

# Impactos climáticos na segurança energética no Brasil: análise de eventos observados e opções de adaptação

*Climate impacts in the Brazilian energy security: analysis of observed events and adaptation options*

Eveline Vasquez-Arroyo<sup>a</sup>

Fábio da Silva<sup>b</sup>

Alberto Santos<sup>c</sup>

Deborah Cordeiro<sup>d</sup>

José Antônio Marengo<sup>e</sup>

André F. P. Lucena<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
End. Eletrônico: eveline@ppe.ufrj.br

<sup>b</sup> Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
End. Eletrônico: fabioteixeira@ppe.ufrj.br

<sup>c</sup> Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
End. Eletrônico: albertojlsantos@ppe.ufrj.br

<sup>d</sup> Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
End. Eletrônico: deborahcordeiro@ppe.ufrj.br

<sup>e</sup> Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, São José dos Campos, SP, Brasil  
End. Eletrônico: jose.marengo@cemaden.gov.br

<sup>f</sup> Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
End. Eletrônico: andreLucena@ppe.ufrj.br

doi:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33838

Received: 31/08/2020  
Accepted: 07/12/2020

*Os dados e os resultados apresentados nesta publicação foram desenvolvidos no âmbito do projeto “Quarta Comunicação Nacional e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção do Clima”, coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, com apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, por meio dos recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente, aos quais oferecemos nossos agradecimentos.*

## RESUMO

As mudanças climáticas poderão aumentar a ocorrência e intensidade de eventos climáticos extremos, que podem afetar os sistemas de energia. Assim, este estudo objetiva identificar impactos de eventos meteorológicos que tiveram influência sobre o sistema energético brasileiro, por uma análise de relatos recentes. São levantados e avaliados casos de impactos em hidrelétricas, sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, produção de culturas bioenergéticas e demanda de energia elétrica do setor residencial. Por último, analisam-se os desafios do planejamento energético diante das mudanças climáticas e propõem-se medidas de adaptação, apontando suas possíveis repercussões na segurança hídrica, alimentar, socioambiental e climática.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas. Impacto. Adaptação. Segurança energética. Brasil.

## ABSTRACT

*Climate change is expected to increase the frequency and intensity of extreme weather events, which can affect energy systems. Thus, this study aims to evaluate impacts of meteorological events on the Brazilian energy system, through an analysis of recent reports. Cases of impacts on hydropower, power transmission and distribution, bioenergy crops and residential cooling demand in recent years are assessed. Finally, the challenges of energy planning in the face of climate change are analyzed and adaptation measures for the energy system are proposed, pointing out possible repercussions on water, food, socio-environmental and climate security.*

**Keywords:** Climate change. Impact. Adaptation. Energy security. Brazil.

## 1 INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas trazem uma extensa lista de impactos ambientais e socioeconômicos em áreas díspares com biodiversidade, zonas costeiras, abastecimento de água, agricultura, segurança alimentar, saúde, energia, etc., podendo afetar a população e a sustentabilidade do planeta (ALBERTO, 2006; LELIS et al., 2011; MARENGO, 2004).

A disponibilidade de fontes primárias, a conversão, o transporte e o uso final de energia podem ter uma relação direta ou indireta com as variáveis climáticas. Contudo, mudanças na temperatura, precipitação e velocidade do vento estão sendo associadas à acumulação de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (IPCC, 2014). Essas mudanças podem gerar benefícios no setor energético em certas regiões e recursos, mas deterioração em outros.

A energia hidrelétrica é responsável, atualmente, por cerca de 11% da energia primária e 67% da geração elétrica brasileira (EPE, 2019). Essa tecnologia é impactada pela falta de chuvas que diminui a vazão afluyente das usinas a fio d'água e dos reservatórios, induzindo assim a uma redução do seu volume útil e, conseqüentemente, da energia armazenada (SCHAEFFER et al., 2010). Eventos extremos, como secas, tornam vulnerável a segurança dessa tecnologia. Vários estudos no Brasil indicam impactos, principalmente no Norte e Nordeste (ARIAS et al., 2020; LUCENA et al., 2009).

Schaeffer et al. (2015) concluem que o alto risco de déficit no suprimento de hidroelectricidade sugere a necessidade de investimentos massivos em nova capacidade de geração elétrica por outras fontes. Os impactos de estiagens em hidrelétricas não são restritos apenas ao Brasil. Na Califórnia (EUA), estima-se que a geração hidrelétrica entre 2012 e 2015 tenha reduzido sua participação em uma média de 18% para 7% (GLEICK, 2016). A transmissão e a distribuição de energia elétrica apresentam um risco alto a esses eventos. Além disso, a vulnerabilidade da transmissão de energia aumenta em infraestruturas de grande porte, como é caso do Sistema Interligado Nacional (SIN) no Brasil.

A energia eólica depende do regime, intensidade e direção dos ventos. Rajadas de vento podem impactar a operação e o design das turbinas eólicas (IPCC, 2011). Estudos no Brasil indicam que o potencial eólico não seria impactado significativamente (JONG et al., 2019; LUCENA et al., 2010; PEREIRA et al., 2013). Projeções de clima mostraram um aumento do potencial eólico ao longo do tempo, especialmente nas regiões Nordeste e Sul.

Em outros países, no entanto, o recurso eólico poderia ser impactado, como no noroeste dos Estados Unidos, onde o potencial poderia ser reduzido em até 40% (SAILOR et al., 2008), e no Sul da Europa com uma redução de 10% do potencial eólico (TOBIN et al., 2015). Já a energia solar fotovoltaica depende principalmente da radiação solar, velocidade do vento na superfície e da temperatura ambiente. Maior recurso solar tende a aumentar a geração, enquanto maiores temperaturas levam a uma menor eficiência do painel (GARCÍA; BALENZATEGUI, 2004; SIMIONI; SCHAEFFER, 2019; SINGH; RAVINDRA, 2012).

Estudos sugerem que o potencial fotovoltaico no Brasil não seria afetado consideravelmente no futuro devido às projeções de aumento simultâneo de radiação solar e temperatura em grande parte do País (SANTOS, 2020). Na Europa, projeta-se um aumento modesto do potencial na região do Mediterrâneo e uma queda desse potencial entre 10% e 12% na Escandinávia (JEREZ et al., 2015).

No setor de biocombustíveis, os principais impactos de mudanças climáticas estão associados à oferta do recurso primário, ou seja, das culturas bioenergéticas (SCHAEFFER et al., 2012). No caso brasileiro, os principais biocombustíveis são o etanol e o biodiesel. Para o etanol, praticamente a totalidade da produção provém da cana-de-açúcar (UNICA, 2020). A produção de biodiesel, por sua vez, possui uma cesta de fontes oleaginosas mais diversificada no País, porém, a mais relevante é o óleo de soja, que foi responsável por cerca de 68% da produção do biocombustível no País em 2019 (ANP, 2020). Assim, alterações no clima que afetem o zoneamento agroecológico dessas culturas têm o potencial de impactar o setor de biocombustíveis do Brasil.

