vazões de consumo. Esses valores são considerados como a referência para as simulações apresentadas. Nessas estimativas foram projetadas vazões de retiradas para o ano de 2030. De acordo com essas projeções a retirada total interna da bacia em Xingó, no ano de 2030, será de 366,0 m³/s, sendo consumidos cerca de 255,1 m³/s. As maiores retiradas de água ocorrem nas regiões do médio e sub-médio São Francisco. As projeções realizadas pela ANA não consideraram impactos de mudanças climáticas, baseando-se apenas em cenários de crescimento econômico, conforme metodologias usualmente empregadas em trabalhos anteriores. Para incluir a influência de mudanças no clima utilizou-se como

referência a metodologia adotada no Plano de Bacia do Rio Grande, realizado em 2017, que incluiu um cenário chamado de contingência, no qual os impactos das mudanças climáticas foram somados a um dos cenários econômicos de projeção.

A demanda hídrica consuntiva foi adotada com base nas projeções da ANA, adicionando um acréscimo devido às projeções de aumento da temperatura e redução da umidade relativa na região da bacia do rio São Francisco, obtido com base em vários estudos, embora nenhum tenha como base modelos econômicos mais elaborados. Considerou-se que a evolução das demandas segue um crescimento linear. Vale ressaltar que ainda são escassos os estudos que abordam esse tema de forma abrangente, mesmo na irrigação. O desenvolvimento de pesquisas que aprofundem o conhecimento sobre o tema poderá contribuir de forma significativa para estimativas mais completas e confiáveis nas projeções de vazões nas bacias hidrográficas.

Na Figura 11 são apresentadas as projeções para as UHE de Três Marias e Sobradinho, destacando-se a projeção da ANA, que não considera as mudanças climáticas. As demais projeções consideram alterações na temperatura e umidade relativa de cada um dos modelos e cenários climáticos utilizados.



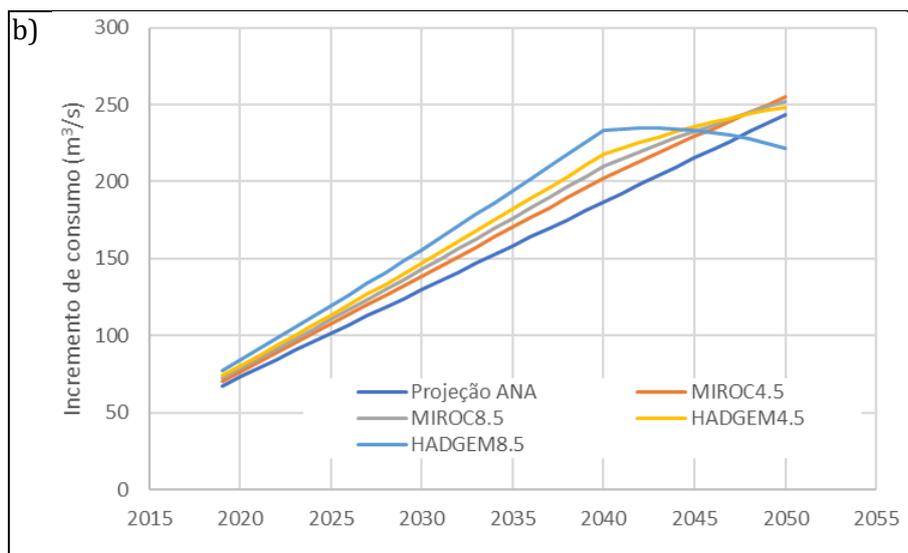


Figura 11 - Projeções de incrementos de demandas de usos consuntivos para a UHE Três Marias (a) e Sobradinho (b), considerando mudanças climáticas.

Com base nos resultados anteriores, foram realizadas simulações para projeção de vazões afluentes, considerando-se os impactos de mudanças de variáveis climáticas, uso do solo e usos consuntivos de forma conjunta. Esses cenários são integrados através de um modelo hidrológico, de forma que não se trata de um simples somatório de efeitos calculados separados, mas, sim, de uma simulação onde os efeitos estão interconectados e relacionados por processos altamente não-lineares.

Para esse estudo de caso, com relação às alterações na cobertura do solo, as referências encontradas não indicam mudanças significativas devido a mudanças climáticas. Além disso, uma simulação realizada através do modelo MGB-IPH, indicou que, mesmo um desmatamento de grandes proporções no remanescente florestal da bacia, pouco afetará as vazões afluentes às principais usinas. Isso se deve ao fato de apenas em torno de 9,7% da área total da bacia ser coberta por área de floresta. Dessa forma, a mudança na cobertura do solo não foi considerada nas simulações do rio São Francisco.

Na Figura 12 são apresentados os resultados para as UHEs Três Marias e Sobradinho, para as menores vazões (Q95), média e Q5. Nota-se que o resultado geral é de projeção de redução das vazões, com maior impacto sobre as vazões do período de

estiagem, representado pela vazão Q95. Considerando somente mudanças de variáveis climáticas que afetam a transformação chuva-vazão, as reduções na Q95 não passaram de 50%, conforme apresentado no Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água). Com o efeito dos usos consuntivos as reduções passam de 60% nos casos mais extremos, ampliando as possibilidades de conflitos pelo uso da água na bacia.

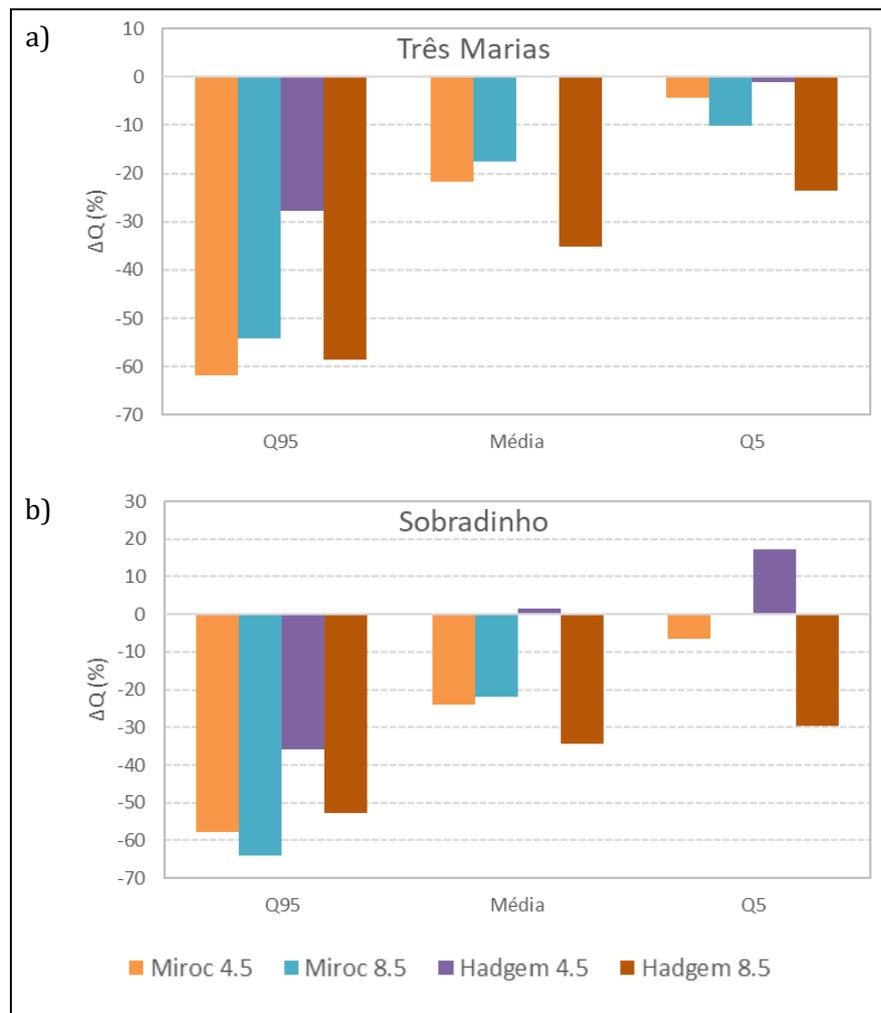


Figura 12 - Impacto nas vazões da UHE Três Marias (a) e Sobradinho (b), sob efeito combinado de mudanças climáticas e projeções de usos consuntivos, entre o período de referência (1961 a 1990) e o período futuro (2019 a 2050).

Em relação à vazão média, no caso do modelo Eta-HadGEM 8.5, para ambas as usinas, observam-se reduções passando de 30%. Para o modelo Eta-HadGEM 4.5, as vazões

não se alteram para a UHE de Três Marias e, há um leve aumento de vazão para a UHE de Sobradinho (cerca de 1%). Com relação ao Eta-MIROC 4.5 e 8.5, a vazão média apresenta redução em torno de 20% para ambas as usinas.

Para as maiores vazões (Q5), na UHE de Três Marias os modelos mostram projeções de redução, sendo que o Eta-HadGEM 4.5 apresenta a menor diminuição (em torno de 1%) e, o EtaHadGEM 8.5 apresenta maior diminuição (em torno de 22%). Não há uma tendência clara na UHE de Sobradinho, com alguns resultados sugerindo a possibilidade de aumentos e outros com reduções dessas vazões. Dessa forma, nota-se que os modelos indicam que no período futuro, entre 2019 e 2050, haverá uma tendência de ampliação dos extremos, com possibilidade de cheias maiores, bem como, provavelmente, estiagens mais intensas.

