

Brasil, maio de 2023.

RELATÓRIO TÉCNICO

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Propostas de adaptação do setor elétrico brasileiro à crise climática global.

Autores: Dr. José Wanderley Marangon Lima, Dr. Lincoln Muniz Alves e Dr. José Antonio Marengo.

Realização: Coalizão Energia Limpa.

Organização: ClimaInfo.

Apoio: Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (Idec), Instituto Clima e Sociedade (iCS), Instituto de Energia e Meio Ambiente (Iema), Instituto de Estudos Socioeconômicos (Inesc), Instituto Internacional Arayara e Instituto Pólis.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

SUMÁRIO

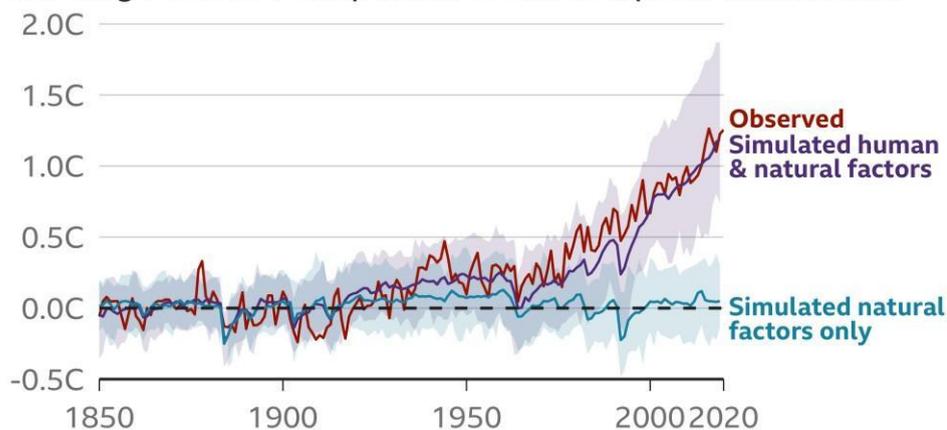
1	INTRODUÇÃO	3
2	IMPACTOS DO CLIMA NAS VAZÕES DAS PRINCIPAIS BACIAS DO BRASIL	5
2.1	Modelagem Hidrológica	5
2.2	Projeções Hidrológicas	7
2.3	Cobertura do solo	9
2.4	Usos consuntivos	12
3	A MUDANÇA CLIMÁTICA E A VULNERABILIDADE DO SETOR ENERGÉTICO	15
3.1	Conceito de Vulnerabilidade	15
3.2	Resiliência climática e ameaça climática	18
3.3	Sistema elétrico brasileiro	21
3.4	Cenários de mudanças climáticas estudados para o setor elétrico	24
4	PRINCIPAIS AÇÕES	29
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

Há evidências contundentes de que as atividades humanas estão alterando profundamente o clima da Terra, e o aquecimento está ocorrendo a uma taxa sem precedentes, chegando a 1,1 °C desde o início da era industrial em 1850 (IPCC, 2021). A Figura 1 apresenta uma simulação do aquecimento caso não houvesse a interferência humana comparado com a realidade que vivemos hoje.

Human influence has warmed the climate

Change in average global temperature relative to 1850-1900, showing observed temperatures and computer simulations



Note: Shaded areas show possible range for simulated scenarios

Source: IPCC, 2021: Summary for Policymakers

BBC

Figura 1 – Resultados do IPCC 2021

Nota-se que a simulação considerando apenas os aspectos naturais não elevaria a temperatura média do planeta, ou seja, o efeito antrópico foi determinante na mudança do clima. Os principais pontos apresentados no sexto relatório de avaliação do IPCC explicitam os alertas sobre as mudanças climáticas:

- A temperatura da superfície do globo foi 1,09° C maior na década 2011-2020 que na década de 1850-1900
- Os últimos 5 anos foram os mais quentes desde 1850
- A taxa de aumento no nível do mar aumentou o triplo comparado com 1901-1971
- A influência humana no processo é muito provável (90%) sendo o principal fator do degelo desde 1990 e diminuição do mar de gelo do Ártico.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

- Existe uma certa convicção de que os extremos de calor incluindo ondas de calor tornaram mais frequentes e mais intensas desde 1950s, enquanto eventos frios têm sido menos frequentes e menos severos.

Compreender a variabilidade climática, suas causas, impactos potenciais e, sobretudo, sua previsibilidade, são o objetivo de uma parcela significativa da comunidade científica dedicada às ciências ambientais. A análise das tendências climáticas observadas no Brasil nas últimas quatro décadas revela um aumento da temperatura em todas as regiões brasileiras. Em geral, verificou-se aumento de 0,5 ° C por década nas temperaturas mínima e máxima médias, chegando a 1 °C em certas regiões no inverno e primavera. Essa tendência é acompanhada de um aumento no número de dias com temperatura máxima extrema, com incremento superior a 30% em praticamente todo o país (Santos, et al., 2020).

A busca para diminuir ao máximo a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera parece ser um procedimento correto e tem impactado o setor de energia elétrica visto que este setor emite grande quantidade quando queima combustíveis fósseis nas usinas termelétricas. A descarbonização do setor tem avançado com a tecnologia dos aerogeradores e das placas fotovoltaicas que estão substituindo a geração térmica. No entanto, o aumento desta geração renovável introduz incertezas no despacho produzidas pelas variáveis climáticas. Estudos e pesquisas vêm sendo realizados para medir o impacto das mudanças climáticas na geração de energia elétrica. Estes impactos acabam sendo maiores em sistemas que emitem menos gases de efeito estufa, ou seja, em sistemas com energia limpa.

Este relatório é continuação do Produto I, que apresentou as variações do clima para o sistema regional CORDEX do CMIP 5 e com as análises obtidas com a utilização do modelo regional Eta. Para a análise dos impactos na produção de energia elétrica é necessário que os modelos regionais (MCG) tenham uma projeção definida através de cenários quanto à precipitação, vento e irradiação pois estas variáveis representam a disponibilidade de “combustíveis” para as usinas renováveis. Com estas projeções é possível avaliar o impacto das mudanças climáticas na produção de energia e nas estruturas das usinas, sistemas de transmissão e distribuição de energia.

O Capítulo 2 deste relatório expõe os reflexos das mudanças climáticas para o sistema hidrológico apresentadas no Produto I. Os efeitos das mudanças na precipitação e a forma como a cobertura do solo e usos consultivos reagem alteram as vazões nas bacias e consequentemente na produção de energia elétrica. No Capítulo 3 é caracterizada a vulnerabilidade do setor frente à ameaça climática provocada pelas mudanças no comportamento do clima. Uma descrição do setor e o efeito das mudanças são apresentados

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

para visualizar e conduzir a possíveis soluções de adaptação. Por último, no Capítulo 4, são sugeridas algumas ações para minimizar os efeitos das mudanças climáticas.

2 IMPACTOS DO CLIMA NAS VAZÕES DAS PRINCIPAIS BACIAS DO BRASIL

2.1 Modelagem Hidrológica

Com as projeções de precipitação, temperatura e de outras variáveis obtidas dos modelos climáticos regionais e com a descrição do tipo de solo e vegetação de uma bacia, é possível utilizando um modelo hidrológico físico ou empírico, determinar as vazões futuras em vários trechos das bacias. Em estudos realizados pela MC&E para a ANEEL e Ministério de Minas e Energia (MME), o modelo MGB (Collischonn, Simulação hidrológica de grandes bacias, 2001) foi utilizado para obter as vazões futuras de grande parte das bacias onde estão instaladas as usinas do sistema interligado nacional. Basicamente, este modelo é composto de módulos para o cálculo de balanço de água no solo, evapotranspiração, propagação de escoamento dentro de uma célula e pela rede de drenagem¹.

Na preparação dos dados de entrada, a bacia é subdividida em pequenas unidades, denominadas minibacias, que são interligadas pela rede de drenagem, considerando um único canal de escoamento para cada minibacia. Por sua vez, uma minibacia é dividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), também chamadas de blocos de tipo e uso do solo, de forma que o modelo possa considerar a variabilidade física dos processos, embora não levando em conta a localização de cada URH dentro da minibacia. As URHs (*groundwater response unit* -GRU) resultam da combinação de características de uso e tipo do solo, e da cobertura vegetal. A cada URH se associam parâmetros que determinam os processos de geração de escoamento. A Figura 2 apresenta, esquematicamente, a estrutura básica do modelo MGB-IPH.

Os processos representados no MGB-IPH são: interceptação, balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos nas minibacias e escoamento na rede de drenagem. Os dados principais de entrada são a precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica (Bayer & Collischonn, Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra, 2013).

¹ <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/>

Fonte: (Collischonn, Buarque, & Mendes, MGB-IPH: I Curso Básico - Descrição teórica do MGB e estrutura geral do MGB-IPH, 2015)

Figura 2 - Estrutura do modelo MGB

A simulação dos processos de interceptação, evapotranspiração, geração de escoamento e o balanço de água no solo ocorre de forma independente, em cada URH dentro de uma célula. Esses processos são representados como reservatórios, em que o volume depende de parâmetros associados ao processo. Por exemplo, o Índice de Área Foliar (IAF) é um parâmetro que no modelo é usado para calcular o volume do reservatório da interceptação. Coberturas vegetais mais densas, como florestas, possuem maior IAF, têm maior capacidade em reter a água da chuva. Assim, os escoamentos resultantes de todas URHs em uma célula são somados e armazenados em diferentes reservatórios de acordo com sua natureza superficial, subsuperficial e subterrânea (Felix & Da Paz, 2016). Um reservatório linear simples simula o aporte de cada tipo de escoamento gerado na célula até a rede de drenagem e o escoamento ao longo da rede de drenagem é propagado até a célula de jusante ao longo do trecho de rio que conecta as duas células (Felix & Da Paz, 2016).

As variáveis precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica em uma célula são obtidas por interpolação dos postos com dados mais próximos. As funções interpoladoras disponíveis são Polígonos de Thiessen (vizinho mais próximo) e o Inverso da Distância ao Quadrado (Collischonn & Tucci, Simulação hidrológica de grandes bacias, 2001). De acordo com (Collischonn, Simulação hidrológica de grandes bacias, 2001), o desempenho do modelo é avaliado pelas funções

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

objetivo:

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), Coeficiente de Nash-Sutcliffe para os logaritmos das vazões (NSlog) e a diferença entre volumes medidos e calculados (ΔV).

Modelos físicos similares foram desenvolvidos como o SMAP utilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) que também utiliza uma estrutura de reservatórios, mas desagrega as minibacias focando mais na determinação das afluências laterais ou incrementais.

Uma outra vertente que vem sendo bastante usada para diminuir a necessidade de busca de parâmetros físicos da bacia, são os modelos utilizando redes neurais artificiais que mapeiam variáveis de entrada como a chuva observada e a chuva projetada pelos MCRs além das vazões históricas para ter como variável de saída as projeções futuras de vazão.