Os impactos das mudanças climáticas não se limitam à oferta, podendo também afetar a demanda. Os aumentos da temperatura e umidade podem levar a mudanças no padrão de consumo, elevando a demanda por resfriamento pela busca do conforto térmico (CLARKE et al., 2018; INVIDIATA; GHISI, 2016; SCHAEFFER et al., 2012). Isso é mais significativo no setor de edificações, podendo atingir valores ainda maiores com o aumento da renda e da posse de condicionadores de ar. Na Austrália, Hatvani-Kovacs (2016) identificou uma correlação entre os picos de demanda de energia e o aumento da temperatura diária registrada devido às ondas de calor, tendo um aumento médio na demanda de eletricidade de 6,35% por aumento de 1° na temperatura máxima diária. Phoenix e Washington DC apresentaram um aumento de demanda de 3,6% para cada grau de aumento de temperatura (FRANCO, 2008).

Neste estudo, são apresentados os impactos de eventos meteorológicos extremos observados recentemente – tais como secas, chuvas intensas e ondas de calor –, que poderão ocorrer com maior frequência, e seus efeitos no sistema energético brasileiro. O estudo também discute como poderiam reduzir os impactos por meio de desafios de adaptação. As opções de adaptação são avaliadas de maneira integrada com aspectos externos que também influenciam a segurança energética do País, como aspectos socioeconômicos, políticos e ambientais.

## 2 METODOLOGIA

Primeiramente, identificam-se casos de eventos meteorológicos extremos observados nos últimos 20 anos no Brasil. Relatos de secas hidrológicas, ciclones e ondas de calor são levantados na literatura científica e em publicações de literatura cinzenta.

Em seguida, de acordo com o tipo de evento observado e sua localização, coletam-se dados sobre o comportamento da produção ou demanda de energia no mesmo intervalo de tempo. Para isso, são utilizadas bases de dados públicas de instituições oficiais brasileiras, como ONS, EPE, CEEE, entre outras. São avaliados impactos na geração hidrelétrica, na transmissão e distribuição de eletricidade, no setor de biocombustíveis e na demanda residencial por resfriamento.

Finalmente, os eventos climáticos e seus impactos observados no sistema energético são correlacionados em tabelas, divididas pelos segmentos impactados do setor de energia. As amostras são classificadas por região, período e tipo de evento, com uma descrição qualitativa de seu impacto verificado.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 IMPACTOS OBSERVADOS NA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Em 2014 aconteceu uma seca hidrológica na Região Sudeste que impactou a cabeceira da Região Hidrográfica do São Francisco e, por consequência, os usuários a jusante, localizados na Região Nordeste.

O reservatório de Três Marias, destinado ao aproveitamento hidrelétrico, está localizado na Região Sudeste. Atualmente possui uma potência instalada de 396 MW, com seis unidades geradoras e um volume de armazenamento de 19.528 hm<sup>3</sup> (CEMIG, 2019). Três Marias é a cabeceira de um conjunto de usinas em cascata que alimenta outras usinas localizadas a jusante com reservatório, como Sobradinho e Itaparica, e a fio d'água, como Moxotó, Paulo Afonso e Xingó (Figura 1). Assim, sua operação é fundamental para a regulação do Rio São Francisco, principalmente no trecho entre o reservatório e a usina hidrelétrica de Sobradinho, na Bahia.

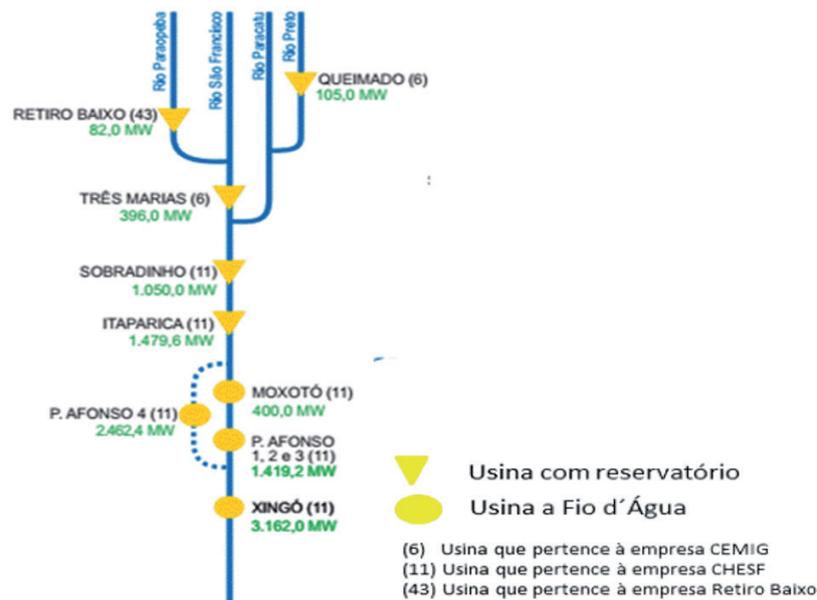


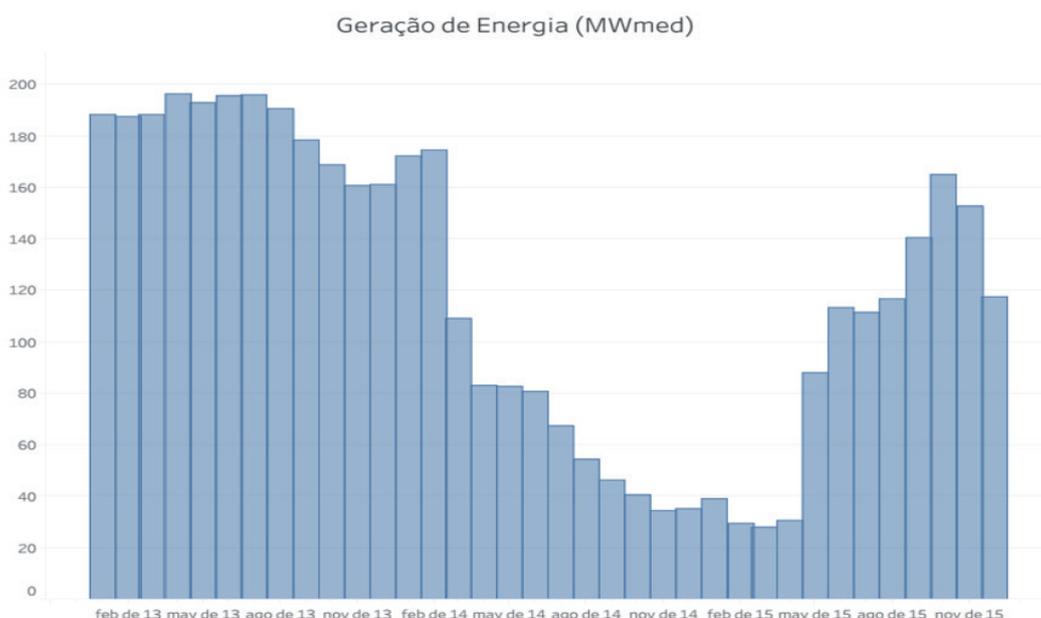
Figura 1 | Diagrama Esquemático das Usinas Hidroelétricas do SIN na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

Fonte: ONS, 2018

Uma análise dos últimos 19 anos mostra que a usina encontrou dificuldade operativa por ter o volume útil com baixa capacidade de armazenamento em alguns períodos, chegando a ter uma média anual inferior a 30%, especialmente nos anos 2001, 2014, 2015, 2016 e 2017 (ANA, 2019). A partir de 2011, a bacia do Rio São Francisco registrou anomalias negativas de precipitação, com uma redução de 40% das chuvas em 2012 (MARTINS; FRANCISCO JÚNIOR, 2017). O norte e centro-leste da Região Nordeste registraram uma queda entre 20% e 40% da precipitação anual nos anos de 2014 e 2015 (MARTINS; FRANCISCO JÚNIOR, 2017).