Os resultados mostraram que é fundamental considerar a variação dos usos consuntivos na projeção de vazões afluentes às usinas hidrelétricas, uma vez que as retiradas podem ser significativas comparadas às vazões naturais das bacias hidrográficas. Conforme já comentado, esse é um estudo de caso básico, com o intuito de apenas demonstrar a viabilidade da utilização da metodologia, portanto, há a necessidade de uma análise mais detalhada caso se queira utilizar os resultados obtidos.

5 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O PLANEJAMENTO DO SETOR

Ao focar o planejamento energético faz-se necessário, primeiramente, analisar os modelos energéticos, em diferentes níveis geográficos, tendo em vista o caráter global do efeito climático e os acordos e metas estabelecidos em âmbito multilateral, bem como os reflexos tecnológicos e geopolíticos desses acordos e os reflexos nas práticas da sociedade. Neste sentido, propõe-se a classificação de modelos de planejamento, partindo-se dos energéticos de caráter mais abrangentes e chegando-se até os específicos, setoriais ou subsetoriais, conforme sintetizado na Figura 13. Essa classificação não é normalizada e foi desenvolvida focando as necessidades do Produto 5 (Análise da Mudança Climática junto ao Planejamento de Expansão de Sistemas Elétricos).

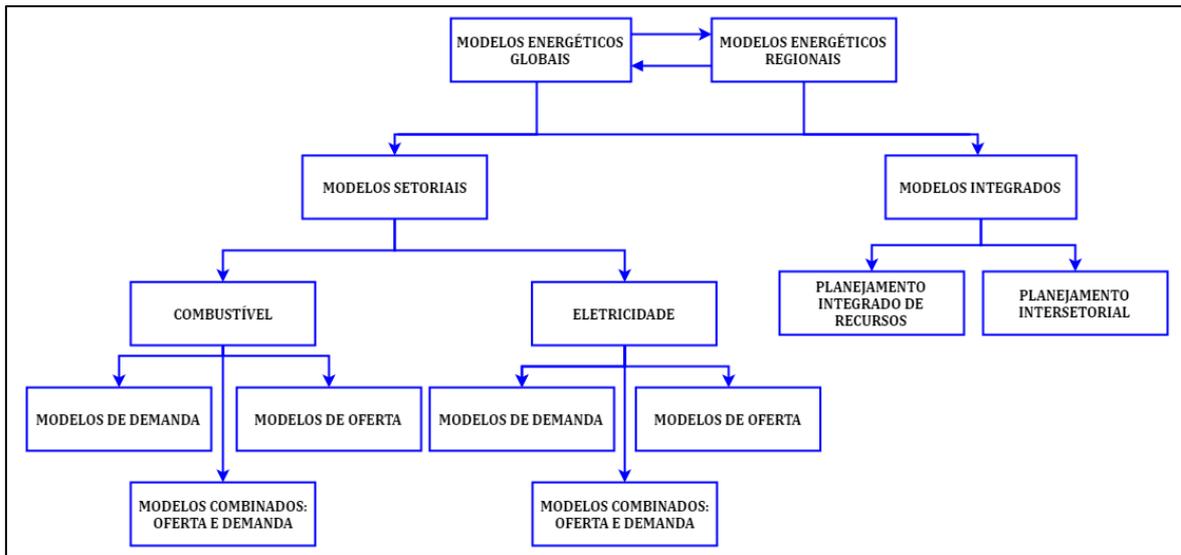


Figura 13 - Proposta de classificação de modelos de planejamento.

É proposta também uma escala indicativa de horizontes de estudos, que, combinada com a estrutura de modelos proposta na Figura 13, permitem desenvolver uma síntese de como organizar as análises e proposições dos estudos (Tabela 6). Assim, tem-se os seguintes horizontes referenciais:

- Prospectivo: 50 a 100 anos;
- Políticas Públicas: 30 a 50 anos;
- Planejamento de Longo Prazo: 15 a 30 anos;
- Planejamento de Médio Prazo: 5 a 15 anos;
- Planejamento de Curto Prazo: despacho a 5 anos.

Tabela 6 - Estudos voltados ao planejamento no setor elétrico que utilizam diferentes horizontes ao redor do mundo.

| Produto | Responsáveis | Principais objetivos |
|--|---|---|
| <i>Global Energy Assessment (GEA).</i> | <i>International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) com apoio de diversas organizações como o World Bank.</i> | Fornecer à análise prospectiva energética , muito importante para a sinalização de compromissos multilaterais, como a avaliação de novas tecnologias, práticas e costumes; encontrar trajetórias para atender as necessidades energéticas globais a custos razoáveis, com segurança e equidade, respeitando as limitações ambientais locais e globais (mudanças climáticas). |

| Produto | Responsáveis | Principais objetivos |
|--|--|--|
| <i>Energy Roadmap 2050</i> | União Europeia | Formulação de políticas públicas energéticas, estabelecendo metas que devem ser seguidas pelos planejadores; definir metas em energia renovável, captura de carbono e eficiência energética, preponderantemente. |
| <i>Oil 2017-Analysis and Forecasts to 2022</i> | Agência Internacional de Energia (AIE) | Responsável pelo planejamento de médio prazo global; apresentando uma avaliação global de médio prazo, com projeções de produção, consumo, estoque e preços, a partir da avaliação de tendências, consequentes de condições econômicas, institucionais, ambientais etc. |

Os três produtos, citados como exemplos na Tabela 6, ilustram bem os resultados de estudos globais com diferentes horizontes. Em verdade, eles não utilizam um modelo matemático único, sendo um conjunto de técnicas de cenários, avaliações tendenciais, fixação de distintas restrições, dentre outras ferramentas que incorporam visões distintas de evolução. Concluindo, os modelos energéticos globais de longuíssimo e muito longo prazos caracterizam-se mais como metodologias e processos de análise do que como um modelo matemático propriamente dito.

Entende-se por modelos regionais aqueles que focam uma região específica do globo. Os modelos energéticos regionais de muito longo prazo são capazes de relacionar com os modelos de longuíssimo prazo (prospectivo), em que uma visão mais global é necessária. Os modelos de longo prazo, como regra, representados por modelos regionais setoriais ou intersetoriais, já prescindem da conexão global (planejamento de longo prazo). Destaca-se entre esses modelos de longo prazo aqueles voltados à matriz energética, que projetam para prazos alongados a demanda e a oferta de energia, buscando o equilíbrio entre eles mediante restrições e objetivos dos mais distintos. As matrizes são instrumentos fundamentais para analisar e fundamentar os efeitos de políticas energéticas, tecnológicas, ambientais e econômicas, apresentando como resultado as metas tecnológicas, ambientais e, porventura, geográficas que poderão (ou deverão) ser colocadas como restrições ou objetivos nos planejamentos de longo prazo.

A sociedade, por meio de suas atividades socioeconômicas, mobiliza os recursos energéticos de diversas formas e intensidades, tornando-se importante entender tais

aspectos, o que pode ser feito, por exemplo, por meio de estudos ligados à demanda e oferta de energia que utilizem instrumentos analíticos e abordem os sistemas produtivos e energéticos sob uma ótica detalhada, integrada e transparente. Nesse sentido, partindo do princípio que a demanda e a oferta de energia de um dado país (ou região) são conhecidas, por exemplo, o governo pode atuar por meio de políticas públicas, no sentido de atender questões bastante discutidas recentemente, como é o caso das emissões de GEE. A utilização de *softwares* (ou modelos) de simulação possibilita a análise de tais variáveis.

Os modelos de avaliação de impacto das mudanças climáticas no setor energético têm, como seria natural, um enfoque abrangente, não dando destaque ao setor elétrico. Entretanto, há uma necessidade premente de se ter modelos que foquem o setor elétrico, sem, entretanto, abrir mão da visão integrada e globalizada, que é implícita às mudanças climáticas. Voltando à Figura 13, os modelos setoriais, mesmo aqueles combinados “oferta x demanda”, não apresentam habilidades suficientes para absorver as indicações dos modelos regionais/globais, que estabelecem metas e tendências, muitas vezes de caráter geográfico, seja tecnológico, ambiental ou social. Por isso, é natural a evolução dos modelos setoriais para modelos integrados, sejam aqueles que simplesmente analisam dois ou mais setores energéticos (como eletricidade e gás), sejam os que incorporam outros aspectos, distintos dos técnicos, como se caracterizam os modelos de Planejamento Integrado de Recursos (PIR).