2.2 Projeções Hidrológicas

A partir do quarto relatório de avaliação das mudanças climáticas (AR4) do IPCC (2007), vários trabalhos surgiram com o impacto nas vazões. O primeiro trabalho que calculou o impacto na energia assegurada ou energia garantida do Setor Elétrico Brasileiro foi o do Projeto P&D Estratégico ANEEL 10 finalizado em 2013 (Lima, Colischonn, & Marengo, 2014). Este trabalho utilizou o *Eta* com discretização de 40 km, aninhado ao modelo global HadCM3. O trabalho de (Viola, Mello, Chou, Yanagi, & Gomes, 2014) também utilizou o *Eta* aninhado ao HadCM3 para avaliar os impactos na Bacia do Rio Grande (região sudeste do Brasil) no cenário A1B. Havia a preocupação de verificar o efeito das mudanças nas vazões e foi utilizado o modelo chuva-vazão da Universidade de Lavras, o *LASH*. Adotou-se o mesmo período histórico 1961-1990, usado em (Lima, Colischonn, & Marengo, 2014), para comparar com o período futuro de 2011-2099. Neste trabalho foi utilizado o modelo MGB para obter as vazões. No primeiro período de 2011 a 2040, o modelo clima/chuva-vazão projetou uma redução nas vazões dos rios dessa bacia e uma estabilidade nos demais períodos. No que se refere à sazonalidade, foi observado que os períodos secos aumentaram e os períodos chuvosos diminuíram, afetando a regularização dos rios.

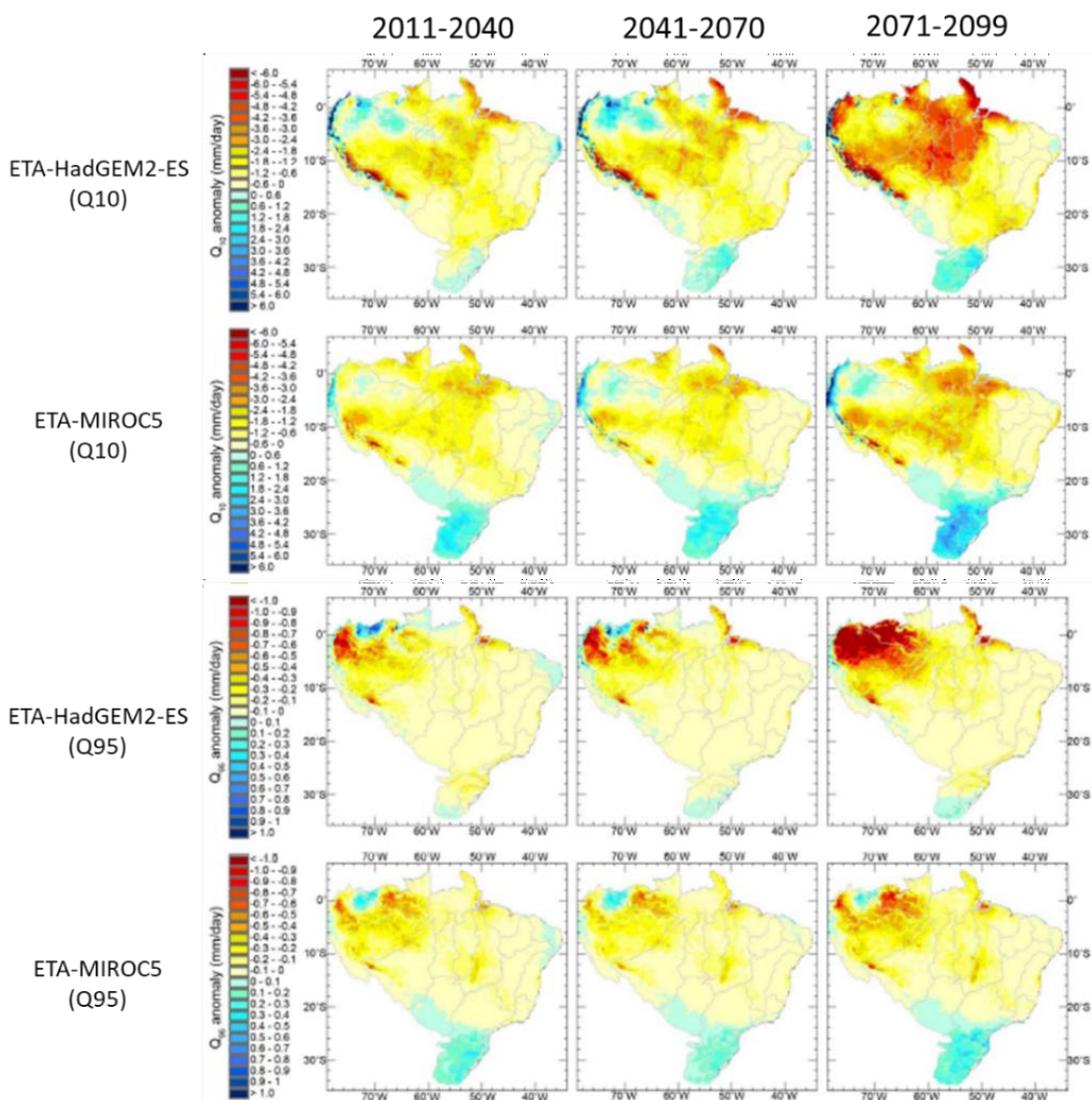
(Neto, da Paz, Marengo, & Chou, 2016) avaliaram, através do modelo *Eta* aninhado ao *MIROC5* e *HadGEM2-ES*, os resultados de vazões extremas (mínimas ou máximas) no Brasil até 2100, utilizando uma curva de permanência, cujas condições máximas foram representadas pela Q10 (valores de vazão com frequência inferior a 10%) e as condições mínimas, por Q95 (valores de vazão com frequência superior a 95%), como ilustra a Figura 3. Para alguns setores das regiões Sul e Centro-Oeste há intensificação das vazões Q10, enquanto para o restante do país esse parâmetro apresenta tendências negativas,

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

decrecendo até o final do século. Em relação à Q95, há diferenças ligeiramente negativas

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

que se intensificam até o final do século. Destacam-se os indicativos de redução das vazões nas bacias do Tocantins e São Francisco e o aumento das vazões médias anuais nas bacias hidrográficas localizadas na região Sul do Brasil. Já para a bacia do Rio Paraná, os resultados divergem, uma vez que o modelo Eta-MIROC5 indicou aumento e o Eta-HadGEM2-ES, a redução das vazões.



Fonte: (Neto, da Paz, Marengo, & Chou, 2016)

Figura 3 - Mudanças sazonais nas vazões Q10 e Q95 por modelo para o horizonte de análise 2011-2099 dividido em três períodos no cenário RCP8.5

Outro estudo relacionado aos eventos de vazões extremas foi realizado por (Silveira, Filho, Junior, Junior, & Cabral, 2018), utilizando as projeções de seis modelos do CMIP5 e os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Observaram-se diferentes impactos nas afluências de acordo com as regiões brasileiras: na região Sul, todos os modelos indicam aumento das vazões enquanto na região Norte a sinalização é de redução; para o Nordeste e Sudeste/Centro-

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Oeste, os modelos divergiram em relação ao impacto das mudanças climáticas nas vazões, porém com maior probabilidade de redução.

Os resultados de (Neto, da Paz, Marengo, & Chou, 2016) e (Silveira, Filho, Junior, Junior, & Cabral, 2018) concordam com as análises realizadas por (Lima, Colischonn, & Marengo, 2014). Esses autores, empregando projeções climáticas advindas de 10 MCGs para simulação hidrológica das vazões das principais usinas hidrelétricas do Brasil a partir do modelo MGB-IPH, observaram uma redução das vazões das usinas localizadas nas regiões Norte e Nordeste, enquanto para as usinas situadas no Sul e parte do Sudeste, incluindo a bacia do Paraná, a tendência foi de aumento das vazões.

Outro ponto importante quando se quer determinar o efeito das mudanças climáticas nas vazões é o efeito no uso do solo e nos usos consuntivos. Na realidade a cobertura do solo se retroalimenta com a disponibilidade de água e com as condições climáticas. Da mesma forma o uso consuntivo principalmente para a agricultura é muito influenciado pelas mudanças climáticas.

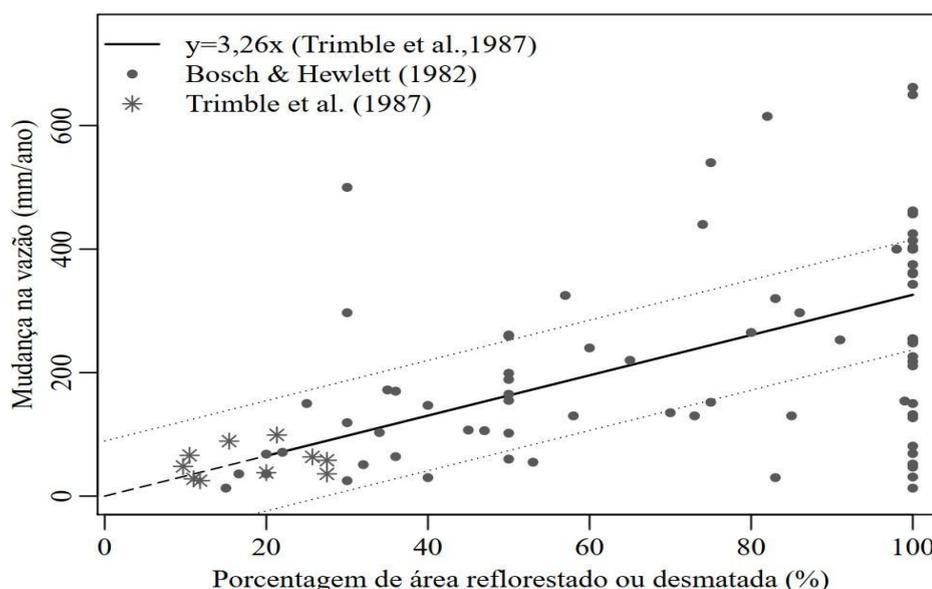
2.3 Cobertura do solo

De acordo com (Bayer, Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala, 2014), muitos experimentos já foram realizados e continuam sendo conduzidos com objetivo de quantificar o impacto das mudanças no uso solo sobre as vazões em bacias hidrográficas.

A Figura 4 apresenta o resumo de uma compilação de diversos estudos em diferentes partes do mundo, com os resultados reunidos pelos autores (Bosch & Hewlett, 1982) e (Trimble, Weirich, & Hoag, 1987). O que se observa, a partir desta figura, é que há uma tendência linear, representada por uma equação ajustada por (Trimble, Weirich, & Hoag, 1987), mas com uma considerável dispersão, devido à diversidade de condições fisiográficas e hidroclimáticas de cada experimento.