Essas condições levaram à diminuição do nível dos reservatórios na bacia do Rio São Francisco no período entre 2012 e 2017. O período mais crítico foi verificado entre os meses de setembro de 2014 e fevereiro de 2015, quando o volume útil ficou abaixo dos 10% da sua capacidade, atingindo 2,9% em novembro de 2014 (ANA, 2019). Ao longo dos anos seguintes, o reservatório não conseguiu se recuperar completamente, sendo que em 2017 o volume útil atingiu 6% (ANA, 2019). Durante as secas enfrentadas na Região Sudeste, o reservatório garantiu a outorga para as demandas de abastecimento humano e dessedentação animal, que, por força de lei, são prioridade no uso de água (BRASIL, 1997).

Isso fez a usina acionar apenas duas turbinas das seis instaladas. Três Marias reduziu sua geração de 188 MWmed em março de 2013 a 28 MWmed em março de 2015 (menor geração no intervalo de tempo analisado). Assim, essa redução de geração deve ter uma relação direta com a redução do volume útil do reservatório.



**Figura 2 |** Geração média (MWmed) da Usina Hidrelétrica de Três Marias entre os anos de 2013 e 2015.

Fonte: ONS, 2020.

As usinas hidrelétricas localizadas a jusante foram impactadas pela seca no Sudeste (2014) e estiagens no Nordeste (2013 a 2017), conforme mostra a Figura 3. Sobradinho registrou uma queda gradual da geração média. Em 2014, a usina teve o volume útil em 60% e chegou até 20% em dezembro de 2015 (ONS, 2020). Em 2017, condições de seca predominaram e o reservatório atingiu um valor máximo próximo a 15%. O valor mínimo de geração de Sobradinho caiu 105 MWmed em novembro de 2017, de 356 MWmed registrados em 2013 (ONS, 2020).

O reservatório de Itaparica registrou uma queda do seu volume útil (40%) a partir de 2013, e com o impacto de Três Marias chegou a 14% (ANA, 2020; ONS, 2020). Com a continuação da estiagem no Nordeste, o volume útil do reservatório chegou a 9% em novembro de 2015 (ANA, 2020). Em 2017,

o volume útil voltou a cair rapidamente, atingindo 7% em janeiro (ANA, 2020). Adicionalmente, o complexo de usinas de Paulo Afonso e Xingó, localizado na sequência, observou uma leve redução da geração média a partir de 2014. De certa maneira, os impactos sofridos pelas usinas diminuem conforme mais distantes estão da usina de Três Marias.

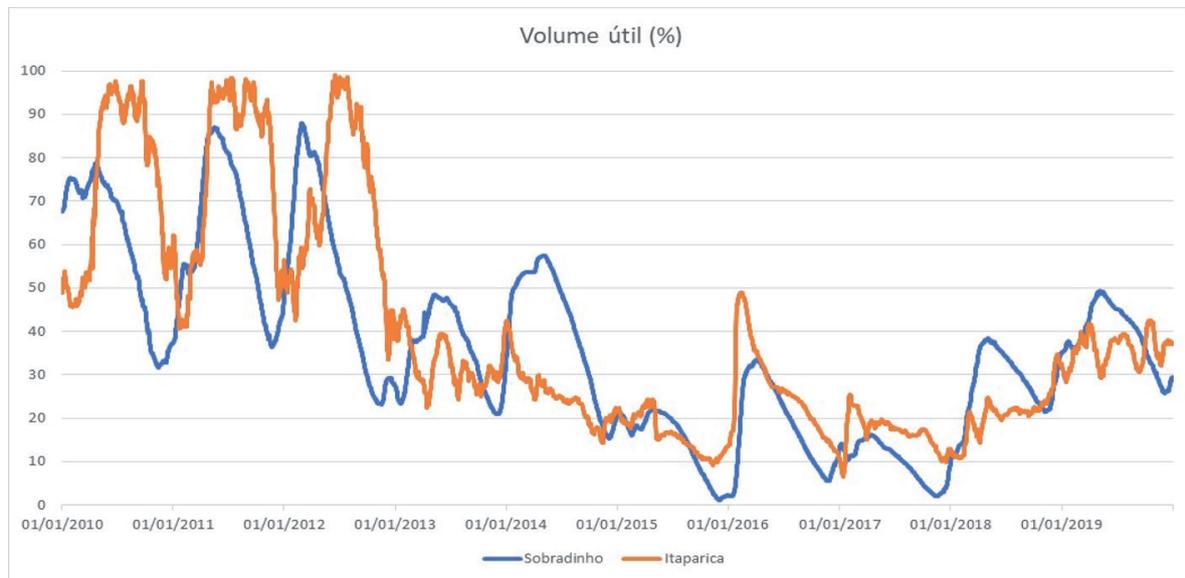


Figura 3 | Volume útil de Sobradinho e Itaparica entre 2010 e 2020.

Fonte: Elaboração própria, com base em ANA (2020).

A seguir, a Tabela 1 mostra um resumo dos impactos observados na geração hidrelétrica em outros locais, identificados entre 2012 e 2020.

Tabela 1 | Identificação de impactos observados por eventos extremos na oferta hidrelétrica entre 2012 e 2020

Ano	Região	Tipo de Impacto climático	Descrição do evento	Referência
2012 - 2017	Região Nordeste (Semiárido)	Seca	Redução de energia natural afluyente (ENA) e do volume de reservatórios de hidrelétricas e portanto, da energia armazenada do Subsistema Nordeste. Os reservatórios da bacia do rio São Francisco foram muito afetados pela estiagem, como Três Marias e Sobradinho. Em Três Marias, o volume útil chegou a 2,6% em 2014, 7% em 2015 e 6% em 2017. Em Sobradinho, volume útil atingiu mínimos de 1% em 2015, 6% em 2016 e 2% em 2017. Em Itaparica, os valores mínimos de volume útil foram de 14% em 2014, 9% em 2015 e 7% em 2017. A energia armazenada no subsistema Nordeste começou a decair a partir de 2013, atingindo um valor mínimo de 4% em novembro de 2015 e em novembro de 2017.	CUNHA et al., 2019a CUNHA et al., 2019b CEMADEN, 2016 MARTINS & MAGALHÃES, 2015 MARENGO et al., 2018 ONS, 2020
verão 2013-2014 2014-2015	Região Sudeste (São Paulo e Minas Gerais)	Seca	Redução do volume de reservatórios de hidrelétricas, que resultou em quedas de energia natural afluyente e de energia armazenada no Subsistema Sudeste/Centro-Oeste. O subsistema Sudeste registrou um percentual mínimo de 15% de energia armazenada em novembro de 2014, muito inferior aos 42% registrados em novembro de 2013.	CUNHA et al., 2019b MARENGO et al., 2015 NOBRE et al., 2016 ONS, 2020