6 PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

6.1 Planejamento energético

O Plano Nacional de Energia (PNE) é o principal veículo de comunicação e debate com a sociedade para a estratégia energética nacional de longo prazo, sendo um estudo de planejamento integrado dos recursos energéticos realizado no âmbito do governo brasileiro, conduzido pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em estreita vinculação com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). O PNE tem uma perspectiva de longo prazo, abrangendo um horizonte da ordem de 25 a 30 anos e fornece os

subsídios para a formulação de uma estratégia de expansão da oferta de energia econômica e sustentável com vistas ao atendimento da evolução da demanda, incorporando as perspectivas de evolução tecnológica nos diversos setores energéticos. Abrange não somente a questão da energia elétrica, como também as fontes energéticas, notadamente petróleo e seus derivados, gás natural e biocombustíveis, contemplando ainda uma análise socioambiental da infraestrutura de oferta de energia. O desenvolvimento dos trabalhos é conduzido incorporando a necessária participação de importantes elementos da sociedade, com divulgação pública para esse tipo de estudo e ampla cobertura dos principais meios de comunicação.

O PNE procura analisar as estratégias de desenvolvimento do sistema energético nacional para diferentes cenários da demanda e da conservação de energia, otimizando a composição futura do parque gerador, compreendendo todas as principais fontes primárias de geração disponíveis em cada região do país. Os condicionantes para esse estudo são a evolução do mercado, a disponibilidade de fontes energéticas primárias para geração, as tendências de evolução tecnológica e os impactos ambientais dos projetos.

As trajetórias de crescimento econômico propostas pelo PNE devem ser adaptadas aos condicionantes conjunturais de curto prazo. Embora o cenário de referência do PNE 2030 se constitua como o ambiente em que se desenvolve o atual estudo para a época vigente, a trajetória de expansão da economia sofre ajustes em função de elementos conjunturais, como exemplo, a ocorrência antecipada da crise financeira norte-americana em relação ao previsto no PNE 2030.

A partir dos resultados obtidos no PNE estabelece-se também um programa de desenvolvimento tecnológico e industrial para o país na área energética e uma priorização dos novos estudos de inventário energéticos.

O planejamento dos recursos energéticos tem como objetivo possuir uma visão com participação integrada nas tomadas de decisão em conjunto das fontes e os usos da

energia primária e secundária. No Brasil, não existe um processo de integração efetiva entre diferentes setores (inclusive os não energéticos).

O PNE formula projeções de longo prazo para a demanda energética e estabelece os parâmetros mais gerais da matriz energética necessária para o atendimento da mesma de uma forma eficiente e sustentável em termos econômicos e ambientais.

A maior participação da sociedade nas discussões socioambientais provoca alterações na dinâmica do processo de licenciamento ambiental e a necessidade cada vez maior de um planejamento rigoroso e articulado entre diferentes órgãos governamentais para a utilização dos recursos naturais. Nessas condições, a decisão de implantação de novos empreendimentos percorre um longo e custoso processo, envolvendo estudos de viabilidade, aprimoramentos tecnológicos e mitigação de conflitos socioambientais. Análises socioambientais são levadas em consideração em todas as etapas do processo, desde estudos de longo a de curto prazo, objetivando a minimização dos impactos da produção, geração e transmissão de energia. Os estudos socioambientais possibilitam, ao se definir os projetos que compõem o período de expansão, evitar áreas sensíveis, como, por exemplo, reservas ambientais e terras indígenas. Projetos que estão em áreas sensíveis podem ser desclassificados devido aos riscos operacionais. O envolvimento socioambiental não está somente presente na análise de fauna, flora locais e nacionais, os estudos também vislumbram acordos internacionais que o Brasil está inserido, como o Acordo de Paris na COP-21 de 2015.

O PNE e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) são as referências para o setor de energia elétrica nacional. Deles são obtidas as trajetórias desejáveis para a expansão das ofertas, bem como as tendências de evolução do crescimento da demanda, incluindo aspectos ambientais, econômicos, sociais e tecnológicos. Entretanto, o planejamento setorial desenvolve modelos específicos para a demanda e a oferta, que, caso se distanciem significativamente das trajetórias previstas no PNE e no PDE, deve haver uma realimentação do processo, buscando uma maior aproximação.

É na etapa do PDE que são utilizados modelos de decisão de investimentos, que, por sua vez, definem a alocação temporal e espacial dos projetos de geração e transmissão que garantam o mínimo custo total. Para tal, é necessário quantificar previamente os recursos primários disponíveis para geração de energia elétrica, bem como os custos de investimentos, operação, manutenção e combustíveis. Além disso, é preciso conhecer a configuração do sistema existente.

6.2 Planejamento da geração e da transmissão

Os estudos de planejamento da expansão da geração do sistema elétrico nacional envolvem duas atividades distintas:

- A prospecção tecnológica, bem como estudos de estratégias de expansão das fontes de energia, avaliação e dimensionamento dos recursos energéticos primários; e
- A determinação do programa de expansão do parque gerador/transmissor.

A primeira atividade inclui estudos que devem ser executados com 10 a 15 anos de antecedência em relação à data de entrada em operação das centrais. Já os estudos para determinação do programa de expansão do sistema também devem ser realizados com 5 a 10 anos de antecedência com relação à data de entrada em operação, tendo em vista o tempo de maturação até o comissionamento das centrais geradoras.

Em função desses prazos, o planejamento da expansão do sistema elétrico requer a análise de um longo horizonte, seguidos de análises de médio prazo à medida que são obtidas informações mais detalhadas e precisas para representação do sistema, o que reduz o esforço para o tratamento de incertezas. Os estudos de longo prazo, com horizonte superior a 20 anos, procuram analisar as estratégias de desenvolvimento da infraestrutura de suprimento eletroenergético. Estes estudos incluem a projeção de cenários de demanda, da oferta e do custo da produção de energia elétrica, diante dos quais são feitos estudos simplificados de composição do parque gerador e da

topologia dos principais troncos de interligação. Ou seja, nestes estudos são definidas as diretrizes para o planejamento de médio prazo.

O planejamento é uma cadeia de ações integradas, conforme apresentado na Figura 14. Observe que o bloco referente à “política energética” não está conectado ao processo de planejamento em si. Como se abordou anteriormente neste Produto, há de se fortalecer os vínculos procedimentais entre as etapas de planejamento do setor energético e do planejamento do setor elétrico. Dentro do proposto neste trabalho, entenda-se o termo “longuíssimo” como sendo o que se denominou “muito longo”.

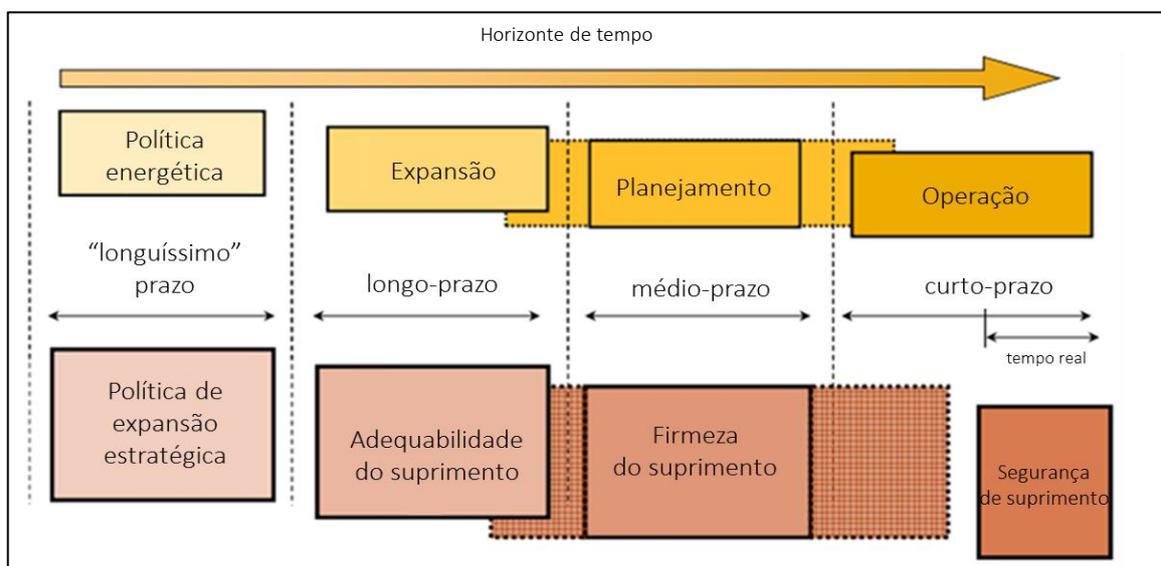


Figura 14 - Relação entre horizonte de tempo e planejamento energético, elaborado pela EPE.

A Figura 15 resume os principais estudos eletroenergéticos desenvolvidos no âmbito do planejamento. O planejamento, com base na matriz energética atual, projeções de demanda e mudanças sociais e tecnológicas, realiza estudos para atendimento da demanda. O aporte técnico da expansão matriz energética também reflete nos estudos de viabilidade de projetos hidrelétricos. Esses estudos, por necessitarem de uma grande quantidade de dados e por serem de maior complexidade são desenvolvidos pela EPE, desta forma, há a certeza da viabilidade econômica e socioambiental do projeto antes da licitação em leilão.