Nota-se, ainda, que os estudos se concentram em alterações na cobertura acima de 20% da área total. Isto porque alterações inferiores a 20% da área geram mudanças nas vazões que não são perceptíveis, pois estão dentro da faixa de erro dos métodos de medição.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



Fonte: (Bayer, Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala, 2014)

Figura 4 - Impacto das mudanças na área florestada sobre as vazões de bacias hidrográficas

Destaca-se, também, que são experimentos com alterações drásticas de desmatamento ou reflorestamento, onde as mudanças nos parâmetros de controle do balanço hídrico são concordantes no mesmo sentido de aumentar ou diminuir as vazões. Alterações desse tipo têm acontecido em bacias da região amazônica, por exemplo. Em outras regiões, como a bacia do Rio Paraná, as mudanças são mais sutis e com alterações no balanço hídrico que se anulam, dificultando a identificação do impacto nas vazões.

Os biomas presentes na nesta bacia são o Cerrado e a Mata Atlântica. De acordo com o trabalho de (Zanin, Tessarolo, Machado, & Albernaz, 2016), que avaliaram o impacto das mudanças climáticas sobre a cobertura vegetal natural dos biomas brasileiros, o Cerrado é resiliente às mudanças do clima e não deve sofrer alterações importantes. Já a Mata Atlântica é composta por regiões que são bastante vulneráveis às alterações das condições climáticas, reduzindo ainda mais suas áreas remanescentes. Entretanto, como mostrado anteriormente, as áreas de floresta ainda existentes na bacia representam uma porção reduzida e que tem se mantido estável ao longo das últimas décadas. Nota-se, inclusive, uma leve tendência de aumento das áreas de floresta na bacia. Portanto, não se esperam mudanças importantes na cobertura florestal para o futuro, mesmo em condições de mudanças climáticas.

Em relação às coberturas agrícolas, as projeções realizadas por (Assad, et al., 2016) indicam a possibilidade de impactos importantes devido às mudanças climáticas. Foram analisadas as principais culturas agrícolas brasileiras, incluindo soja, milho, arroz, feijão e

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

trigo, tendo sido identificadas reduções significativas de produção para essas culturas, chegando a 90 e 80% nos casos do milho e da soja, caso não sejam tomadas medidas de adaptação. No levantamento realizado por (Fundação Getúlio Vargas, 2013), é destacado que o único cultivo a ser beneficiado com as alterações no clima é a cana-de-açúcar, podendo ter sua produção mais do que duplicada até 2070. As projeções indicam ainda a redução nas áreas de pastagens, sendo substituídas pela cana-de-açúcar e grãos.

A projeção desses cenários para a cobertura natural e as agropecuárias estão alinhados com as tendências do histórico de uso e ocupação, obtido a partir dos mapas do projeto MapBiomas, que indicam a redução nas áreas de pastagem e o crescimento da cana-de-açúcar e algumas culturas agrícolas na BHRP (Figura 5).

Sob o ponto de vista de como o modelo MGB considera o uso e cobertura do solo, os cenários de mudanças no uso do solo para o horizonte até 2080 indicam alterações dentro da URH de Agricultura, que inclui cultivos agrícolas e áreas de pastagens. Portanto, a representação desses cenários se dá pela modificação nos valores dos parâmetros de vegetação do modelo MGB, sendo eles: albedo, índice de área foliar, resistência superficial e altura da vegetação.

Considerando a complexidade de projeção de cenários de usos do solo, os poucos estudos disponíveis na literatura, as limitações do modelo hidrológico e a baixa sensibilidade das vazões ao tipo de mudança projetada, optou-se por adotar um único cenário de projeção, mostrado na Figura 5, definido pelas tendências atuais observadas e nas análises de (Zanin, Tessarolo, Machado, & Albernaz, 2016), (Assad, et al., 2016) e (Fundação Getúlio Vargas, 2013).

Este cenário se caracteriza por uma redução contínua das áreas de pastagens, leve redução nas culturas agrícolas anuais e perenes e aumento na cultura semiperene, que é a cana-de-açúcar. Este aumento da cana está alinhado com a perspectiva de utilização do álcool como medida de descarbonização da matriz energética brasileira.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

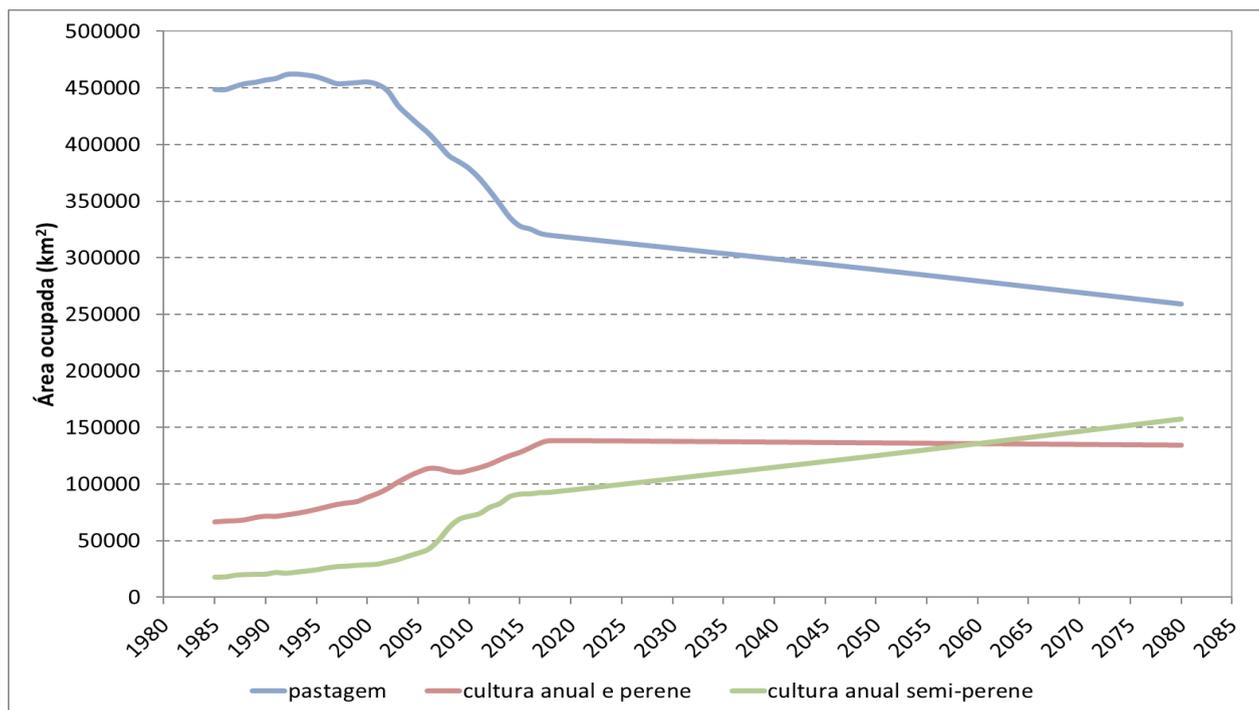


Figura 5 – Projeção de mudanças no uso e ocupação do solo para a Bacia do Rio Paraná, considerando efeito de mudanças climáticas. Horizonte até 2080

Para traduzir os efeitos dessa projeção, o procedimento adotado foi alterar os parâmetros de vegetação do modelo MGB dentro da influência da Agricultura na resposta hidrológica. Nota-se que todos os parâmetros sofrem aumento nos valores futuros, devido principalmente ao crescimento da área de cultivo de cana-de-açúcar, em substituição às áreas de pastagem e de outras culturas agrícolas.

2.4 Usos consuntivos

A estimativa dos usos consuntivos da água para as bacias hidrográficas que compõem o parque de usinas hidrelétricas brasileiro é de suma importância para o planejamento do sistema de geração, uma vez que os consumos de água precisam ser incorporados às séries de vazões afluentes às usinas, para obtenção das séries de vazões naturais que alimentam os modelos de planejamento energético (Ministério de Minas e Energia, 2017). Os desvios de água para consumo sofrem alterações ao longo do tempo e precisam ser atualizados rotineiramente, uma vez que crescimentos acelerados nas demandas podem impactar de forma significativa a geração hidrelétrica das usinas, principalmente nos períodos de estiagem.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

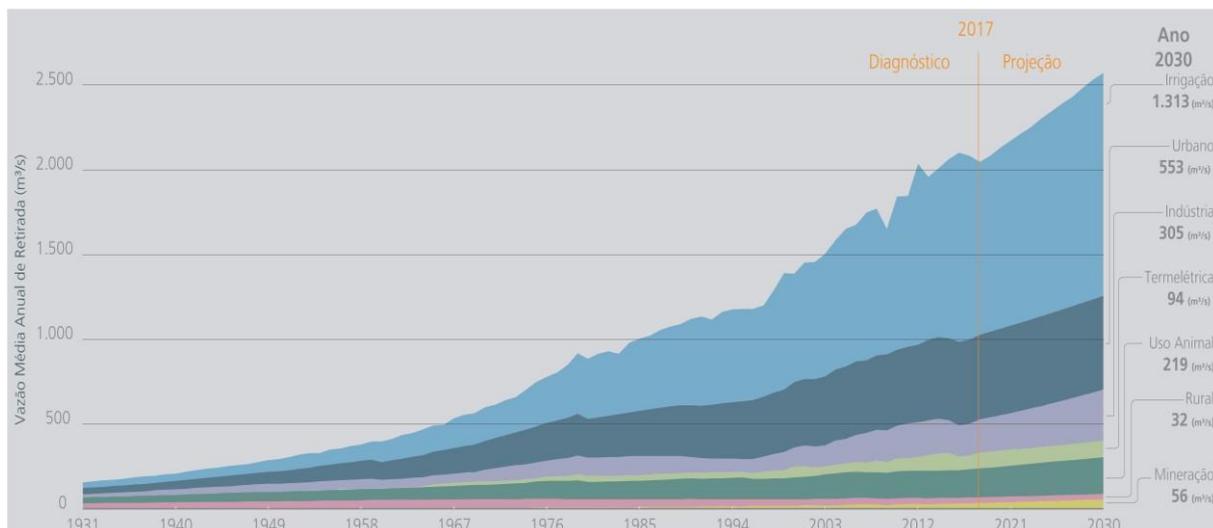
Mudanças climáticas geram impactos diretos e indiretos sobre as demandas de água, principalmente em usos nos quais o seu consumo se dá diretamente pelas condições climáticas, como no caso da irrigação de culturas agrícolas. Apesar disso, as estimativas de demanda de água, realizadas por estudos ligados ao planejamento de recursos hídricos e energia, não consideram mudanças nas condições climáticas, mas apenas cenários econômicos de desenvolvimento. Por esse motivo, neste trabalho será considerada uma projeção de referência (sem efeitos de mudanças climáticas) sobre a qual será aplicado um ajuste para representar as alterações no clima.

Para construção de uma projeção de referência foram utilizadas as estimativas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020), descritas no documento (Agência Nacional de Águas, 2019a) e cujos dados estão disponíveis no sítio eletrônico do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH) <<https://www.snirh.gov.br/>>. Trata-se das estimativas mais completas e atuais sobre os usos consuntivos em bacias brasileiras. Além disso, estudos anteriores da ANA já têm sido utilizados para construção e atualização das séries de vazões naturais das usinas hidrelétricas do SIN (Ministério de Minas e Energia, 2017).