Ano	Região	Tipo de Impacto climático	Descrição do evento	Referência
2015/2016	Região Norte (Amazônia)	Seca	Redução do nível de reservatórios de hidrelétricas e consequente diminuição de energia natural afluyente e energia armazenada no Subsistema Norte. A energia armazenada também caiu consideravelmente entre 2015 e 2016. Após superar 90% em 2014, o EAR máximo caiu para 81% em 2015 e para 65% em 2016.	CUNHA et al., 2019b WANDERLEY et al., 2018 ONS, 2020
2019-2020	Região Sul (Paraná e Rio Grande do Sul)	Seca	Queda do volume de reservatórios de hidrelétricas no subsistema Sul e diminuição da energia natural afluyente e da energia armazenada nos reservatórios presentes no subsistema Sul em decorrência de estiagem nos estados do Sul entre 2019 e 2020. O volume de energia armazenado (EAR) no subsistema Sul registrou o menor valor em pelo menos 20 anos, atingindo o percentual de 14% em abril de 2020, valor muito inferior aos 28% registrados em abril de 2000, que era o menor valor neste período.	CEMADEN, 2020 ONS, 2020

Fonte: Elaboração própria

### 3.2 REDES DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A transmissão de eletricidade é uma operação fundamental para o sistema elétrico brasileiro. As linhas de transmissão possuem como papel principal o de interconectar as bacias hidrográficas, otimizando o aproveitamento dos recursos hídricos de todo o País (SIN). As redes e linhas de distribuição de eletricidade do SIN suportam cerca de 96% de toda a capacidade de produção de energia elétrica do País ao conectar as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da Região Norte (ANEEL, 2005). As linhas de transmissão e distribuição de eletricidade são vulneráveis especialmente a eventos de chuvas intensas acompanhadas de ventos fortes (ANEEL, 2018). Eventos como ciclones extratropicais também provocam chuvas intensas e ventos, e já afetaram o sistema de transmissão e distribuição no Sul do Brasil nos últimos anos, como o ciclone Catarina em 2004 e o ciclone bomba em 2020.

Os danos à infraestrutura do sistema de distribuição e transmissão elétrica afetam diretamente a Segurança Energética por meio da interrupção do transporte de eletricidade aos consumidores. Em junho de 2020, um ciclone interrompeu o fornecimento de energia elétrica em 1,5 milhão de unidades consumidoras e provocou um prejuízo superior a R\$ 60 milhões no sistema de geração e distribuição de energia elétrica de Santa Catarina (CELESC, 2020).

Outro aspecto importante é o custo gerado para o reparo das redes danificadas, que pode ser repassado aos consumidores. Esse foi o caso da Celesc, em que a Aneel concedeu um aumento na tarifa de 0.45% relacionado aos prejuízos decorrentes da reconstrução de redes destruídas pelo ciclone Catarina (ANEEL, 2004). A Eletrosul (2014) indica que a empresa incluiu nas apólices de seguros de seus ativos operacionais de geração e transmissão a cobertura para sinistros decorrentes de vendaval, ciclone, furacão, granizo, inundação, alagamento, terremoto e incêndio.

A seguir, a Tabela 2 mostra um resumo dos impactos observados na transmissão e distribuição de energia elétrica, identificados entre 2004 e 2020.

**Tabela 2 |** Identificação de impactos observados por eventos extremos no transporte de energia elétrica: transmissão e distribuição, entre 2004 e 2020.

Ano	Região	Tipo de Impacto climático	Descrição do evento	Referência
2004	Santa Catarina	Ciclone Catarina	Os fortes ventos derrubaram cerca de mil postes em Santa Catarina e destruíram pelo menos 250 transformadores, deixando municípios sem energia elétrica, como Araranguá, Criciúma, Passo de Torres, Maracajá e Sombrio.	PEZZA, SIMMONDS, & FILHO, 2008
2008	Santa Catarina	Chuvas extremas	Perdas e danos somaram R\$ 74 milhões (R\$ 2009), principalmente por necessidade de reparação em linhas de transmissão, postes e torres, e por danos a gasodutos.	WORLD BANK, 2012B
2010	Pernambuco	Chuvas extremas	Perdas e danos somaram quase R\$ 13 milhões (R\$ 2010). 589 postes, 8.500 medidores, 41 transformadores, 183 refletores e 132 quilômetros de cabo foram substituídos.	WORLD BANK, 2012 <sup>a</sup>
2011	Região Serrana do Rio de Janeiro	Chuvas extremas	Estimou-se um prejuízo superior a 35 milhões de reais (2011) por danos e perdas na infraestrutura de fornecimento de energia elétrica. 75 mil pessoas ficaram sem luz após o evento.	WORLD BANK, 2012C
2012	Rio Grande do Sul	Vento forte/ Chuvas intensas	Cerca de 530 mil unidades consumidoras ficaram sem energia elétrica no Rio Grande do Sul após temporal em dezembro de 2012.	CEEE, 2012
2015	Santa Catarina	Tornado	Danos ao sistema de transmissão de energia elétrica. No estado, 11 torres de transmissão de energia foram afetadas. Este foi o maior acidente da Celesc em 60 anos.	CÂMARA DOS DEPUTADOS DO BRASIL, 2017
2016	Rio Grande do Sul	Ventos fortes/ Chuvas intensas	Temporal deixou cerca de 450 mil unidades consumidoras da concessionária CEEE sem luz em Porto Alegre. 2 subestações ficaram fora de operação e 125 alimentadores sem energia.	CEEE, 2016
2020	Região Sul	Ventos fortes/ Chuvas intensas/ Ciclone extratropical	No estado de Santa Catarina, cerca de 1,5 milhão de unidades consumidoras ficaram sem acesso à energia elétrica após a passagem do ciclone bomba. Estima-se um prejuízo de 63 milhões no sistema de geração e distribuição de energia elétrica do estado. A Celesc, maior concessionária de energia elétrica em Santa Catarina, informou que o dano provocado à rede elétrica do estado foi o maior da história. No Rio Grande do Sul, a distribuidora CEEE reportou que 750 mil clientes ficaram sem energia elétrica após o ciclone.	INMET, 2020 CELESC, 2020 DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, 2020

Fonte: Elaboração própria

### 3.3 DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA DO SETOR RESIDENCIAL (EDIFICAÇÕES)

Considerando a demanda por eletricidade, o setor de edificações (residencial e serviços) participa com 42%, seguido pelo setor industrial com 32%, setor energético com 5%, agropecuário com 5% e transportes com 0,4% (EPE, 2019). Aumentos de temperatura forçam um aumento na demanda de energia elétrica por maior uso de ar-condicionado. O condicionamento térmico de ambientes, que surge como uma medida adaptativa às mudanças climáticas para manter populações em temperaturas confortáveis, é também um obstáculo para a descarbonização do sistema energético. O aumento no uso de aparelhos para resfriamento de ambientes influencia diretamente na demanda de pico (SIVAK, 2009).