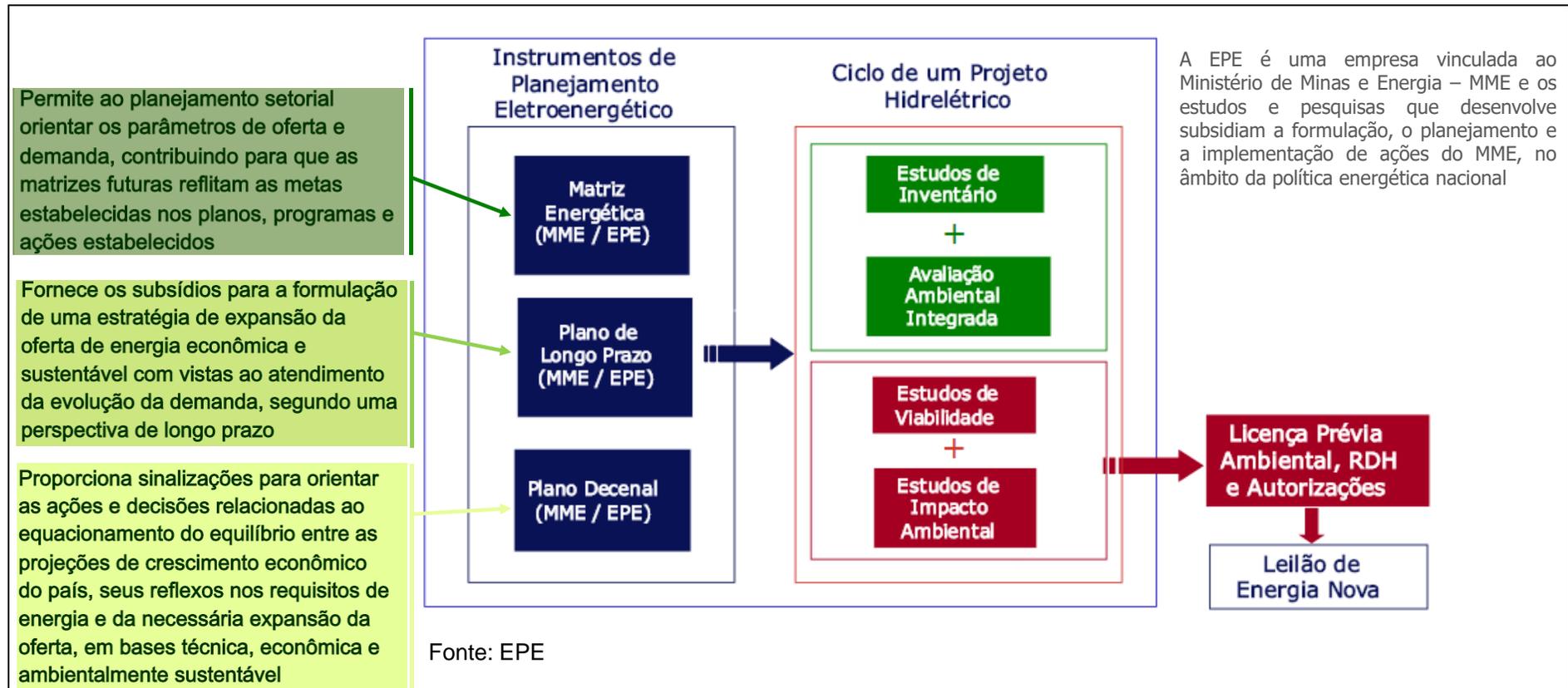


Figura 15 - Estudos eletro-energéticos desenvolvidos pela EPE/MME, elaborado pela EPE.

O planejamento de longo prazo do setor energético é instrumento fundamental para o país, na medida em que avalia tendências na produção e no uso da energia e baliza as estratégias alternativas para expansão da oferta de energia nas próximas décadas e é instrumento fundamental para a explicitação de custos e benefícios de medidas e políticas públicas. Cabe ao setor elétrico desenvolver o seu próprio modelos setorial, guardadas as interações com outros setores. Dado o elenco de recursos energéticos e tecnológicos, projeta-se a demanda de energia elétrica e formula-se uma estratégia de expansão que permite atendê-la de forma segura e econômica.

O PDE, no que diz respeito ao setor elétrico, tem um horizonte de estudo de longo prazo, mas adota como trajetória referencial apenas a evolução dos primeiros 10 anos e periodicidade anual, buscando um processo de planejamento combinado da expansão da geração e da transmissão de energia elétrica, incluindo condicionantes socioambientais. O objetivo do PDE é selecionar o conjunto mais adequado de novos empreendimentos hidroelétricos, termelétricos, fontes com incentivos governamentais e reforços em interligações, com suas respectivas datas estimadas para implantação, considerando diferentes cenários de mercado, de modo a orientar futuras ações governamentais e dos agentes do SEB. Este plano tem natureza estrutural, e adota como critério para estabelecimento do plano de obras, o menor custo total (investimento e operação) e reduzir o impacto socioambiental dos empreendimentos.

Para esta configuração, são realizadas análises probabilísticas das condições de suprimento de energia e potência e, são calculados os custos de expansão e de operação resultantes. Dentre os condicionantes desse estudo podem-se mencionar: os requisitos de mercado de cada subsistema, os prazos, custos e viabilidade socioambiental dos empreendimentos, a continuidade e o aproveitamento sequencial adequado do potencial hidrelétrico e as localizações regionais indicativas das termelétricas. Desse estudo resultam metas físicas e financeiras estimadas para um programa global de investimentos na expansão da capacidade de geração, transmissão e distribuição do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O Plano Decenal detalha melhor a expansão de energia, determinando a data, a capacidade e o local dos empreendimentos necessários para atender o crescimento da demanda de energia elétrica, destacando-se os seguintes pontos:

- Usinas em caráter indicativo;
- Sistema de transmissão em caráter determinativo;
- Compromisso entre o nível de confiabilidade desejado e os custos decorrentes;
- Deve assegurar a qualidade de serviço, ao menor custo possível.

A Figura 16 destaca os estudos desenvolvidos pela EPE, em especial a importância do PDE no processo de materialização de projetos, seguindo a trajetória evolutiva de referência. O PDE executa um papel importantíssimo para o desenvolvimento da infraestrutura energética do país, já que este representa as obras de necessárias para o atendimento das demandas energéticas e permite aos investidores maior previsibilidade dos próximos leilões e seus efeitos no mercado.



Figura 16 - Relação entre estudos e leilões no ambiente energético, para atendimento ao mercado, elaborado pela EPE.

Para a atividade de planejamento, deve ser associada tanto ao indicativo da geração, quanto ao determinativo da transmissão, e ser estruturada de tal forma que se dê condições plenas aos agentes para que ocorram os aportes de recursos privados, estabelecendo, assim, uma situação de efetiva competição nos segmentos de geração

e comercialização. Sendo assim, o Plano Decenal apresenta uma indicação, e não determinação, das perspectivas de expansão futura do setor de energia sob a ótica do governo no horizonte de dez anos. Tal expansão é analisada a partir de uma visão integrada para os diversos energéticos.

São resultados do PDE, entre outros: análise da segurança energética do sistema; balanço de oferta e demanda de garantia física; disponibilidade de combustíveis, em particular do gás natural; cronograma dos estudos de inventário de novas bacias hidrográficas; e recursos e necessidades identificados pelo planejador para o atendimento à demanda. O PDE é o instrumento fundamental para a explicitação de custos e benefícios de medidas e políticas públicas. No caso da expansão da capacidade de produção de energia elétrica, o PDE define as licitações de linhas de transmissão e indica a expansão da geração.

O planejamento da expansão também necessita de estudos regionais com as obras já definidas para um horizonte decenal principalmente a integração do sistema de transmissão com o sistema de distribuição. Além disso, aponta as interligações indicadas pelo planejamento da geração e disponibiliza a base de dados para realização dos estudos de viabilidade técnica-econômica e socioambiental.

Os estudos de expansão da transmissão culminam na elaboração do documento Programa de Expansão da Transmissão/Plano de Expansão de Longo Prazo (PET/PELP), publicado semestralmente nos meses de fevereiro e agosto de cada ano. O PET tem caráter determinativo abrangendo um horizonte de seis anos e nele constam as instalações de transmissão ainda não licitadas ou autorizadas, recomendadas para entrar em operação nos próximos seis anos. Sua principal finalidade é subsidiar o MME na priorização das instalações de transmissão que integrarão os lotes a serem oferecidos nos futuros leilões de transmissão. Além disso, constitui um importante sinalizador para os agentes setoriais, fornecedores e investidores sobre os trabalhos a serem realizados nos próximos anos. Por sua vez, o PELP tem caráter indicativo e contempla as instalações recomendadas para entrar em operação a partir do sétimo ano.

O PET é elaborado pela EPE, em paralelo ao desenvolvimento dos estudos do planejamento decenal da transmissão, em conjunto com as concessionárias de transmissão e distribuição. Esse programa, constituído pelo agrupamento de linhas e subestações de transmissão cuja instalação é prioritária, orienta o estabelecimento das concessões a serem licitadas no curto prazo.