Conforme (Agência Nacional de Águas, 2019a), os usos consuntivos foram separados de acordo com as principais finalidades de usos existentes no Brasil, que são o abastecimento humano (urbano e rural), o abastecimento animal, a indústria de transformação, a mineração, a termoelectricidade e a irrigação. Para cada uma dessas classes de uso foram feitas estimativas para o período de 1931 a 2017, com base em um extenso levantamento de dados históricos, além de uma projeção para o horizonte até 2030.

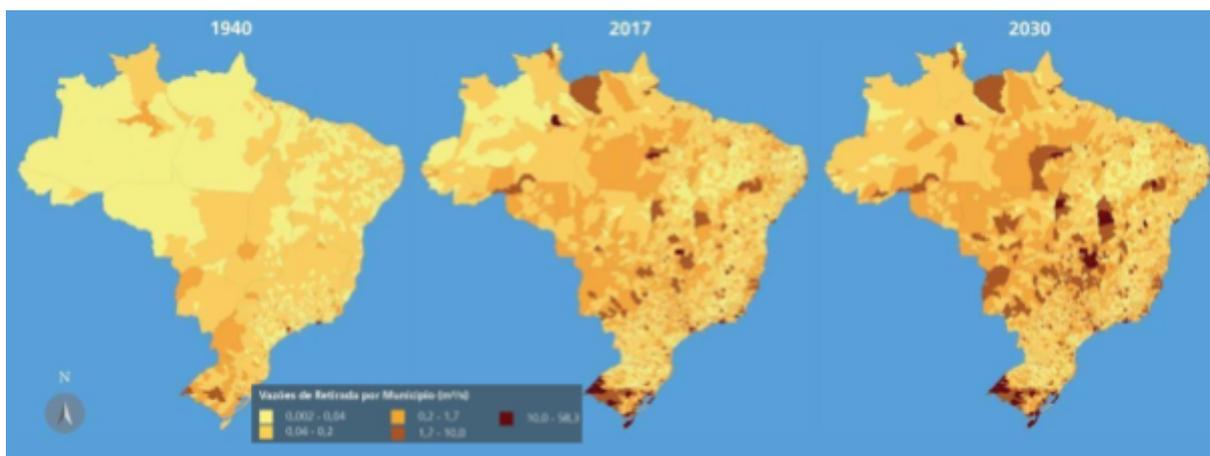
A Figura 6 apresenta a evolução das retiradas, separadas pelos principais usos, e a Figura 7 a distribuição espacial, por municípios do total de água retirada dos cursos d'água. Observa-se que a irrigação e o abastecimento humano urbano são os principais responsáveis pelas retiradas de água (Figura 6). Na Figura 7 se observam algumas regiões que concentram as maiores retiradas, como o sul do Estado do Rio Grande do Sul, e também que a região central do Brasil é onde se esperam os maiores crescimentos nas demandas, lideradas principalmente pela irrigação.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



Fonte: (Agência Nacional de Águas, 2019a)

Figura 6 – Estimativas de retiradas de água para usos consuntivos de acordo com a classe de uso, para o período de 1931 a 2030



Fonte: (Agência Nacional de Águas, 2019a)

Figura 7 – Distribuição municipal das estimativas de retiradas de água para usos consuntivos no Brasil

Os valores apresentados nas figuras acima correspondem aos montantes de água retirados dos corpos d'água. Parte desse montante retorna para os corpos hídricos, de forma que o valor efetivamente consumido é a vazão de retirada subtraída da vazão de retorno. Para construção das projeções foram usados os valores de vazão consumida disponibilizados pelo SNIRH em base municipal, para os anos de 1940, 1980, 2017 e a projeção para 2030.

Os mapas de vazão consumida foram recortados para a BHRP que até o ano de 1980 os maiores consumos na bacia se localizavam nas cabeceiras do rio Tietê, devido à região

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

metropolitana de São Paulo, onde os consumos se devem principalmente ao abastecimento humano e a indústria. Em 2017 registra-se um forte crescimento do consumo em grande parte da bacia, destacando-se a região norte nas cabeceiras do rio Paranaíba. Esse aumento é explicado em parte pelo crescimento populacional e industrial, mas se deve principalmente à expansão da agricultura irrigada ao longo das últimas décadas.

3 A MUDANÇA CLIMÁTICA E A VULNERABILIDADE DO SETOR ENERGÉTICO

A partir da análise dos vários modelos globais e regionais de projeção das variáveis climáticas, é possível traçar as mudanças prováveis e enumerar possíveis tendências no setor energético. Com as tendências climáticas, os planejadores e formuladores de políticas energéticas além de incluí-las no processo de construção de cenários devem testar alternativas para adaptação utilizando novas tecnologias de geração. É importante o desenvolvimento de sistemas energéticos mais robustos e menos vulneráveis, necessidade que já vem sendo observada nos últimos anos em função de uma sequência de anomalias negativas de precipitação no Brasil.

O capítulo anterior foi dedicado ao detalhamento das consequências das mudanças climáticas nas vazões das principais bacias do país. Como a geração de energia elétrica é altamente dependente destas vazões, afetadas não só pela chuva, mas também ao tipo de cobertura do solo e do uso consuntivo, foi apresentado com detalhes alguns resultados de trabalho recente realizado para o MME (GIZ MME, 2021).

A seguir apresentamos alguns conceitos sobre vulnerabilidade e resiliência para caracterizar que a mudança climática acaba sendo uma “ameaça” ao setor elétrico dimensionado sobre a premissa de que as variáveis climáticas apresentam um comportamento sazonal, porém estacionário, ou seja, o comportamento do clima não muda com o passar do tempo. As mudanças climáticas trazem uma dinâmica no comportamento destas variáveis o que representa uma “ameaça” ao sistema projetado sob as condições do histórico destas variáveis.

3.1 Conceito de Vulnerabilidade

Para melhor tratar o desafio que se enfrenta e que será enfrentado é necessário entender o que é um sistema vulnerável. No trabalho realizado pelo MME (Banco Mundial; Ministério de Minas e Energia, 2018), que versa sobre o efeito das mudanças climáticas nas

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

metodologias de planejamento de sistemas elétricos, foi definida a vulnerabilidade de um sistema como o “produto” da ameaça versus a fragilidade, ou seja:

$$Vulnerabilidade = Ameaça \otimes Fragilidade$$

Apesar de existirem distintas terminologias na literatura, o conceito principal não difere do expresso acima. O grau de vulnerabilidade de um sistema depende do tipo de ameaça a que ele pode estar sujeito, cuja probabilidade de ocorrência pode ser muito baixa.

Tais ameaças podem ser de várias naturezas como econômicas, ambientais, desastres naturais e/ou tecnológicos, insegurança alimentar ou humana (UNEP, 2002), crescente-se, por oportuno, as ameaças sanitárias. Confrontando-as com o grau de fragilidade do sistema, ou seja, com o seu grau de preparo em responder adequadamente a estas ameaças, pode-se dimensionar o seu grau de vulnerabilidade.

Por outro lado, a fragilidade do sistema é medida em função da sua capacidade de enfrentamento da possível ameaça, sendo, portanto, o inverso da resiliência. Um sistema é mais resiliente quanto mais estiver preparado para enfrentar uma ameaça. Reescrevendo a equação acima, tem-se:

$$Vulnerabilidade = \frac{1}{Ameaça \otimes Resiliência}$$

A palavra “resiliência” vem do latim, do verbo “resilir”, em que significa “rebater” ou “recuar”. Desde a década de 1970 este termo vem sendo utilizado no campo da Ecologia (Walker, B et ali, 2004) que posteriormente tornou-se popular em outros campos das ciências naturais e sociais. Conseqüentemente, foi seguido por áreas de pesquisas tecnológicas e das engenharias.

Existem várias definições de resiliência, dependendo da disciplina, campo de pesquisa ou setor da indústria. Resiliência representando a capacidade de um sistema de se recuperar de um evento extremo ganhou um significado mais amplo nos últimos anos. Na engenharia civil, o conceito é frequentemente usado em terremotos, estudos econômicos e sociais. Aplicam o conceito de resiliência para comunidades, mercados, aspectos sociopolíticos e também para ambientes naturais.

É importante observar que resiliência não é só resistência, mas também adaptabilidade, poder de transformação, ou mesmo capacidade de absorção. Atualmente tem se dado mais ênfase a sistemas com capacidade de adaptação para enfrentar eventos extremos do que propriamente dimensioná-lo para resistir à ameaça.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dependendo do tipo da ameaça e da sua frequência de ocorrência, é mais recomendável investir em processos operacionais de recomposição do sistema do que em estruturas físicas com custo elevado para resistir à ameaça. Um bom exemplo é a decisão de se investir em sistemas de para-raios em grandes plantas de geração solar concentradas em determinada área no enfrentamento da ameaça de raios — isto significa dispor de uma estrutura para resistir aos raios.

Outra opção é aparelhar a planta em termos de equipes e placas de reserva para troca imediata, quando ocorrer a queima de alguma parte da fazenda solar devido à incidência de alguma descarga atmosférica — neste caso o investimento passa a ser em logística para rapidamente recompor a capacidade de geração que for perdida, ou seja, prepara-se o sistema para responder rapidamente à perda parcial de geração, porém sem resistir ao evento.

A título de exemplo, reproduz-se, na Figura 8, o Quadro de Vulnerabilidade desenvolvido por (UNDP, 2014), onde se destacam questões como “quem é vulnerável, ao que e por quê?”. Observa-se, por exemplo, que os pobres são os mais vulneráveis, especialmente a choques econômicos e na saúde. A coluna “A quê?” refere-se à ameaça e a coluna “Por quê?” à fragilidade.

	Quem?	A quê?	Por quê?
Vulnerabilidade	Os pobres, os trabalhadores informais, os socialmente excluídos	Choques econômicos, choques na saúde.	Capacidades limitadas.
	Mulheres, pessoas com deficiência, migrantes, minorias, crianças, idosos, juventude	Desastres naturais, mudanças climáticas, riscos industriais	Localização, posição na sociedade, períodos sensíveis no ciclo de vida.
	Comunidades inteiras, regiões.	Conflito, agitação civil.	Baixa coesão social, deficiência na resposta de instituições, má gestão governamental.

Fonte: Traduzido de (UNDP, 2014)

Figura 8 – Quem é vulnerável, ao que e por quê?

Dessa forma, a avaliação da vulnerabilidade passa a ser um conceito central para se compreender os impactos das mudanças climáticas e dos desastres naturais no desenvolvimento de estratégias apropriadas de gerenciamento de riscos (Kaiser, 2007). Esta definição difere do conceito tradicional relacionado à confiabilidade do sistema, vigente no

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Setor Elétrico, que pode ser medida, por exemplo, através da métrica LOLE – *Loss of Load Expectation* ou Perda Esperada de Carga. Neste caso, utiliza-se um histórico de eventos dos componentes (como taxas de saída forçada), que são combinados para gerar os índices de confiabilidade. Estes índices não incorporam dinâmicas de fatores extremos, os quais acabam por não ser considerados nestas análises tradicionais.