Ondas de calor foram registradas em 2019. O Rio de Janeiro evidenciou temperatura 5°C acima da máxima média climatológica (1961 - 1990), que durou 22 dias no mês de Janeiro (EPE, 2019a). A média

máxima mensal foi de 37,4°C, 7,3°C acima da máxima média normal (1961-1990) de 30,1°C, superando o recorde anterior de maior média máxima, registrada para o mês em 2014 (INMET, 2019a).

A cidade de São Paulo registrou 14 dias de temperaturas máximas acima da normal climatológica (1961-1990). A estação do Inmet do Mirante de Santana registrou o recorde em 35,1°C no dia 30 de janeiro, mais de 7°C acima da média histórica desse mês (1961-1990). Sob essa onda de calor, o consumo residencial de energia elétrica teve um aumento de 8,0% no setor residencial (Figura 4) com ênfase para a Região Sudeste que cresceu 8,3% comparado a janeiro de 2018. O estado do Rio de Janeiro teve aumento próximo a 8%, e em São Paulo o consumo residencial cresceu 7,3%, considerando a taxa ajustada ao ciclo de faturamento (EPE, 2019a).



Figura 4 | Aumento do consumo residencial em GWh.

Fonte: EPE, 2019a

No mês de setembro, uma onda de calor atingiu parte das regiões Sudeste e Centro-Oeste. A temperatura se manteve 5°C acima da média histórica (1961 a 1990) para o mês, por período maior do que cinco dias (INMET, 2019c). Em Cuiabá (MT) as temperaturas máximas se mantiveram acima da média histórica para o mês por 17 dias (INMET, 2019b). O consumo de energia elétrica na Região Centro-Oeste nesse mês foi de 1.113 GWh, um aumento de 13,4% comparado ao mesmo período do ano anterior, com destaque para os estados de Mato Grosso e de Mato Grosso do Sul com desvio positivo de consumo de 18,5% e 28,9%, respectivamente, o que indica um impacto das temperaturas mais elevadas na região (EPE, 2019b). A Tabela 3 apresenta impactos de ondas de calor na demanda de energia elétrica do setor residencial brasileiro entre 2010 e 2019.

Tabela 3 | Identificação de impactos observados por ondas de calor na demanda elétrica residencial entre 2010 e 2019

Ano	Região	Tipo de Impacto climático	Descrição do evento	Referência
2010	Sudeste	Onda de Calor	O Rio de Janeiro manteve temperaturas elevadas por oito dias consecutivos em fevereiro, tendo um desvio de 11,8°C da média histórica para o mês de 1961 a 1990. A região Sudeste apresentou neste mês um aumento de 9,7% comparado ao mesmo período do ano anterior.	GEIRINHAS et al., 2019 INMET, 2010 EPE, 2010

2014	Sul/ Sudeste	Onda de Calor	Em fevereiro, as regiões Sul e Sudeste apresentaram desvios de temperatura positiva superiores aos 5°C comparados a média histórica de 1961 - 1990 para o mês. Todos os estados na região Sul e Sudeste observaram um consumo de energia elétrica expressivo no mês de fevereiro, com crescimento de 12,2% no Sudeste e 26,5% no Sul.	CEInfo, 2014 INMET, 2014a EPE, 2014
2014	Centro-Sul	Onda de Calor	A região Centro Sul registrou temperaturas máximas entre 5 a 10°C acima da máxima normal climatológica de 1961 a 1990, caracterizando o evento de onda de calor no período de 13 a 17 de outubro. Neste mês o consumo das residências foi de 11 mil GWh, 5,2% maior que o mesmo período de 2013, evidenciando a região centro-oeste com um aumento de consumo de 13,4%.	INMET,2014b EPE, 2014b
2015	Norte/ Sudeste/ Centro Oeste	Onda de Calor	Na região Centro Oeste, a cidade de Cuiabá (MT) registrou um período de 8 dias consecutivos de temperaturas seis graus acima da média histórica do mês. Brasília (DF) registrou uma Onda de Calor com temperaturas até 9°C superiores à máxima média do mês (1961 à 1990). No Sudeste foram observadas temperaturas elevadas, especialmente em Minas Gerais onde a temperatura máxima média variou em até 6°C acima da média climatológica (1961-1990) por aproximadamente 15 dias. No Rio de Janeiro, mediu-se temperaturas com desvio da média climatológica (1961-1990) acima dos 5°C por 11 dias em outubro.	INMET, 2015 EPE, 2015a EPE, 2015b
2019	Sudeste	Onda de Calor	Em janeiro, no Rio de Janeiro houveram 22 dias com temperatura 5°C acima da média climatológica de 1961 à 1990. A cidade de São Paulo registrou 14 dias de temperaturas máximas acima da média histórica. O consumo residencial no Sudeste cresceu 8,3% comparado a janeiro de 2018.	INMET, 2019 EPE, 2019b
2019	Centro-Oeste	Onda de Calor	No mês de setembro, um evento extremo de temperatura atingiu a região Centro-Oeste. De acordo com esse alerta de onda de calor emitido pelo INPE/CPTEC, a temperatura se manteve 5°C acima da média histórica (1961 -1990) para o mês, por um período maior do que cinco dias. O consumo de energia elétrica na região Centro-Oeste nesse mês foi de 1.113 GWh um aumento de 13,4% comparado ao ano anterior.	INMET, 2019b EPE, 2019c INMET, 2019c

Fonte: Elaboração própria.

### 3.4 CULTURAS BIOENERGÉTICAS

A seca que assolou a Região Sudeste no ano de 2014 resultou em grande impacto na produtividade de canaviais, sobretudo no estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil (NOBRE et al., 2016). Relataram-se quedas de 7,3% na produtividade média da Região Centro-Sul na safra 2014/2015 em relação ao observado na safra anterior, alcançando o patamar de 11% no estado de São Paulo (CONAB, 2017). Tal queda de produtividade na principal região produtora do País representou uma menor produção no período para o Brasil, que somou um montante de aproximadamente 634 milhões de toneladas de cana-de-açúcar moída na safra 2014/2015, 2,7% a menos que na safra anterior, não obstante o aumento de 12% na produção da região produtora Norte-Nordeste na safra, que alcançou uma moagem de cerca de 61 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (UNICA, 2020).

O contexto de estiagem na Região Centro-Sul na safra 2014/2015, apesar de ter impactado profundamente a produção dos canaviais, acabou por favorecer uma maior concentração de açúcares totais recuperáveis (ATR) nos colmos das plantas, em razão das condições propícias à fase de maturação.

O teor médio registrado na safra para o Centro-Sul foi de 136,58 kg de ATR/tonelada de cana, um aumento de 2,45% em relação à safra anterior (UNICA, 2015).

Em relação ao etanol, apesar da queda absoluta na produção de açúcares totais recuperáveis (ATR) registrada em relação à safra anterior de 1,97%, a Região Centro-Sul registrou uma maior produção total do combustível, atingindo 26.146 m<sup>3</sup> na safra 2014/2015 contra 25.575 m<sup>3</sup> na anterior. Para tanto, a produção de açúcar foi reduzida em 6,73% em relação à safra anterior, chegando a um total de 31.987 mil toneladas (UNICA, 2015).