O Plano de Ampliações e Reforços (PAR) é elaborado anualmente pelo ONS, mas com estrita ligação com o PDE e apresenta as ampliações e os reforços nas instalações de transmissão do SIN, necessários para preservar ou atingir o adequado desempenho da rede, garantir o funcionamento pleno do mercado de energia elétrica e possibilitar o livre acesso aos agentes, no seu horizonte de análise. O PAR leva em conta os estudos de planejamento, as propostas de novos reforços, as solicitações de acesso, as previsões de carga, os atrasos na implantação de instalações de geração e transmissão, assim como as informações oriundas da programação da operação elétrica, energética e da operação em tempo real do ONS. Ou seja, são consideradas ainda eventuais restrições identificadas no horizonte de curto prazo e do tempo real. As análises são realizadas em um ambiente contratual e avaliam o desempenho do sistema de acordo com os critérios e premissas definidos nos Procedimentos de Rede, do ONS. Neste contexto, o PAR indica, dentre os projetos planejados, quais os empreendimentos prioritários a serem leiloados ou outorgados nos próximos três anos, de forma a conciliar a expansão com as necessidades da operação do sistema. Também são apontados reforços para atendimento à carga contratada e para eliminar restrições identificadas no âmbito da operação do SIN.

O PET e o PAR indicam as linhas de transmissão e subestações necessárias para a adequada prestação dos serviços de transmissão de energia elétrica pela Rede Básica do SIN. Cabe ao ONS, no PAR, propor ajustes nas especificações das instalações de transmissão, a partir de aspectos conjunturais e de requisitos específicos da operação do sistema, de modo a reforçar e dar maior segurança operativa. As recomendações do PET e as propostas do PAR são compatibilizadas pelo MME, resultando no Plano de Outorgas e Licitações, que passa a ser seguido pela ANEEL, resultando em um conjunto de empreendimentos de transmissão necessário para o atendimento da

geração e da carga do SIN, denominado Consolidação de Obras de Transmissão, Plano de Outorgas.

A Figura 17 demonstra de forma simplificada todos os estudos desenvolvidos pela EPE para a elaboração do PDE.

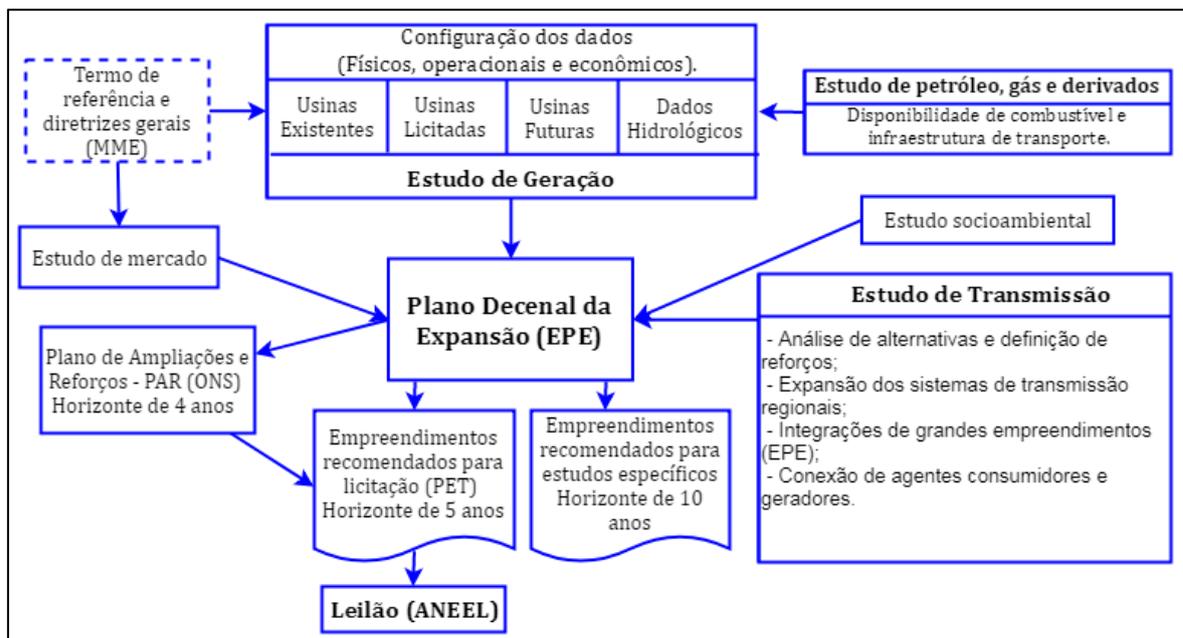


Figura 17 - Fluxograma Geral dos Estudos do PDE, elaborado pela ANEEL.

O Planejamento da Expansão da Oferta de Energia é regido pelas Resoluções nº 1, de 18 de novembro de 2004 e nº 9, de 28 de julho de 2008 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Essas resoluções estabelecem que o critério de garantia de suprimento a ser adotado será o da igualdade entre o Custo Marginal de Operação (CMO) e o Custo Marginal de Expansão (CME), assegurando a otimização da expansão do sistema elétrico, respeitado o limite de 5% para o risco de insuficiência da oferta de energia elétrica. Entendendo-se este como sendo a probabilidade de que a oferta de energia elétrica seja menor do que o mercado de energia correspondente, não importando a magnitude do déficit.

Os critérios de dimensionamento do sistema de transmissão remontam à década de 1980, tendo como base o chamado critério de contingência simples ou N-1, que implica que:

- a) As tensões pós-desligamentos devem estar dentro dos limites especificados;
- b) Não deve ocorrer corte de carga;
- c) Todos os equipamentos devem operar dentro de seus limites de sobrecarga;
- d) Os níveis de curto-circuito devem estar dentro das capacidades dos equipamentos existentes no sistema;
- e) A frequência do sistema deve estar dentro da faixa especificada;
- f) Durante o período transitório não se deve admitir a atuação de proteção;
- g) Equipamentos importantes (transformadores, geradores, compensadores ou qualquer outro dispositivo de compensação reativa) da Rede Básica que não tenham sido diretamente envolvidos no distúrbio.

A garantia física procura quantificar a contribuição da potência instalada. O conceito advém da energia assegurada das hidrelétricas, cuja incerteza hidrológica requer o cálculo da máxima energia gerada em uma determinada fração de aflúências hidrológicas simuladas, isto é, a energia garantida para um dado critério de risco assumido. A extensão do cálculo da garantia física para todas as fontes, inclusive para as que não estão sujeitas à intermitência da fonte primária (termelétricas), decorre da necessidade do sistema brasileiro de condicionar as contribuições das potências instaladas ao custo de oportunidade da água dos reservatórios.

Os impactos climáticos não são incorporados aos modelos de planejamento e operação (a operação é um subproblema da expansão), o que acarretaria um processo mais aprimorado do cálculo do Custo Marginal de Operação (CMO), possibilitando maior aderência do preço de mercado de longo prazo com a realidade física do sistema. Apesar da inclusão das mudanças climáticas nos modelos de planejamento ser importante, é necessário estudos de entendimento e representação do fenômeno (a partir da correlação com dados históricos e posterior calibração/aferição do modelo) e projeção de cenários validados pelo setor, sem os quais a estratégia adotada deve focar nas medidas de mitigação das mudanças climáticas, particularmente, na gestão do uso hidrológico e em particular na geração térmica complementar.

As mudanças climáticas que não estão incorporadas nos processos de planejamento podem gerar grandes desvios, o que é uma preocupação para estudos de médio e longo prazos, principalmente ao se considerar que as mudanças climáticas estão gerando cada vez menos chuvas nos reservatórios brasileiros, em especial no Nordeste. Os modelos utilizados no planejamento de médio prazo para a expansão do sistema são os mesmos utilizados no de curto prazo para a simulação da operação do sistema e avaliação da sua confiabilidade, definindo-se assim o uso dos recursos energéticos (despacho da geração) que minimize o custo de operação e garanta o suprimento.

A Figura 18 apresenta os módulos e modelos associados aos procedimentos de planejamento de curto, médio e longo prazos no país. Os blocos em vermelho representam os programas projetados pelo CEPEL para avaliação presente e futura da matriz energética nacional, levando em consideração todo o tipo de aspecto necessário para o caso brasileiro. Esses dados são utilizados principalmente para os estudos de expansão e para o programa NEWAVE (horizonte de 5 anos). Já os blocos em azul e verde são utilizados para o planejamento da operação, sendo os destacados em azul para, principalmente, o funcionamento do programa NEWAVE, e os destacados em verde para o DECOMP (horizonte de 2 meses). Os blocos GEVAZP, SHUISHI, PREVIVAZ e PREVICARG são de extrema importância para o funcionamento do sistema, pois é com base neles que os programas NEWAVE e DECOMP tomam a decisão de usar a água para geração elétrica ou de manter o armazenamento para evitar uma possível falta de água futura. Por fim, os blocos mostrados em laranja ainda estão em desenvolvimento pelo CEPEL, em que o DESSEM é o principal deles, servindo para o programa de planejamento de operação diário.