A ameaça foi dimensionada através da projeção, para o período de 2050 a 2080, de um conjunto de variáveis climáticas e, como consequência, de vazões afluentes. A faixa utilizada foi proposta pelo MME pois o Plano Nacional de Energia (PNE) vigente tem seu horizonte em 2050.

A partir da análise das ameaças e as suas possibilidades de ocorrência, é necessário avaliar as ações que deverão ser planejadas para melhorar a resiliência dos sistemas de geração e de como a matriz energética e elétrica devem estar estruturadas para que os sistemas energéticos sejam mais resilientes. É importante observar que não existe um manual consagrado para o enfrentamento das ameaças climáticas, mas algumas diretrizes podem ser elaboradas para adequar e adaptar os sistemas energéticos.

- Antecedentes: desenvolvimento da metodologia para o dimensionamento das **ameaças climáticas** às quais estão sujeitas as usinas, com o consequente cálculo da(s) vulnerabilidades tanto do ponto de vista local (empreendimento propriamente dito) como sistêmico (energia global gerada pelo sistema);
- Estruturação do plano propriamente dito: com base na metodologia para dimensionamento das ameaças, estruturar um **plano de resiliência**.

3.2 Resiliência climática e ameaça climática

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, ou seja, o setor de óleo e gás não “conversava” com o setor elétrico 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, exigindo-se uma visão e planejamento sistêmicos.

A vulnerabilidade energética é pouco tratada na literatura e, na maioria das vezes, os conceitos e modelos estão em textos que focam a resiliência energética. Assim como em

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

outras áreas apresentadas, ficam claros os desafios de estabelecer definições que venham a sustentar métricas que possam subsidiar o planejamento e a formulação de políticas energéticas, tendo em vista a complexidade do tema e a interseção com outras áreas, conforme destaca (Kharrazi, et al., 2015), que apresenta uma revisão da literatura sobre o tema. Existe uma diferença entre se trabalhar com sistemas de engenharia e sistemas socioambientais. No primeiro caso, busca-se desenvolver, antes de tudo, sistemas resistentes que sejam capazes de suportar ameaças e com isso voltar ao funcionamento normal, passado o perigo. Esta resistência pode ser entendida como uma “resiliência primária”, que é a capacidade do sistema físico de suportar ameaças, independentemente de ações ou outros sistemas secundários que possam ser implementados para melhorar a resiliência. Essa definição de resiliência baseada em engenharia, no entanto, tem limitações. Especificamente, um sistema resiliente que está sujeito a um estresse pode continuar a sobreviver mudando para um estado alterado que está longe de suas condições normais. Nesse sentido, o conceito de resiliência também inclui o elemento de adaptabilidade. Aqui, o objetivo é a resiliência de uma função em que o sistema se adapta a mudanças no ambiente operacional. Nesse contexto, portanto, a resiliência vai além de retornar ao que é percebido como normal e inclui uma capacidade adaptativa de se reorganizar em diferentes configurações, mantendo a função. Em certos casos, a adaptação se torna mais profunda, caracterizando-se por fortes transformações para se adequar. Esses efeitos ocorrem claramente em sistemas sociais, econômicos e em ecossistemas. Em estudos ecológicos, isso se relaciona ao conceito de múltiplos atratores, onde um ecossistema pode mudar de uma configuração remanescente para outra, cada uma das quais mantém um equilíbrio ecológico distinto, como já visto neste trabalho. Um exemplo atual foi o advento da pandemia que obrigou o ser humano a mudar a sua forma de viver e produzir que utilizando tecnologia de conexão virtual conseguindo minimizar o impacto da ameaça.

Na resiliência de engenharia, o objetivo é desenvolver a capacidade de resistir a um estresse e retornar ao que é considerado um estado normal. A resiliência de engenharia pode ser facilmente entendida em sua aplicação à infraestrutura de transporte. Por exemplo, sob o estresse de uma forte nevasca, inundação, incêndio ou terremoto, infraestruturas como pontes, estradas e rodovias são projetadas para resistir a vários níveis de estresse e retornar ao estado normal de funcionamento. Nesta definição de resiliência, a ideia principal é restaurar as condições normais. Essa definição de resiliência baseada em engenharia, no entanto, tem limitações. Especificamente, um sistema resiliente que está sujeito a um estresse pode continuar a sobreviver mudando para um estado alterado que está longe de suas condições normais. Nesse sentido, o conceito de resiliência também inclui o elemento de

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

adaptabilidade. Aqui, o objetivo é a resiliência de uma função em que o sistema se adapta a mudanças no ambiente operacional.

Nesse contexto, portanto, a resiliência vai além de retornar ao que é percebido como normal e inclui uma capacidade adaptativa de se reorganizar em diferentes configurações, mantendo a função. Em estudos ecológicos, isso se relaciona ao conceito de múltiplos atratores, onde um ecossistema pode mudar de uma configuração remanescente para outra, cada uma das quais mantém um equilíbrio ecológico distinto. Ao mapear a capacidade de resiliência, ou seja, os vários atratores possíveis de um sistema, pode-se prever, com mais precisão, a quais configurações o sistema mudará após um choque ou estresse em seu sistema (Kharrazi, et al., 2015). Identificar os vários atratores de um sistema, no entanto, é uma tarefa desafiadora. Em primeiro lugar, os registros detalhados do comportamento do sistema podem estar indisponíveis. Em segundo lugar, um determinado sistema pode simplesmente ser complexo demais para identificar seus vários atratores. Em terceiro lugar, a magnitude e a natureza do estresse em um sistema podem ser imprevisíveis.

(Kharrazi, et al., 2015) destaca que diversidade é um conceito importante com aplicações em várias disciplinas. A diversidade permite que um sistema seja mais flexível em suas opções quando confrontado com uma interrupção. Para os ecologistas, a diversidade é vista como um componente essencial para garantir a flexibilidade e uma estratégia de sobrevivência a longo prazo para os ecossistemas naturais. Recentemente, a diversidade é reconhecida como igualmente importante para os sistemas socioeconômicos. Promover a diversidade nos sistemas de energia, tanto em termos de produção de energia quanto de tipos de consumo de energia, implica em aumentar a resiliência desses sistemas. Isso pode ser alcançado em termos de promoção da diversidade tecnológica, em que os fornecimentos tradicionais de energia (petróleo, gás natural, carvão, energia nuclear e hidroelétrica) são complementados com novas tecnologias de geração de energia, a maioria relacionada a fontes de energia renováveis. Esses novos tipos de tecnologias incluem tecnologias expansivas de energia solar, eólica, geotérmica, de biomassa e de energia oceânica para geração de energia. A medida da diversidade pode, assim, ser uma boa avaliação da resiliência.

(Groisman, et al., 2005) argumenta que a diversidade pode ser vista como abrangendo três propriedades, ou seja: variedade, equilíbrio e disparidade. A variedade refere-se a categorias disponíveis, como, no caso da geração de energia, fontes distintas de energia (carvão, gás natural, nuclear, eólica, etc.). O equilíbrio é em referência ao rateio de energia entre as categorias disponíveis, ou seja: quanto mais distribuída, maior a diversidade. A disparidade refere-se ao grau em que as próprias categorias podem ser diferenciadas umas das outras. Por exemplo, a solar-PV e a solar-térmica estão mais

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

relacionadas do que o vento

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

e o gás natural, por isso contribuem menos para a diversidade geral. O trabalho (Banco Mundial; Ministério de Minas e Energia, 2018) aplicou estes conceitos na busca por ações que venham aumentar os sistemas energéticos no Brasil devido ao efeito das mudanças climáticas.

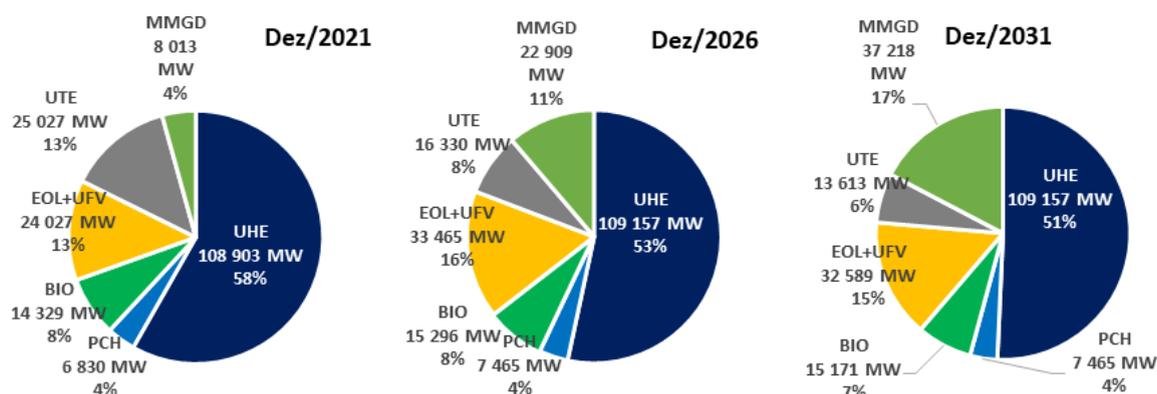
3.3 Sistema elétrico brasileiro

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de energia hidrelétrica, respondendo por 10% da produção mundial. De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a participação da hidroeletricidade gira em torno de 64% da matriz elétrica brasileira (Figura 9). Esse sistema é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazo para a produção de energia firme e, portanto, para garantia de atendimento do sistema, significando uma alta vulnerabilidade a alterações no regime hidrológico.

O planejamento e a operação do sistema, que já são atividades incertas devido à variabilidade climática natural, podem se tornar muito mais incertas devido às mudanças no clima. A localização geográfica, a integração do sistema de transmissão e as características individuais das usinas hidrelétricas estão diretamente relacionadas com a intensidade dos impactos que o sistema irá receber. A princípio, quanto maior a interconexão do sistema, melhor sua capacidade de contornar algum problema que venha a surgir a partir da compensação permitida pelas diferentes variações regionais, principalmente no caso de países de grandes extensões, como o Brasil. A opção do setor nos últimos anos de expandir a produção a partir de reservatórios a fio d'água, apesar de reduzir os impactos sobre o meio ambiente, pode adicionar vulnerabilidades em um possível cenário de períodos de extremos mais longos e severos, uma vez que essas usinas dependem exclusivamente do escoamento dos rios. Centrais hidrelétricas com reservatórios de regularização podem atenuar os efeitos das variações de vazões, influenciando não apenas a sua geração, mas também a de usinas a jusante. É importante mencionar que com a evolução tecnológica dos armazenamentos distribuídos, é possível encontrar soluções diferentes das tradicionais do setor como a expansão da rede de transmissão para aumentar a capacidade das interligações regionais.