A safra de 2015/2016 da soja foi marcada por uma seca em áreas das regiões Norte e Nordeste do País, sobretudo no Matopiba, acrônimo para a região de produção agrícola compreendida pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. A falta de chuvas em novembro, período mais adequado ao plantio na região, forçou os produtores a adiarem a semeadura. Ademais, as altas temperaturas e períodos de estiagem verificados ao longo do desenvolvimento da lavoura impactaram fortemente sua produtividade. As médias obtidas na safra variaram entre 2,1 t/ha até 1,1 t/ha nos estados da região, representando reduções de 37% até 62% em relação à máxima produtividade média já observada até então nos respectivos estados, próxima a 3,2 t/ha (HIRAKURI, 2016).

Essa queda de produtividade verificada na região do Matopiba levou a uma redução na produção total de soja no Brasil na safra 2015/2016, mesmo com o aumento observado na produção nas regiões Sul e Sudeste. A produção no Brasil na safra 2015/2016 foi de 95,4 milhões de toneladas de soja contra 96,2 milhões de toneladas no exercício anterior (CONAB, 2020).

Em relação à produção de biodiesel, foi registrada uma queda de 3,5% no ano de 2016 em relação a 2015, tendo a produção sido reduzida em todas as regiões geográficas, com exceção do Sul. O óleo de soja manteve-se como principal matéria-prima para a produção do combustível, representando 79,1% do total (ANP, 2017). Cabe ressaltar, contudo, que é difícil afirmar que há uma correlação direta entre um estresse climático para a produção de soja no Matopiba e o suprimento de biodiesel no Brasil por alguns aspectos.

Primeiramente, a maior parte da produção de soja é destinada à exportação na forma de grãos, sendo uma parcela consideravelmente inferior levada ao esmagamento para a produção de óleo e farelo (CONAB, 2020). Ademais, a capacidade de produção de biodiesel concentra-se nas regiões Sul e Centro-Oeste, sendo em 2016 a capacidade de produção combinada das regiões Norte e Nordeste inferior a 10% do total do País (ANP, 2017).

Um fator relevante a ser considerado é que a demanda por biodiesel depende essencialmente da demanda por diesel na economia e do percentual mínimo obrigatório de biodiesel no diesel, que atualmente é de 12%, com a previsão de chegar a 15% em 2023 com aumentos de 1% ao ano (BRASIL, 2018). Assim, a esperada elevação do teor mínimo mandatário e o aumento da atividade econômica podem futuramente aumentar os impactos de quebras de safra de soja na cadeia do biodiesel. A Tabela 4 apresenta impactos de eventos climáticos em culturas bioenergéticas brasileiras entre 2011 e 2020.

**Tabela 4 |** Identificação de impactos observados por eventos extremos na cultura de soja e cana-de-açúcar entre 2011 e 2020

<i>Cultura</i>	<i>Safra</i>	<i>Região</i>	<i>Tipo de Impacto climático</i>	<i>Descrição</i>	<i>Referência</i>
Soja	2011/2012	Sul (RS)	Seca	A seca prolongada na parte sul da América do Sul prejudicou o desenvolvimento dos plantios de soja do estado do Rio Grande do Sul naquele ano. O valor médio de produtividade do cultivo foi de 1,55 t/ha, representando uma queda de 45% em relação à safra anterior.	EMATER/RS-Ascar, 2012; HIRAKURI, 2016 Portal Agronotícias, 2020
Soja	2015/2016	MATOPIBA*	Seca, Temperaturas médias elevadas	As condições climáticas para o cultivo da soja na safra 2015/2016 foram adversas para o Brasil, de forma geral, tendo resultado em uma redução da produtividade média da cultura no país de 4,3% em relação ao ano anterior, quebrando uma tendência histórica de aumento. A região produtora do MATOPIBA sofreu os maiores impactos, devido a uma estiagem na época do plantio, que atrasou a semeadura, seguida de um período de seca e altas temperaturas. Os estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Paraná também apresentaram quedas de produtividade nessa safra em relação ao ano anterior.	HIRAKURI, 2016 CONAB, 2020
Soja	2019/2020	Sul (RS)	Seca	A seca ocorrida ao longo do ciclo de cultivo da soja no Rio Grande do Sul resultou em uma quebra de safra histórica para a cultura no estado. A produtividade média da soja no estado foi de 1,79 t/ha, representando uma queda de aproximadamente 46% no valor estimado ao início do cultivo. Nas últimas seis safras, a produtividade variou entre 2,60 e 3,36 t/ha.	EMATER/RS-Ascar, 2020 CONAB, 2020
Cana-de-açúcar	2014/2015	Centro-Sul	Seca	A forte seca que provocou um período de intensa restrição hídrica no Sudeste do Brasil, sobretudo no estado de São Paulo, impactou severamente a safra 2014/2015 na região produtora do Centro-Sul, que teve sua produtividade agrícola reduzida em 7,3% em relação à safra anterior. Esta redução chegou a atingir 11% em média no estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do país.	CONAB, 2017
Cana-de-açúcar	2018/2019	Centro-Sul (São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná)	Seca	A estiagem verificada entre fevereiro e julho de 2018 em algumas áreas dos estados da região produtora do Centro-Sul, que apresentou índice de pluviosidade 34% inferior à média histórica, impactou a produção de cana-de-açúcar na safra 2018/2019. A safra no Centro-Sul registrou moagem 4% menor que a safra anterior da região.	GOMES, 2018 UNICA, 2020

<i>Cultura</i>	<i>Safra</i>	<i>Região</i>	<i>Tipo de Impacto climático</i>	<i>Descrição</i>	<i>Referência</i>
Cana-de-açúcar	2019/2020	Centro-Sul (PR, MS e sul de SP)	Geada	Uma geada ocorrida no início de julho de 2019 na região produtora do Centro-Sul impactou uma área equivalente a 400 mil hectares de canaviais, da qual cerca de 65% ainda não havia sido colhida. Estima-se que o impacto deste evento climático tenha reduzido a produtividade do cultivo em até 5 t/ha.	SAMORA, 2019

Fonte: Elaboração própria

## 4 DISCUSSÃO

Os impactos observados no sistema energético em decorrência de fatores climáticos atestam a importância de medidas de adaptação para garantir uma maior segurança energética no Brasil. O planejamento energético é realizado para identificar as necessidades futuras de energia, visando ao atendimento de uma demanda projetada. Considerar os impactos e vulnerabilidades relacionados ao clima no processo de planejamento energético fortalece a resiliência e a capacidade de adaptação do sistema energético. Ainda, faz-se necessário que o planejamento energético futuro considere medidas de mitigação dos GEE para, com isso, definir estratégias de adaptação que sejam sustentáveis no tempo.