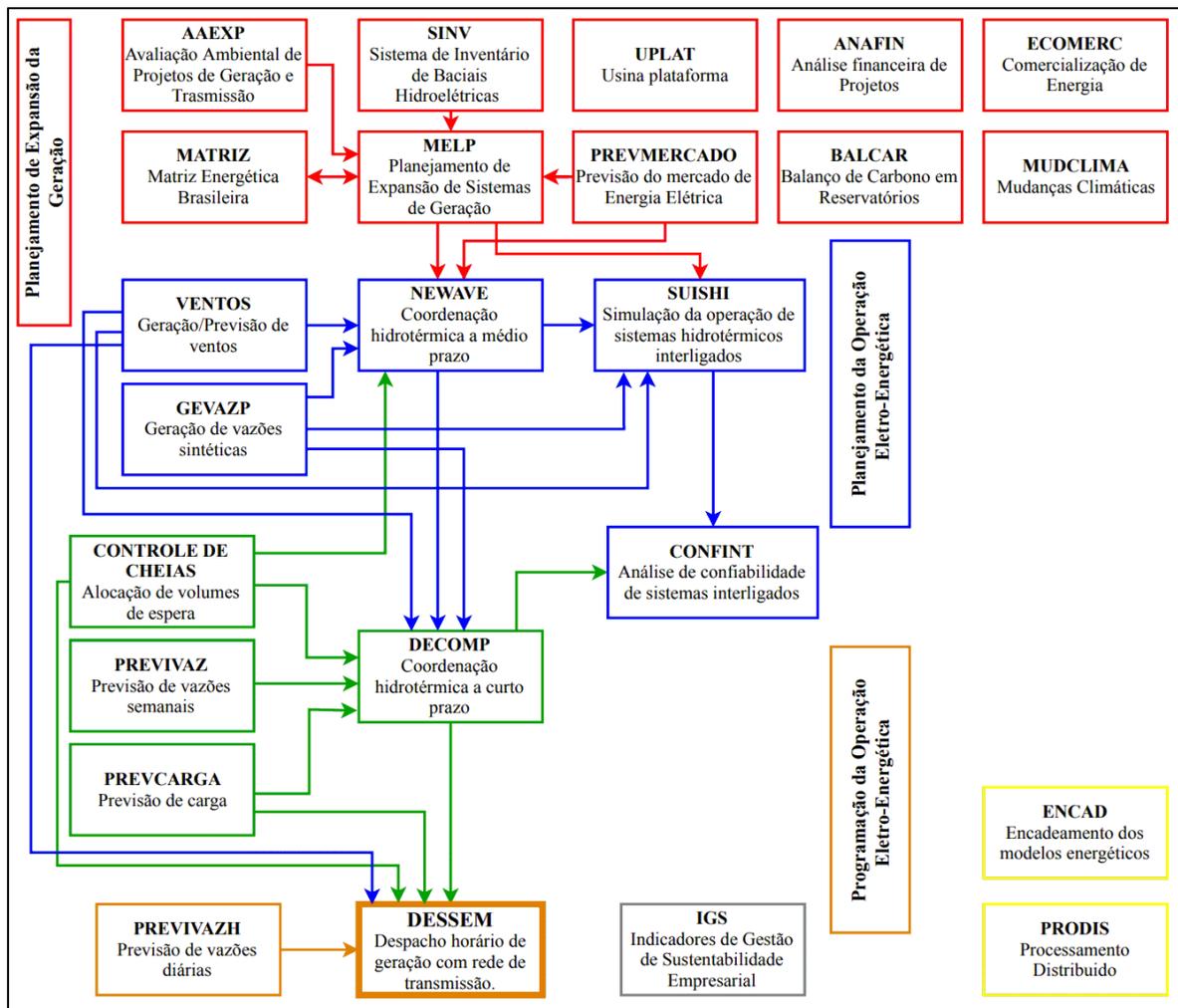


Figura 18 - Cadeia de modelos computacionais para o planejamento da operação e da expansão da geração, utilizados no planejamento eletro-energético nacional.

De forma geral, o planejamento da operação foca suas análises nos primeiros dois ou três anos do horizonte de estudo. Compreende vários estudos, que incluem a avaliação do desempenho futuro do sistema e a avaliação de curto prazo da operação. No primeiro grupo, destacam-se os estudos do planejamento energético e do planejamento elétrico da operação e, mais recentemente, a definição da curva de aversão a risco. Na avaliação de curto prazo, destacam-se o Programa Mensal de Operação (PMO), os estudos de segurança operacional e as diretrizes para a operação eletroenergética. Além do planejamento da operação, os programas também resultam a base dos preços de mercado, PLD, que é determinado em base semanal,

considerando três patamares de carga, para cada submercado do SEB (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul). É com base nesse valor que o mercado realiza suas operações de oferta de compra e venda de energia.

Com relação à expansão, o setor elétrico brasileiro utiliza o Modelo de Expansão de Longo Prazo (MELP), conforme ilustrado na Figura 18. O CEPEL vem implementando aprimoramentos para introduzir os efeitos das mudanças climáticas no modelo MELP, por meio de linhas de pesquisas e iniciativas, como o projeto MudClima. Nesse sentido, existem quatro vertentes que vem sendo trabalhadas, as quais são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Vertentes trabalhadas pela CEPEL durante o desenvolvimento do MudClima.

| Vertente | Metodologia | Estudo |
|---|--|---|
| Elaboração e análise, a partir dos <i>Representative Concentration Pathways</i> (RCP) do IPCC, de cenários de vazões afluentes às usinas hidrelétricas até 2100, incluindo eventos extremos. | O CEPEL avaliou os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-Miroc5 com as forçantes RCP 4.5 e 8.5 | Avaliação de quatro cenários de previsão de precipitação. Estes cenários foram trabalhados com o modelo chuva-vazão SMAP que é utilizado pelo ONS. |
| Desenvolvimento de metodologias para a consideração de seus impactos no planejamento da expansão e operação energética, em termos de economicidade, segurança e emissões de GEE, com reflexos nas políticas de mitigação e adaptação. | Uso dos modelos regionais Eta-Miroc5 e Eta-HadGEM2-E considerando a forçante RCP 4.5; modelo GVAZP. | Avaliar os efeitos do El Niño – Oscilação Sul (ENOS) que alteram o regime de chuva em função da temperatura dos oceanos; foram avaliadas a frequência e intensidade das anomalias entre o período 1961-1990 comparadas com o clima futuro de 2011 a 2100 para as UHEs de Tucuruí e Itá. |
| Desenvolvimento de estratégias e ações de adaptação aos efeitos das mudanças climáticas na área social, de ecossistemas e empresarial. | Modelos do tipo <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP) e <i>VIP analysis</i> , incorporando as restrições do MELP e NEWAVE. | CEPEL estima incluir nos modelos de planejamento as restrições impostas pelos compromissos assumidos pelo governo brasileiro quanto à mitigação das emissões de CO ₂ através de um problema multiobjectivo (ou com múltiplos critérios). |
| Desenvolvimento de metodologia para o estabelecimento de indicadores associados à adaptação e resiliência para elegibilidade de projetos hidroelétricos a títulos climáticos. | Ações via ecossistemas (AbE). | Avalia a adaptação a mudanças climáticas para prevenção quanto às perdas da biodiversidade, tolerância das comunidades a possíveis perdas causadas pela mudança do clima quanto à restauração de ecossistemas à sua condição original. |

O planejamento da expansão ainda não analisa como as mudanças climáticas podem afetar a operação dos equipamentos eletroeletrônicos do sistema. Com o aquecimento e conseqüentemente maior carga, a quantidade de centrais térmicas despachadas na ordem de mérito tende a subir (sem considerar o aumento do despacho devido aos baixos índices de chuva), dessa forma, os índices de paradas por manutenção, seja preventiva ou corretiva, podem se tornar um complicador para o operador nacional. Além da maior demanda em ambientes mais quentes, os equipamentos possuem eficiência reduzida, provocando maiores chances de falhas na geração, transmissão ou distribuição.

No que se refere ao planejamento da expansão da transmissão realizado atualmente, não foram incorporados modelos e ferramentas que fazem o delineamento das obras alocadas no tempo e no espaço de forma automática apesar de ter uma literatura extensa sobre várias propostas de modelos. O principal problema é que a natureza da rede elétrica é dinâmica e não determinística incluindo um elenco extenso de incertezas internas e externas. Processos de planejamento considerando todos esses aspectos dificilmente podem ser enfrentados utilizando apenas ferramentas automáticas. O processo é realizado basicamente através das ferramentas de análise de redes, fluxo de potência não linear (fluxo AC) e, em alguns casos, análises de confiabilidade da rede de transmissão, considerando as incertezas internas, como as taxas de falha e de reparo dos elementos da rede. Outros algoritmos de auxílio ao planejamento, como programas de avaliação de curto-circuito e de estabilidade transitória, também são utilizados, fornecendo avaliações mais criteriosas das alternativas de reforços formuladas.

7 ANÁLISE CRÍTICA DO PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E PROPOSTAS FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Conforme mencionado, 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. É importante ponderar que a EPE vem disponibilizando dados e informações em relação a metodologias e critérios de planejamento, especialmente, nos aspectos relativos ao PDE, em iniciativas como: publicações de notas técnicas detalhando o MDI e o CME, bem como a realização de Workshops para divulgação dessas metodologias.

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;
- Estudos de vulnerabilidade de ativos físicos/sistemas e planos de resiliência.

Como apresentado no Produto 2 (Estado da Arte da Vulnerabilidade do Setor Elétrico), as centrais elétricas estão sujeitas às ameaças climáticas de formas distintas. 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, conforme mostrado no Produto 2 (Estado da Arte da Vulnerabilidade do Setor Elétrico), Produto 3 (Modelagem Climática para a Geração Elétrica) e Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água).