Segundo dados do PDE 2031 (Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2022) apresentados na Figura 9, a matriz elétrica brasileira vem aumentando a participação de geração renovável intermitente não mudando a característica de matriz limpa, mas aumentando a intermitência e conseqüente vulnerabilidade do sistema.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



Fonte: PDE 2031 (Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2022)

Figura 9 – Evolução da matriz elétrica

O aumento da penetração de usinas renováveis acaba trazendo um desconforto para a operação do sistema por conta do baixo fator de capacidade² e da intermitência destas usinas. Desde o racionamento de 2001, houve uma corrida para uma maior expansão da rede de transmissão para evitar racionamento e apagões. Esta corrida foi intensificada com a entrada das usinas renováveis devido às características apontadas construindo um sistema de transmissão cada vez mais robusto (Figura 10). O problema é que esta expansão reflete diretamente na receita anual a ser destinada às empresas de transmissão e consequentemente na tarifa final para o consumidor. Recentemente, numa consulta pública da ANEEL para alterar a metodologia de cálculo da tarifa de transmissão (CP 39/21), foi demonstrado que o carregamento para 75% dos circuitos da rede de transmissão apresenta ociosidade de 70%.

² Fator de capacidade é a relação entre a capacidade máxima da usina e a energia média gerada. As usinas eólicas da região nordeste têm um fator de 40% enquanto as do sul de 28%. As usinas fotovoltaicas ficam em torno de 25%.

Evolução do SIN

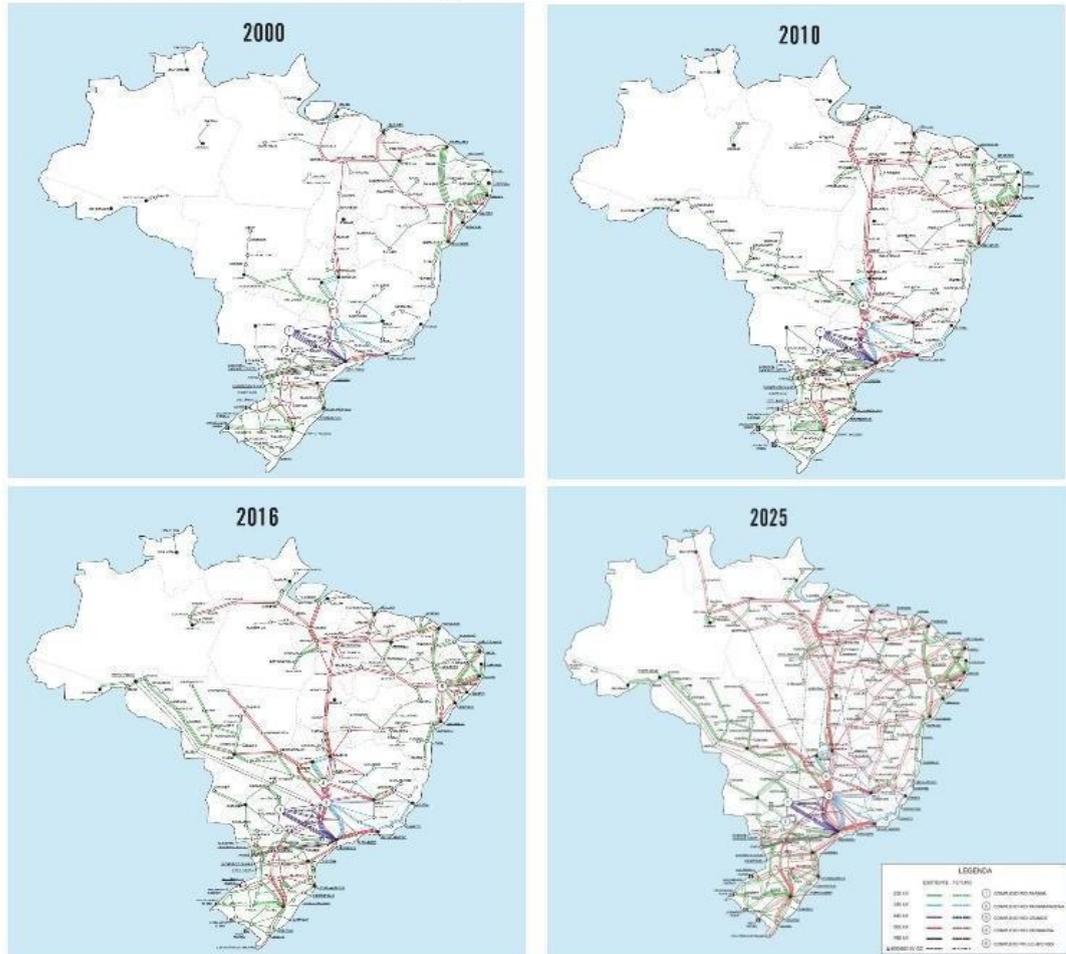


Figura 10 – Evolução do SIN Fonte: ONS

Ao analisar a combinação da matriz elétrica brasileira com o transporte de energia, vemos que sistemas mais “limpos” apresentam custos maiores devido ao CAPEX da rede de transmissão que contrapõem aos baixos custos operacionais quando comparados à opção por termelétricas. Neste aspecto, a descarbonização acabou forçando o desenvolvimento tecnológico para soluções renováveis que vem ganhando competitividade mesmo não considerando os benefícios que elas trazem ao meio ambiente, em especial, no que se refere à emissão de gases de efeito estufa.

Como a fonte primária das usinas renováveis normalmente não está disponível no local da demanda energética, há a necessidade de transporte através da rede de transmissão e distribuição. Um exemplo é a geração hidrelétrica na região norte e a geração eólica na região nordeste que boa parte atende à demanda das regiões sudeste e sul do país. Esta tendencia de utilizar fontes energéticas distantes tem sido minimizada em função da energia fotovoltaica

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

que está disponível em qualquer região. Apesar de ter uma intensidade da radiação diferente em cada região, ela já se tornou uma solução viável economicamente e com baixo impacto ambiental. A geração distribuída é o exemplo mais claro de uma geração que pode estar no ponto de consumo, ou seja, sem a necessidade de transporte. Vários países têm incentivado esta geração limpa junto ao consumidor sendo o principal exemplo a geração fotovoltaica instalada no próprio telhado de galpões ou residências. No caso da geração solar, encontramos também a usina centralizada que aparece como uma alternativa para regiões com alta incidência solar e baixo custo dos terrenos.

Pode-se concluir que os maiores potenciais para empreendimentos centralizados de energia eólica e solar se concentram na região nordeste e os empreendimentos hidrelétricos na região amazônica. Em função tanto da restrição ambiental para construção de grandes reservatórios para as hidrelétricas como a natural variabilidade do sol e do vento, o dimensionamento do sistema de transmissão para esta energia gerada acaba tendo um custo elevado para adequar ao fator de capacidade baixo.

A avaliação das correlações futuras entre as variáveis climáticas se torna importante para o dimensionamento de empreendimentos futuros como para a operação dos sistemas existentes. Como exemplo, a correlação negativa existente entre o vento e o sol na região nordeste têm provocado o aparecimento de usinas híbridas ou associadas para otimizar o uso da rede de transmissão. Como as mudanças climáticas apontam para uma intensificação nos ventos e na irradiação para a região nordeste, a solução através de usinas híbridas tende a continuar a ser interessante.

Um ponto adicional é que tecnologias de armazenamento como as baterias e hidrogênio verde podem se tornar grandes aliadas para otimizar o uso das energias renováveis inclusive também para o melhor dimensionamento da rede de transmissão. Neste aspecto é que se faz necessário a consideração em todos os estudos das mudanças climáticas para adaptar o sistema energético da melhor forma. Conforme é apresentado a seguir, quantificar as variáveis climáticas, suas correlações e seus efeitos nas usinas considerando passa a ser essencial.

3.4 Cenários de mudanças climáticas estudados para o setor elétrico

Como o efeito das mudanças climáticas é global, a diminuição da emissão de gases deve ser conjunta com contribuição em todos os países, isto é, a participação mais efetiva de um país não significa que este mesmo país seja beneficiado por uma ameaça climática em menor dimensão. Conforme apontado pelo IPCC, as mudanças climáticas estão já em curso alterando os padrões históricos das variáveis climáticas, ou seja, independente das

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

ações dos

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

vários países o clima já não é mais o mesmo em várias regiões do globo. O Brasil, que historicamente tem preferencialmente adotado como solução de geração de energia elétrica as usinas hidrelétricas, acaba sendo mais vulnerável ao clima principalmente na alteração da precipitação. Isto parece um contrassenso visto que o país que adota uma matriz mais renovável acaba sendo diretamente afetado pela própria mudança que se quer combater. Desta forma, é necessário quantificar a ameaça climática para que os governos tomem medidas que tornem o sistema energética menos vulnerável.

O Brasil vem trabalhando em quantificar as ameaças há duas décadas. No caso específico do setor elétrico, em 2008, a ANEEL solicitou a execução de um P&D estratégico para identificar os efeitos das mudanças na geração de energia elétrica (Lima, Colischonn, & Marengo, 2014). Neste trabalho finalizado em 2013, foi calculado, utilizando dados dos modelos climáticos do quarto relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2007b), o quanto em termos de energia assegurada o sistema de geração de energia perderia em função da diminuição das precipitações nas principais bacias do sistema interligado nacional. Naquela oportunidade, como a matriz elétrica brasileira era formada por quase 85% de origem hídrica, a projeção da precipitação foi a variável mais importante juntamente com os modelos de conversão de chuva em vazão. Este estudo foi um marco pois conseguiu prever todo o processo que hoje se vivencia, inclusive a crise hídrica a partir de 2014. A Figura 11 mostra o principal resultado para a energia assegurada. Tal figura mostra a perda média de energia total do SIN relativa ao bloco hidráulico existente em 2012 (PGE) e ao bloco hidráulico futuro (PGF) de acordo com o PNE 2030. Projeta-se uma diminuição da energia gerada que se agrava com o desenvolvimento das usinas no nordeste e norte que estavam previstas no PNE 2030. Esta visão de perda é devido à diminuição de chuva no norte e nordeste principalmente no período de 2040 a 2070. Na região sudeste há uma diminuição, mas não tão acentuada, enquanto na região sul há um aumento na precipitação.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