O compromisso assumido pelo País para 2030 em sua Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC (MCTIC, 2019), no âmbito do Acordo de Paris de 2015, busca assegurar 45% de fontes renováveis na matriz energética primária, expandir participação de fontes renováveis não hidráulicas para um patamar entre 28% e 33% e aumentar a participação de biocombustíveis para 18%. Adicionalmente, a EPE (2018) indica a possibilidade de alcançar 10% de ganhos de eficiência no setor elétrico. Dessa forma, o grande desafio do setor energético está em cumprir a NDC brasileira considerando as mudanças do clima e seu impacto nas energias renováveis. Além disso, o esperado aumento da demanda elétrica no setor residencial, dada a necessidade de resfriamento para conforto térmico, faz com que o aumento da eficiência energética seja mais desafiador.

Os Planos apoiam a tomada de decisões em projeções da expansão energética, fornecendo diversas informações sobre estudos de mercado, de setores da cadeia energética, indicadores de desempenho do sistema, requisitos para investimentos, entre outros (EPE, 2017a). Além disso, eles também servem de base para licitação de contratação de energia nova, que acontece por meio de leilões.

Para tanto, cabe a realização de estudos de cenários climáticos futuros, cujos resultados sejam considerados em instrumentos de planejamento do setor energético (como o PDE e o PNE), no que tange à expansão da oferta, demanda e transporte de energia e outros aspectos. A realização de estudos de cenários climáticos e sua incorporação nos leilões de energia podem ser considerados de baixo custo quando comparados com os impactos da mudança do clima na produção de energia e nas infraestruturas. O estudo de cenários climáticos futuros no sistema energético pode ser realizado a médio prazo.

Assim, faz-se muito relevante uma análise de opções de adaptação do setor energético. Essas opções, contudo, devem considerar também o impacto na segurança hídrica, alimentar, socioambiental e climática.

O Brasil possui o SIN com um grau de diversidade da matriz elétrica que possibilita a compensação dos impactos climáticos na geração. Essa compensação dota o sistema elétrico de uma capacidade intrínseca de adaptação, a assim chamada Capacidade Adaptativa (BRASIL, 2016b). No entanto, deve-se considerar a possível variação nos custos da geração, emissões de GEE, bem como na demanda elétrica, variáveis estas que estão relacionadas à segurança energética. A análise realizada nas seções

anteriores indica a vulnerabilidade da disponibilidade do recurso hídrico para geração hidroelétrica, principalmente na Região Nordeste. Ademais, estudos mostram a possibilidade do aumento do potencial eólico e solar no Brasil. Contudo, a alta participação da geração hidrelétrica faz com que o impacto seja mais significativo no SIN. Como resposta, a capacidade adaptativa do SIN pode aumentar a participação de usinas termoelétricas a combustíveis fósseis ou biomassa para atendimento da demanda de eletricidade (LUCENA et al., 2018).

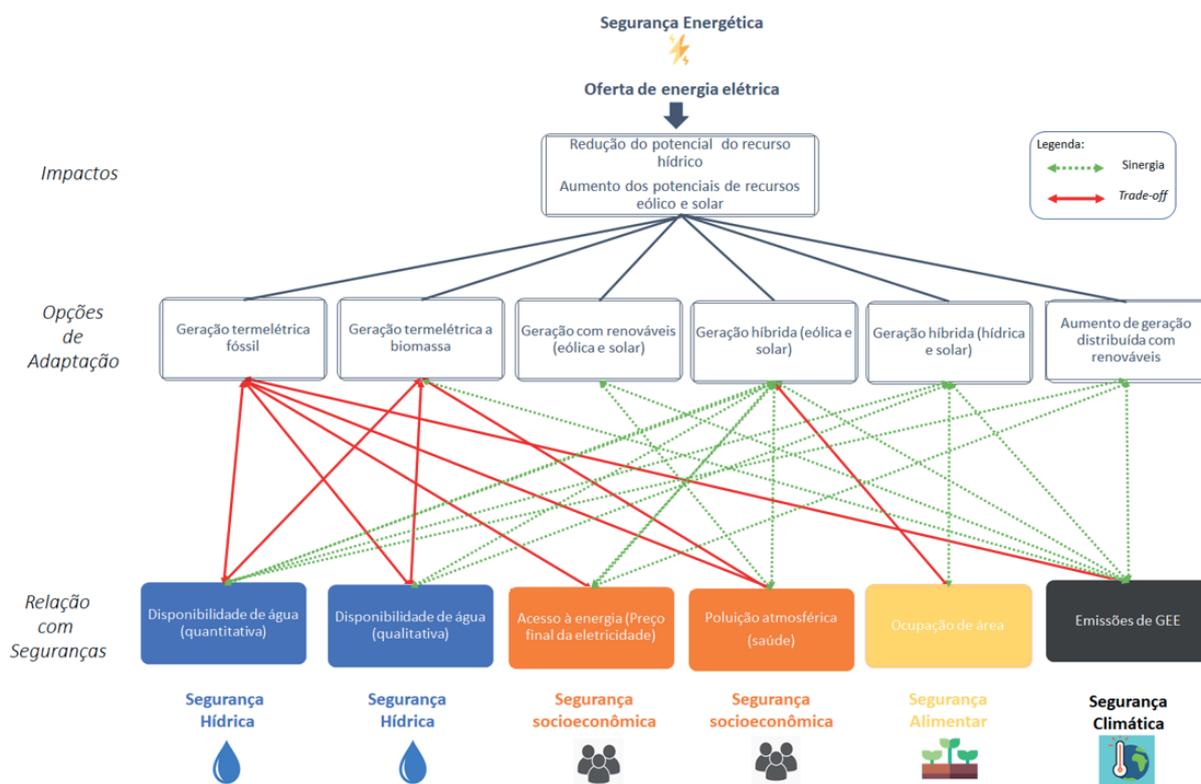
A geração termoelétrica pode originar um aumento das emissões de poluentes atmosféricos locais, com consequências para a saúde da população (PORTUGAL-PEREIRA et al., 2018). Outrossim, o preço final da eletricidade pode ter um incremento devido ao aumento do custo pelo consumo de combustível e os investimentos para instalação, operação e manutenção de novas usinas termoelétricas (EPE, 2017). Isso afeta a população e todos os setores econômicos. Além disso, a demanda e o consumo dos recursos hídricos dependerão da tecnologia de resfriamento que as usinas utilizam (ARROYO, 2018). Os efluentes gerados também poderiam impactar a qualidade dos recursos hídricos e os ecossistemas aquáticos (ARROYO, 2018).

Também, há a possibilidade de criar usinas híbridas, de forma que sistemas fotovoltaicos e eólicos possam ser instalados próximos aos reservatórios e produzir energia elétrica de forma a compensar as perdas de geração hidrelétrica por conta de estiagens. A integração de sistemas fotovoltaicos à usina de Três Marias, por exemplo, tornaria esta uma usina híbrida solar-hídrica com um fator de capacidade maior de geração.

A abundância de recurso solar em períodos de escassez na bacia do São Francisco acarretaria uma elevada geração fotovoltaica, compensando as perdas de geração hidrelétrica no mesmo período e mantendo a geração total em patamar similar (VELLOSO, 2017). A implementação de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidrelétricas seria uma outra importante medida de adaptação, pois contribui para uma maior geração de energia elétrica e uma redução da evaporação dos reservatórios, desacelerando, assim, a queda do nível dos reservatórios durante o período seco (FARFAN; BREYER, 2018).