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 afluências 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 afluências 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.

Conforme apresentado no Produto 3 (Modelagem Climática para a Geração Elétrica) e no Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água), 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 2050. A formulação do PLANEL é muito similar à do MELP. Já no PDE são utilizados os modelos MDI (para decisão de expansão) e NEWAVE (para simulação da operação do parque futuro). Recentemente, a EPE contratou um conjunto de ferramentas, via licitação pública nacional com participação de empresas estrangeiras, fornecido pela PSR para aprimorar seu processo de planejamento da expansão e, eventualmente, substituir o modelo MDI. Considerando a possibilidade de substituição das ferramentas de planejamento atuais pelo pacote da PSR (OPTGEN e SDDP (*Stochastic Dual Dynamic Programming*)), faz-se necessário avaliação futura das possibilidades de inclusão de cenários de mudanças climáticas utilizando essas novas ferramentas, uma vez que estas não abordam implicitamente os efeitos climáticos.

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 às 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.

A mudança de padrão histórico, que já é sentida nos dias atuais na bacia do rio São Francisco e com grande possibilidade de já ser uma consequência das mudanças climáticas, tem levado o setor a desenvolver estudos de sensibilidade que avaliam o impacto da restrição hídrica nessa bacia. Os estudos apresentados no Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água), em que os efeitos das mudanças foram diretamente avaliados, mostram a necessidade de ir além de avaliação das sensibilidades e estabelecer cenários efetivos para utilização no planejamento de longo prazo que naturalmente reflete em ações e medidas de médio prazo. Isso evidencia a necessidade de se dissociar aspectos comerciais do planejamento de longo prazo, criando, entretanto, mecanismos que sinalizem e/ou compensem aos agentes comerciais os possíveis impactos resultantes das decisões do planejador.

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 prazos.

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, conforme apresentado na sequência, 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 prevê-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, conforme apresentado

no Produto 5 (Análise da Mudança Climática junto ao Planejamento de Expansão de Sistemas Elétricos) e resumido na Figura 19.

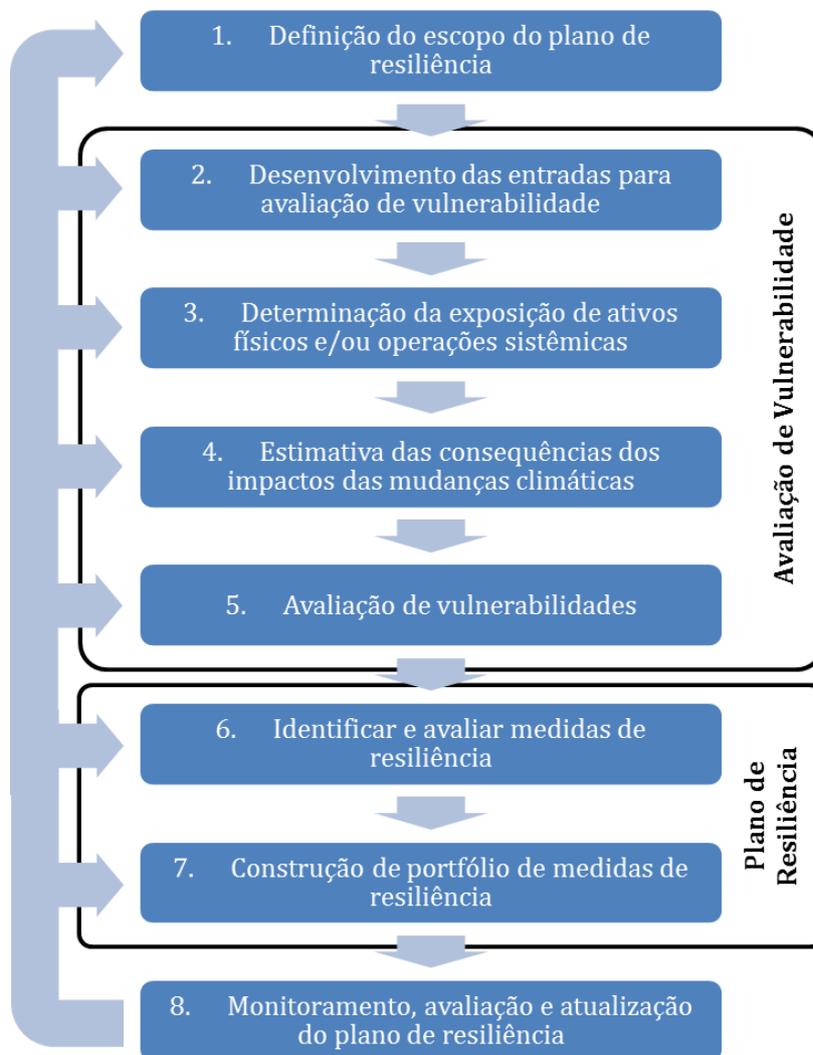


Figura 19 - Fluxograma para elaboração do plano de resiliência.

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

1. Definição do escopo do plano de resiliência
 - a. Motivações (mudanças climáticas);
 - b. Definição do foco (produção ou consumo);
 - c. Descrição técnica (geração, transmissão, distribuição e consumo, ativos elementares ou sistemas);
 - d. Delimitação geográfica e social (regiões e características gerais);

- e. Consideração dos tipos de eventos climáticos a serem considerados (tendências e/ou eventos críticos).
2. Desenvolvimento das entradas para avaliação de vulnerabilidade
 - a. Levantar os principais impactos a serem analisados;
 - b. Identificar e levantar as informações e dados necessários para caracterizar os riscos climáticos futuros e os possíveis impactos;
 - c. Selecionar quais cenários de mudança climática serão considerados;
 - d. Escolher quais projeções climáticas, recursos de dados e ferramentas usar.
 3. Determinação da exposição de ativos físicos e/ou operações sistêmicas
 - a. Identificar os tipos de ameaças relacionadas às mudanças climáticas e às vulnerabilidades associadas ao ativo/sistema do setor elétrico focado;
 - b. Definir os métodos para avaliação da vulnerabilidade;
 - c. Entender as limitações das estimativas das variáveis focadas oriundas dos modelos climáticos de grande escala e dos métodos de regionalização (*downscaling*);
 - d. Estabelecer métodos de medição dos danos como procedimento de avaliação da vulnerabilidade;
 - e. Modelagem técnica dos ativos/sistemas para fins de avaliação dos danos.
 4. Estimativa das consequências dos impactos das mudanças climáticas
 - a. 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);
 - b. Considerar, se necessário, os efeitos extraordinários sobre os custos, como em caso de catástrofes;
 - c. Calcular os custos associados às ameaças para os elementos/sistemas definidos.

5. Avaliação de vulnerabilidades
 - a. Agrupamento dos ativos/sistemas para o desenvolvimento do estudo;
 - b. Definir de forma técnica a ameaça (intensidade associada a um risco ou cenário, por exemplo);
 - c. Estabelecer critérios para ordenamento das vulnerabilidades dos ativos/sistemas (matriz de risco-dano, por exemplo).
6. Identificar e avaliar medidas de resiliência
 - a. Identificar opções para melhorar a resiliência de ativos/sistemas;
 - b. Estimar custos de medidas de resiliência;
 - c. 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
 - a. Avaliar as medidas de resiliência;
 - b. Priorizar e selecionar medidas de resiliência;
 - c. Integrar as ações de melhoria de resiliência com planos de expansão;
 - d. Estabelecer o plano de melhoria de resiliência;
8. Monitoramento, avaliação e atualização do plano de resiliência
 - a. Monitorar a implementação do plano de resiliência;
 - b. Atualização das informações e modelos de mudanças climáticas;
 - c. Atualização das informações técnicas do ativo/sistema;
 - d. Avaliação do impacto desta atualização no plano de resiliência;
 - e. 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.

8 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da elaboração deste projeto META (MME/BIRD CONTRATO Nº 12/2018), intitulado “**Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos**”, diversas fragilidades e recomendações foram encontradas e citadas nos Produtos desenvolvidos, dentro do novo contexto climático. Assim, este item busca elencar, de forma objetiva, tais recomendações de outros trabalhos em tópicos que necessitam de maiores aprofundamentos sobre o tema em questão e que, conseqüentemente, seriam frutos deste projeto executado.

Diante disso, a Tabela 8 apresenta uma lista de possíveis e importantes trabalhos futuros, contendo seus objetivos, seus resultados esperados e suas justificativas.