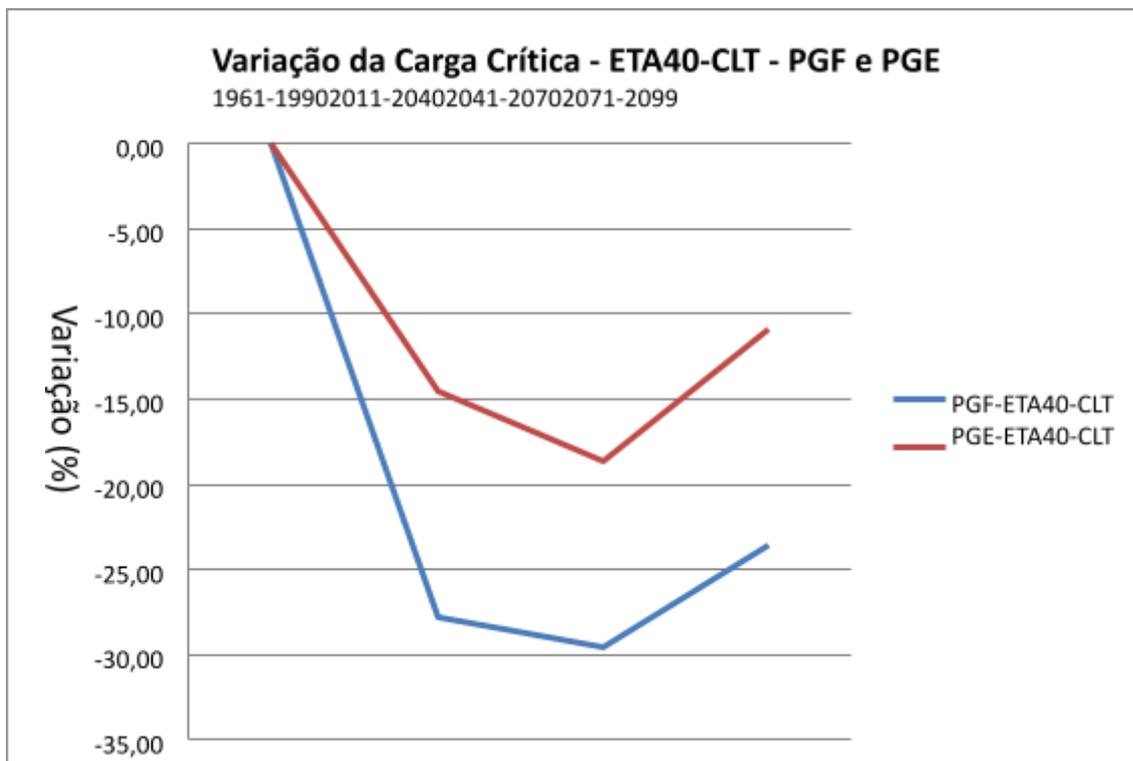


Figura 11 – Carga crítica ou energia assegurada que o parque gerador hidráulico existente (PGE) ou o parque gerador futuro (PGF) pode atender a um risco de 5% para cada janela de trinta anos considerando as mudanças climáticas previstas pelo membro controle para o Eta aninhado ao HadCM3 do CMIP4.

O resultado descrito foi apresentado em 2013, mas não houve a inclusão de um cenário de mudança climática no processo de planejamento do sistema energético sob a responsabilidade da EPE. Esta continuou utilizando o histórico de aflúncias que não incorporava esta ameaça. O estudo indicou que algumas regiões como o nordeste apresentariam uma diminuição no comportamento das vazões. O que não se vislumbrava é que este comportamento iria se acentuar nos anos que se seguiram provocando a maior crise hídrica do histórico de vazões observadas desde 1932. Um outro resultado do estudo é a sazonalidade mais intensificada, ou seja, períodos de seca mais longos e períodos de chuva mais concentrados conforme já mostrados no Produto I.

É importante esclarecer que se o planejamento da EPE não considera a dinâmica das mudanças, todo o planejamento do sistema de geração de energia fica vulnerável. É projetado para trabalhar com as séries históricas ou sintéticas fica comprometido pois se espera uma precipitação média que não irá ocorrer. necessitando de construir nova geração em curto espaço de tempo para evitar o racionamento.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Além da precipitação, outros resultados do estudo mostraram que haveria uma intensificação dos ventos na região nordeste, ou seja, o dimensionamento das eólicas deveria observar esta mudança. Após este estudo pioneiro para o setor de energia, outros se seguiram utilizando versões dos MCGs e dos MCRs mais atualizados com o CMIP5 (IPCC 2014) disponibilizados a partir de 2014. Em linhas gerais as tendências de diminuição de precipitação não mudaram, apenas alterações quantitativas entre os novos modelos principalmente na região sudeste onde o efeito da ZCAS é mais marcante.

Em 2018 foi feito um estudo para o MME onde se buscou desenvolver uma análise do processo de planejamento do setor energético e sugerir metodologias para incorporar as mudanças climáticas (Banco Mundial; Ministério de Minas e Energia, 2018). Foram quantificadas as ameaças climáticas para a bacia do São Francisco com MCR Eta aninhado aos modelos globais MIROC e HadGEM, do Japão e Inglaterra, respectivamente. Os dois modelos mostraram uma diminuição nas precipitações e vazões da bacia diminuindo a geração das usinas de Xingó e Paulo Afonso além de dificultar a regularização do despacho em função da intensificação da sazonalidade. O estudo apontou a necessidade de construir cenários de mudanças climáticas no planejamento tático e estratégico para buscar alternativas de adaptação tanto em novas tecnologias como até no uso das termelétricas para servir de back-up das usinas hidrelétricas. Outro ponto importante do estudo foi a necessidade de incluir nas análises os usos consuntivos e projeções de usos de solo principalmente para auxiliar na resposta hídrica dos modelos chuva-vazão. A mudança climática também afeta o uso da água e a forma como o solo é aproveitado nas diversas culturas e não pode ser descartado quando se discute a geração hidrelétrica futura. Como propostas, o estudo sugere o mapeamento das ameaças climáticas tanto no aspecto energético como no entendimento das vulnerabilidades das estruturas existentes do SIN. Com o dimensionamento das vulnerabilidades, o estudo sugere a construção de planos de resiliência nos segmentos de geração, transmissão e distribuição.

Mais recentemente, um estudo financiado pela GIZ (Deutsche Gesellschaft Fur Internationale Zusammenarbeit) junto ao MME foi realizado para avaliar o efeito das mudanças climáticas nas estruturas das usinas hidrelétricas brasileiras (GIZ MME, 2021). Este estudo avaliou a ameaça climática também utilizando os resultados do CMIP5, mas ampliando para mais dois MCGs além do MIROC5 E HadGEM2-ES, ou seja, BESM e CanESM2. Todos estes modelos foram regionalizados pelo Eta do INPE e utilizando como forçantes os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Além da precipitação, a temperatura foi utilizada para o diagnóstico dos efeitos nas estruturas. Foram feitas projeções climáticas para 2050 e 2080 para as principais regiões onde há um acúmulo de usinas hidrelétricas, mostrando:

- (a) decréscimo nos acumulados sazonais de precipitação projetados;

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

- (b) aumento da intensidade e frequência dos eventos extremos no futuro para a Região Sul do Brasil, nos trimestres de DJF³ e JJA⁴, e
- (c) aumento da intensidade dos eventos extremos ao norte da Região Nordeste; com maior sequência de dias secos comparada ao presente.

Em termos da temperatura do ar, registrou-se aumento das temperaturas mínimas, máximas e médias sazonais em todo o país. É esperada redução da frequência de noites e dias frios e aumento de noites e dias quentes. Em geral, as projeções descritas possuem sinal mais acentuado no cenário RCP8.5 e a maioria com significância estatística. Uma análise mais específica para a região da Bacia do Rio Paraná e seu impacto nas vazões afluentes aos reservatórios.

Neste estudo, os modelos apresentaram tendências de aumento da temperatura e diminuição das precipitações na região sudeste sendo o HadGem2-ES apresentou sérios aumentos de temperatura chegando a mais de 50° C em boa parte do verão a partir de 2050. Este modelo foi até considerado um desvio extremo e não considerado para a análise do efeito nas estruturas.

No aspecto energético, o estudo verificou que a capacidade de produção energética das usinas da Bacia do Paraná variou entre uma redução mínima de 1,3% para o modelo Miroc na forçante 4.5, para uma redução máxima de 58,1% observada com o modelo CasESM para a forçante 8.5, o que representa uma tendência esperada de redução da energia nessa bacia. Para complementar as conclusões sobre os resultados obtidos nesta análise, verificou uma redução de 41,3% para o modelo CanESM na forçante 4.5 e de 5,3 % no modelo Miroc na forçante 8.5. Destaque-se que as avaliações de impacto foram feitas em relação à Energia Firme de 19.225 MWmed que foi calculada para o período de 1961 a 2005 com o histórico realizado de vazões. Saliente-se ainda a coerência dos resultados obtidos, onde o maior impacto foi para o modelo que apresenta resultados mais drásticos na forçante RCP 8.5 - climáticos esperados são mais severos; o menor impacto foi para a forçante RCP 4.5, onde os impactos climáticos esperados são menores para o cenário que se mostra menos drástico quanto aos efeitos das mudanças climáticas para esta região.

³ Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF)

⁴ Junho, Julho e Agosto (JJA)

4 PRINCIPAIS AÇÕES

Pesquisas utilizando séries de dados históricos e projeções climáticas revelam sinais muito mais claros das mudanças climáticas induzidas pelo homem com destaque para as mudanças nos extremos de tempo e clima (IPCC, 2021). Extremos mais frequentes, prolongados e intensos já estão sendo identificados em todas as regiões do mundo. Projeta-se que muitas regiões experimentarão um aumento na probabilidade de eventos simultâneos. Por exemplo, ondas de calor e secas simultâneas tendem a se tornar mais frequentes, e isso aumenta o risco de crises hídricas e incêndios florestais, afetando a segurança hídrica, alimentar, energética e social (como a saúde humana). Além dos impactos decorrentes desses eventos, há intensificação das desigualdades internas e externas dos países mais afetados.

No que se refere à energia, para adaptar a estes eventos extremos é necessário buscar sistemas de *back-up* inclusive com armazenamentos distribuídos evitando períodos prolongados de falta de energia.

Num cenário com aquecimento global maior de 1.5-2.0 °C, como o caso da forçante RPC8.5, a ação humana cria riscos maiores e mais perigosos, empurrando o planeta para os limites existenciais e ecossistêmicos (os chamados *tip points*; por exemplo, o degelo da Antártica é algo irreversível). As atividades humanas associadas ao desmatamento e aumento na emissão de gases de efeito estufa podem levar a níveis de aquecimento maiores de 2 °C a meados do século 21.

No recente relatório AR6 do IPCC bem como nos resultados apresentados aqui nesse relatório indica-se que as regiões como a Bacia do Paraná-Prata podem, no futuro, experimentar maiores volumes de chuva na forma de eventos extremos, que são concentrados em poucos dias e, em geral, separados por longos períodos secos. Ademais, os extremos de chuva podem deflagrar desastres hidro-geo-meteorológicos em áreas vulneráveis e expostas afetando drasticamente a população. No caso de estruturas das usinas hidrelétricas é possível ocorrer galgamentos principalmente em usinas menores.

Na Amazônia do leste, Pantanal e Nordeste a possibilidade de períodos de estiagem mais longos e secas podem afetar a segurança hídrica, energética e alimentar e elevar o risco de incêndios. Na Amazônia do norte os excessos projetados de chuva podem gerar inundações mais intensas, como a ocorrida em junho de 2021 do Rio Negro em Manaus, que chegou a 30.09 m, o maior valor em 103 anos de registro. As mudanças nos extremos tendem a ser maiores se o aquecimento global ultrapassar os 2 °C.