Tabela 8 - Relação de possíveis trabalhos futuros sobre o tema do atual projeto.

| Item | Trabalho | Objetivo | Resultados esperados | Justificativa |
|------|---|--|---|---|
| 1 | Mapeamento das ameaças ao Sistema Interligado Nacional (SIN), face às mudanças climáticas. | Mapeamento das principais ameaças às estruturas e sistemas elétricos brasileiros, face às mudanças climáticas. Essas ameaças referem-se a variáveis ligadas diretamente ou indiretamente ao clima, como temperatura, vento, chuva, queimadas, etc. | Mapear e classificar a severidade dos eventos climáticos e seus impactos no SIN. | Necessidade de conhecer as ameaças climáticas sobre o SIN de modo a permitir estudos de vulnerabilidade das estruturas e dos sistemas. |
| 2 | Plano prioritário de vulnerabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). | Elaborar um plano com as prioridades dos sistemas e ativos do SIN para o desenvolvimento de estudos de vulnerabilidade face às mudanças climáticas. | Recomendação dos estudos de vulnerabilidade prioritários. | Estabelecer quais são os principais elementos e sistemas que afetam a vulnerabilidades do SIN face às mudanças climáticas, de modo a priorizar os estudos de vulnerabilidade que apoiarão a melhoria de resiliência |
| 3 | Proposição de métodos e processos para o estudo da vulnerabilidade sistêmica do SIN, face às mudanças climáticas. | Analisar diferentes métodos e processos para o estudo da vulnerabilidade sistêmica do SIN, face às mudanças climáticas, para que se possam indicar os que apresentam melhores resultados. | Levantamento de métodos e processos para estudos de vulnerabilidade do sistema elétrico e avaliação da adequabilidade ao SIN (ativos e sistemas). | Não há uma ferramental e procedimentos adequados para estudos de vulnerabilidade no SIN. |
| 4 | Procedimentos para a elaboração de Planos de Melhoria de Resiliência. | Propor critérios, modelos e procedimentos para a elaboração de planos de melhoria de resiliência na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, que levem em consideração as mudanças climáticas e sirvam ao planejamento. | Critérios, modelos e procedimentos a serem usados no planejamento do setor, a serem consolidados no Plano de Melhoria de Resiliência. | A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil ainda apresentam vulnerabilidades que poderiam ser sanadas com práticas de planos de resiliência mais focados para cada setor. |

| Item | Trabalho | Objetivo | Resultados esperados | Justificativa |
|------|--|---|---|--|
| 5 | Diagnóstico dos modelos de planejamento energético de longo prazo e propostas de adaptação para incorporar os efeitos das mudanças climáticas. | Realizar o diagnóstico dos modelos de planejamento de longo prazo, bem como dos procedimentos de uso e interações dos mesmos, de forma a se conhecer suas potencialidades e limitações para a incorporação dos efeitos das mudanças climáticas. | Avaliação crítica dos modelos e procedimentos usados no planejamento. | Os modelos atuais não são adaptados aos estudos dos impactos das mudanças climáticas e os procedimentos empregados não desenvolvem esses estudos como parte integrante do planejamento. |
| 6 | Procedimentos para o Planejamento Energético Nacional. | Elaboração de documento de referência sobre “Procedimentos para o Planejamento Energético Nacional”. | Documento que subsidie a elaboração dos “Procedimentos para o Planejamento Energético Nacional”. | Cobrir uma lacuna existente no planejamento, seguindo os exemplos da distribuição, comercialização e operação do sistema. |
| 7 | Avaliação dos usos consuntivos e não-consuntivos da água no longo prazo, sob efeito de mudanças climáticas. | Desenvolver metodologias para obtenção de estimativas de usos da água com incorporação de projeções de mudanças climáticas. | Ferramental para projeções de usos consuntivos e não-consuntivos aderentes aos cenários de alterações do clima. | Em anos recentes ocorreram importantes avanços nas estimativas de diagnóstico dos usos consuntivos da água, principalmente nos trabalhos realizados pela ANA. Entretanto, em relação às projeções futuras, são raros os trabalhos que incorporam as mudanças climáticas nas estimativas. |
| 8 | Modelos de uso e ocupação do solo para o planejamento de longo prazo. | Desenvolver modelos adaptados para projetar cenários de uso e ocupação de solo. | Técnicas quali-quantitativas para projeção do uso do solo, considerando o efeito das mudanças do clima. | Mudanças no clima podem afetar os padrões de uso e ocupação do solo e, por consequência, o balanço de água no solo e a demanda de usos consuntivos da água. Os modelos atualmente aplicados no Brasil utilizam somente cenários econômicos e não incorporam as mudanças climáticas. |
| 9 | Aperfeiçoamento de modelos chuva-vazão para uso no planejamento de longo prazo. | Desenvolver modelos adaptados para realizar estimativas de vazões afluentes em cenários de mudanças climáticas, associadas com mudanças no uso do solo e usos consuntivos da água. | Estimativas de vazões afluentes mais confiáveis para o planejamento de longo prazo. | Os processos que envolvem os impactos de mudanças climáticas sobre as vazões são complexos e altamente não lineares, no tempo e no espaço. Modelos distribuídos e conceituais com forte embasamento físico são os mais adequados para realizar estimativas. É preciso testar e validar modelos capazes de incorporar projeções de mudanças climáticas combinadas com alterações no uso |

| Item | Trabalho | Objetivo | Resultados esperados | Justificativa |
|------|--|---|--|--|
| | | | | do solo e nos usos consuntivos da água. |
| 10 | Estimativas de incertezas nas projeções de mudanças climáticas. | Desenvolver estudos visando analisar as incertezas nas variáveis climáticas que afetam a geração de energia elétrica. | Metodologia para se determinar estimativa de incertezas de variáveis climáticas em projeções de modelos climáticos. | Praticamente não existem para o território brasileiro estudos que avaliam as incertezas nas projeções climáticas. Com a incorporação de fontes de geração, fortemente dependentes do clima, torna-se importante avaliar o grau de incertezas das diversas variáveis, a fim de incorporá-las nos modelos de planejamento. |
| 11 | Proposta de ampliação do número de modelos regionais e de cenários referência para fins de planejamento energético de longo prazo. | Ter um conjunto (<i>ensemble</i>) maior de simulações e de cenários de emissão de GEE para se conhecer ou reduzir as incertezas das projeções climáticas, avaliar melhor as principais tendências e obter resultados mais confiáveis. | Identificar o resultado mais provável de acontecer, com avaliação da mínima e máxima mudança projetada. | A partir de um conjunto de múltiplas simulações (integrações do modelo climático regional aninhado em diferentes modelos globais sob diferentes cenários de emissão dos GEE) pode-se agregar resultados analisando tendências que venham a se repetir nas variáveis climáticas de interesse para o setor energético. |
| 12 | Propostas de uso de modelos regionais integrados em mais alta resolução horizontal, para fins de planejamento energético. | Obter cenários de mudanças climáticas regionalizados em alta resolução espacial (ex.: 5 km x 5 km), pois possibilitam um melhor detalhamento das características de paisagem (ex.: linhas costeiras, diferentes características e cobertura do solo etc.), além de melhor representação de extremos climáticos. | Simulações das variáveis climáticas importantes para setor regionalizadas em alta resolução espacial | Integrações em altíssima resolução têm demonstrado simulações do clima presente mais aprimoradas, bem como melhoria nos valores da distribuição de frequência de eventos extremos de chuva e temperatura. |
| 13 | Técnicas para a avaliação geográfica de variáveis climáticas que impactam os ativos e os sistemas elétricos no âmbito brasileiro. | Avaliação geográfica das variáveis climáticas de interesse para o planejamento elétrico, tais como a radiação solar incidente a superfície, nebulosidade e velocidade do vento em diferentes alturas. | Identificar o desempenho do modelo na simulação dessas variáveis, tomando o clima presente como base; obter resultados mais confiáveis através do ajuste das simulações climáticas, a partir de dados observacionais; identificar as | As variáveis climáticas mais extensivamente analisadas na literatura referem-se à temperatura do ar e à precipitação. Em vista disso, existe um déficit de artigos que contemplem a avaliação das demais variáveis de interesse/e ou importantes para o setor energético. |

| Item | Trabalho | Objetivo | Resultados esperados | Justificativa |
|------|---|--|--|---|
| | | | possíveis mudanças projetadas. | |
| 14 | Capacitação em técnicas de incorporação do efeito das mudanças climáticas nos estudos de engenharia e planejamento do setor elétrico. | Desenvolver os profissionais para melhor entendimento dos efeitos climáticos afim de propor melhorias nos estudos de planejamento e operação. | Formação de pessoal qualificado para agir diretamente ou indiretamente no planejamento do setor elétrico. | As mudanças climáticas já são uma realidade e os técnicos do setor elétrico não podem ficar alheios ao que se passa, sendo necessário a eles conhecer novos modelos para estudos do setor elétrico. |
| 15 | Novos critérios de engenharia, planejamento e operação dos ativos e sistemas elétricos brasileiros, visando à adaptação às mudanças climáticas. | Adaptar o atual conjunto de critérios empregados nos estudos do setor elétrico, para enfrentar as mudanças climáticas. | Adequação dos ativos e dos sistemas para enfrentar o efeito das mudanças climáticas. | Os atuais critérios e procedimentos do setor elétrico não levam em consideração o novo comportamento do clima. |
| 16 | Procedimentos de interação entre os planejamentos do setor elétrico e de outros setores | Estabelecer procedimentos que garantam um relacionamento institucional adequado entre o planejamento do setor elétrico e os planejamentos de outros setores econômicos e sociais, de forma a contribuir com a consolidação efetiva de um planejamento integrado de recursos. | Normas e procedimentos de comunicação entre entidades relacionadas aos outros setores e o órgão de planejamento do setor elétrico. | O planejamento integrado de recursos aplicado ao setor elétrico exige uma integração com outros setores econômicos e sociais de forma a ponderar seus interesses diversos, configurando menor incerteza ao planejamento elétrico. |