Através de uma análise de multi-modelo regionais (Eta, RegCM e REMO) participantes do projeto CORDEX-CORE para a América do Sul, sumarizam as mudanças

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

projetadas

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

precipitação no período 2080-2099 descrita por seis índices climáticos utilizados pelo (IPCC, 2021) baseadas no RCP8.5 e para o período mais úmido da maior parte da América do Sul (dezembro-janeiro-fevereiro) (Figura 12). O sinal de mudança mais consistente está localizado onde mais de um índice climático indica mudanças, e ocorre em uma grande área da Amazônia e norte da América do Sul, e na bacia do Prata. De acordo com a Figura 12, grande parte do centro sul da Amazônia apresentará menores volumes de precipitação, redução no número de dias em períodos úmidos consecutivos e redução dos eventos extremos de chuva diária acima do percentil 95. Condições mais úmidas são projetadas para as regiões centro- oeste, sudeste e sul; sendo que na região sul, incluindo a área da bacia do Prata, as projeções indicam aumento dos eventos extremos de chuva diária e redução no número de dias secos consecutivos.

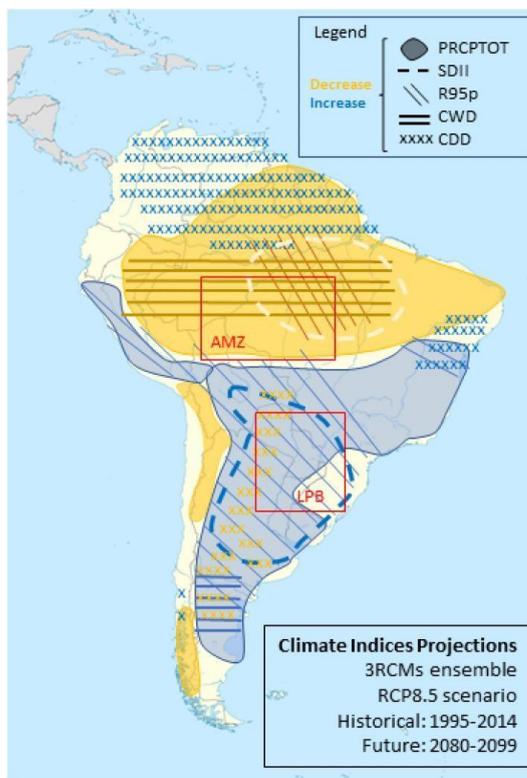


Figura 12 – Representação esquemática das mudanças projetadas para os índices climáticos de precipitação baseado no conjunto 3 RCMs sob RCP8.5 no final do século (2080-2099). As caixas vermelhas indicam a localização dos subdomínios nas bacias do Amazonas e do Prata (Reboita et al .,2022).

A partir do reconhecimento das vulnerabilidades, é necessário passar para as ações para minimizar os impactos das mudanças climáticas. Neste sentido, a diminuição das precipitações da região norte, nordeste apresentada pelo modelo ETA não se recomenda a implementação de novas centrais hidrelétricas principalmente se forem usinas a fio d'água,

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

visto que não conseguem regularizar as vazões minimizando o poder de amenizar a intensificação da sazonalidade. Isso é o caso do complexo de usinas no Rio Tapajós que está sendo previsto para depois de 2030 pela MME, devendo ser reavaliado a luz dos modelos apresentados.

No que se refere às outras usinas renováveis como a eólica e solar, os modelos mostram um incremento nos ventos e na radiação para a região nordeste o que indica que o nordeste deve ser um grande exportador de energia renovável. Este aumento deve ser acompanhado de perto pelos investidores destas usinas para dimensionamento ótimo das capacidades a serem instaladas.

Nas regiões sudeste e centro-oeste, deve-se buscar cada vez mais uma melhor análise das variáveis hidroclimáticas. Os modelos do CMIP6 disponibilizados em 2021 ainda estão passando por um processo de regionalização dinâmica para que se possa disponibilizar resultados mais precisos. A partir desses resultados será possível avaliar se as tendências dos modelos do CMIP3 e CMIP5 em cada bacia do SIN se mantiveram. No entanto, é necessário rever a operação atual das bacias destas regiões para manter os níveis de volume útil em torno de 70% dependendo das características de cada usina. Estas providências estão em linha com a necessidade cada vez mais premente quanto aos demais usos da água. As usinas hidrelétricas da região sul não possuem reservatórios suficientes para a regularização e com o aumento das chuvas deve ocorrer vertimentos mais frequentes.

Um outro ponto importante é que o controle do balanço carga e geração que deve se deteriorar devido:

- diminuição da participação das usinas hidrelétricas na matriz que tinham através dos seus reservatórios uma forma importante de armazenamento natural de energia,
- aumento da penetração de usinas eólicas e solares que não são despacháveis e que sofrem com as incertezas e variabilidade das variáveis climáticas provocando grandes oscilações na produção de energia no curto e longo prazo
- à necessidade das interligações com maior frequência para estabilizar oscilações de geração entre regiões

Com as mudanças climáticas, a dificuldade das previsões das variáveis relacionadas ao clima aumenta e conseqüentemente o risco de déficit de energia. Existe uma necessidade de se ter uma maior reserva de potência para o curto prazo e um maior armazenamento de energia para enfrentar estações com menores precipitações e com aumento de temperatura que ocasiona maior consumo de energia. Uma alternativa adicional

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

para enfrentar a ameaça

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

climática, seria dispor de tecnologias de armazenamento como baterias, hidrogênio verde, usinas hidrelétricas reversíveis, etc., pois conforme mostrado neste trabalho haverá um maior “stress” climático e o sistema energético deve estar preparado.

Um outro movimento que se vive hoje é da descentralização do setor elétrico através da geração distribuída e do empoderamento do consumidor que passa a dispor de tecnologias de informação para controle do seu consumo. Sistemas distribuídos tendem a ser mais resilientes a eventos extremos visto que dispõem localmente de seus próprios recursos para recomposição. A busca de soluções locais pode minimizar os efeitos dos eventos extremos como por exemplo instalação de baterias em residências junto com geração fotovoltaica.

Com referência à ação do governo nos últimos anos, em especial na área de energia, entende-se que caso os indicativos quanto à mudança climática fossem devidamente apurados e incorporados nos modelos de planejamento como cenários para a tomada de decisão.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas. (2019a). *Manual de usos consuntivos de água no Brasil*. Agência Nacional de Águas, ANA, Brasília.
- Assad, E. D., Oliveira, A. F., Nakai, A. M., Pavão, E., Pellegrino, G., & Monteiro, J. (2016). Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira às mudanças climáticas. Em Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, *Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil* (pp. 127-). Brasília.
- Banco Mundial; Ministério de Minas e Energia. (2018). *Projeto META TDR no. 66, Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos*. Acesso em 24 de julho de 2020, disponível em www.mme.gov.br: <http://www.mme.gov.br/documents/36144/472561/Produto+6.pdf>
- Bayer, D. M. (2014). *Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre.
- Bayer, D. M., & Collischonn, W. (2013). Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 165-179.
- Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3-23.
- Collischonn, W. (2001). *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre.
- Collischonn, W., & Tucci, C. E. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(1), 95-118.
- Collischonn, W., Buarque, D. C., & Mendes, C. A. (2015). MGB-IPH: I Curso Básico - Descrição teórica do MGB e estrutura geral do MGB-IPH. *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Brasília.
- Felix, V. S., & Da Paz, A. R. (2016). Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido com modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(3), 556-569.
- Fundação Getúlio Vargas. (2013). *Diagnóstico preliminar das principais informações sobre projeções climáticas e socioeconômicas, impactos e vulnerabilidades disponíveis em*

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

trabalhos e projetos dos atores mapeados. Ministério do Meio Ambiente (MMA), São Paulo.

GIZ MME. (2021). *Estudo Climático: Análise da Vulnerabilidade de Usinas Hidrelétricas aos Impactos das Mudanças Climáticas*. MRTS.

Groisman, P., Knight, R., Easterling, D., Karl, T., Hegerl, G., & Razuvaev, V. (2005). Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. *Journal of Climate - J CLIMATE*, 18, 1326- 1350. doi:10.1175/JCLI3339.1

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Home>População>Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação*. Acesso em 10 de Outubro de 2020, disponível em www.ibge.gov.br: <https://www.ibge.gov.br/apps//populacao/projecao/>

IPCC. (2007b). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. (2021). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis:s. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896

Kaiser, G. (2007). Coastal vulnerability to climate change and natural hazards. *8th Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in Climate Change*. Karlsruhe: Karlsruhe University.

Kharrazi, A., Sato, M., Yarime, M., Nakayama, H., Yu, Y., & Kraines, S. (2015). Examining the resilience of national energy systems: Measurements of diversity in production-based and consumption-based electricity in the globalization of trade networks. *Energy Policy*, 87, 455-464. doi:10.1016/j.enpol.2015.09.019

Lima, J. W., Colischonn, W., & Marengo, J. A. (2014). *Efeito das mudanças climáticas na geração de energia elétrica* (1 ed.). São Paulo: Hunter Books.

Ministério de Minas e Energia. (2017). *Revisão ordinária de Garantia Física de energia das usinas hidrelétricas - UHEs despachadas centralizadamente no Sistema Interligado Nacional - SIN*. Ministério de Minas e Energia, MME, Brasília.

Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. (2022). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*. Brasília: MME/EPE.

Neto, A. R., da Paz, A. R., Marengo, J. A., & Chou, S. C. (2016). Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. *Journal of Water Resource and*

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Protection, 8, 1103-1127.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

- Santos, D., Pedra, G., Silva, M., Guimarães Junior, C., Alves, L., Sampaio, G., & Marengo, J. (2020). Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5°C, 2°C and 4°C. *Sustentabilidade em Debate*, 11, 57-90. doi:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933.
- Silveira, C. d., Filho, F. d., Junior, F. d., Junior, L. M., & Cabral, S. L. (2018). Mudanças climáticas e o setor hidroelétrico brasileiro: uma análise com base em modelos do IPCC-AR5. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, 47, 46-60.
- Trimble, S. W., Weirich, F. H., & Hoag, B. L. (1987). Reforestation and reduction of water yield on the Southern Piedmont since circa 1940. *Water Resources Research*, 23(3), 425- 437.
- UNDP. (2014). *Human Development Report 2014. Sustaining Human Progress: Reducing Vulnerabilities and Building Resilience*. United Nations Development Programme, New York, NY.
- UNEP. (2002). *Assessing Human Vulnerability to Environmental Change: Concepts, Issues, Methods and Case Studies*. . UNEP/DEWA/RS.03-5, Nairobi.
- Viola, M. R., Mello, C. R., Chou, S. C., Yanagi, S. N., & Gomes, J. L. (2014). Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 35, 1054-1068.
- Zanin, M., Tessarolo, G., Machado, N., & Albernaz, A. L. (2016). Mudanças climáticas e a cobertura vegetal nativa: impactos em um país megadiverso e seus biomas. Em Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, *Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil* (pp. 93-125). Brasília.