O impacto de eventos extremos, como ciclones e chuvas intensas nos sistemas de transmissão e distribuição, pode ser contornado pelo incentivo a sistemas de geração distribuída off-grid, baseados em biomassa e energia solar, em unidades consumidoras conectadas ao grid. Caso o fornecimento de energia elétrica seja interrompido durante esses eventos, um sistema fotovoltaico residencial com armazenamento de energia em baterias, por exemplo, pode ser acionado e manter o abastecimento de energia elétrica da residência em que está situado (IRENA, 2019). Finalmente, estudos de identificação e análise da maior quantidade de ocorrências de interrupção dos sistemas de transporte de energia por causa do aspecto climático subsidiariam o fortalecimento das ações para resiliência aos impactos de eventos extremos futuros. Ambas as opções fortalecem a segurança energética da oferta de energia elétrica e, por consequência, a segurança socioeconômica.

A Figura 5 mostra as opções de adaptação para o sistema elétrico discutidas e sua relação com as outras seguranças.



**Figura 5 |** Opções de adaptação na oferta do setor elétrico e sua interação com as seguranças hídrica, alimentar, socioeconômica e climática

Fonte: Elaboração própria. Essa figura tem sido desenhada utilizando recursos do Flaticon.com

Para cenários de aumento da demanda de energia elétrica durante ondas de calor, o fortalecimento da gestão energética governamental, orientado a políticas de conservação de energia, pode reduzir a demanda energética. A gestão deve ser direcionada à eficiência de todos os setores de consumo de energia, como de edificações, industrial e de transportes.

O fortalecimento deve ser direcionado aos aspectos de instrumentos de gestão por parte do setor público, aspectos tecnológicos em busca de equipamentos mais eficientes e na promoção de uma mudança comportamental da população e dos outros usuários de energia. Como um agravante nesse contexto, o aumento de temperatura do ar poderá influenciar a elevação da demanda elétrica para resfriamento em diferentes setores. No setor de edificações, a maior utilização de aparelhos de resfriamento mantém o conforto térmico (saúde) das pessoas. A medida adaptativa cria uma retroalimentação, uma vez que o aumento do consumo de energia, principalmente em horários de pico, pode levar ao aumento de emissão de GEE (DEPAULA e MENDELSON, 2010).

Adicionalmente, é importante o fortalecimento de normas técnicas de construção com medidas sustentáveis de conservação de energia para todos os setores: edificações residenciais, comerciais, serviços e públicos, e empreendimentos industriais. Devem-se considerar padrões mínimos de eficiência energética, como os indicados pelo Procel Edificações que avaliam os sistemas de envoltória, iluminação e condicionamento de ar. Também, a gestão deve ser integrada ao planejamento urbano de sistemas naturais de resfriamento (resfriamento passivo) como espaços verdes em telhados, por exemplo.

Finalmente, o aumento do risco agroclimático para cana-de-açúcar e soja em decorrência de estiagens, evidenciado por Costa (2019), Pires et al. (2016) e Zullo et al. (2018), pode ser mitigado por métodos de irrigação mais eficientes e por tecnologias de melhoramento genético das culturas para permitir sua adaptação em regiões com climas diferentes (ZULLO et al., 2018). Tal feito comprova a capacidade técnica da agricultura brasileira para adaptação de culturas importantes a novas condições edafoclimáticas

(FREITAS, 2011). Carvalho e Furtado (2013) apontam que há no Brasil importantes centros tecnológicos para a pesquisa de cana-de-açúcar capazes de fornecer as respostas necessárias às adversidades climáticas esperadas. Contudo, observam-se que as pesquisas no País, atualmente, concentram-se em questões de curto prazo, como o aumento da produtividade e o enfrentamento eficaz de pragas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo objetiva fazer uma análise de casos observados de impactos de eventos meteorológicos extremos no sistema energético brasileiro, analisando-os qualitativamente. Dessa maneira, ocorrências evidentes da vulnerabilidade do setor energético mostram que o planejamento considerando mudanças climáticas não deve ser só de longo prazo, mas de curto e médio prazos. Assim, essa abordagem pode fornecer informações preciosas para tomadores de decisão. Ainda a discussão das opções de adaptação e sua interação com as outras seguranças evidencia a necessidade de uma gestão integrada para que ela seja sustentável no tempo. Finalmente, não se deve entender mudanças climáticas como um problema distante, devendo haver um comprometimento atual de recursos financeiros e humanos tanto para a mitigação quanto para a adaptação.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC).

## REFERÊNCIAS

- ANA. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR**. 2019. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br/MedicaoSin>>. Acesso em: 19 ago. 2020.
- ANEEL. **Aneel conclui revisão tarifária da Escelsa (ES), Iguaçu (SC) e Celesc (SC)**. 2004. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Parte I: Energia no Brasil e no mundo. 2005. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par1\\_cap1.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap1.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- ANEEL. **Relatório de Análise: desligamentos forçados do sistema de transmissão**. 2016.
- ANEEL. **Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão**. 2018.
- ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 ago. 2020.
- ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020**. Brasília, 2020.
- ARIAS, M. et al. Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 6, p. 430-436, 2020.
- ARROYO, E. **Incorporação do nexo energia-água em um modelo de otimização da expansão do sistema energético brasileiro**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético. Coppe – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Estratégia Geral. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudança do Clima e Florestas. Brasília, DF: MMA, 2016a. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 19 ago. 2020.
- BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética. **Resolução N° 16, de 29 de outubro de 2018**. Dispõe sobre a

evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional. Brasília, DF: CNPE, 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Acordo de Paris**. Publicação Bilíngue do Acordo de Paris - Inglês e Português, Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada**. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br>> Acesso em: 20 ago. 2020.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: <<http://bit.ly/1iC6rDg>>. Acesso em: 22 ago. 2020.

CEEE. Câmara dos Deputados do Brasil. Comissão Externa Destinada a Acompanhar a Situação de Emergência no Estado de Santa Catarina. 2012. Relatório de Atividades. Março de 2017. 2017.

CEEE. Comunicado aos Clientes da CEEE Distribuição. [on-line] Portal CEEE, 2020. Disponível em: <<https://www.ceeecom.br/noticias/comunicado-aos-clientes-da-eeee-distribuaao>>.

CEINFO. **Boletim CEInfo Análise**. A onda de calor de fevereiro de 2014 e o excesso de mortes no município de São Paulo, Ano IX, nº 9, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/saude/arquivos/publicacoes/Boletim\\_Analise\\_09.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/saude/arquivos/publicacoes/Boletim_Analise_09.pdf)>. Acesso em: 20 de jul. 2020.

CEMADEN. **Relatório da Situação Atual da Seca no Semiárido Brasileiro e Impactos**, 2016.

CEMADEN. **Boletim Monitoramento de Secas e Impactos no Brasil**. p. 0-13. Abril, 2020.

CEMIG. **Usina Hidrelétrica de Três Marias**. 2019. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/Nossa\\_Historia/Paginas/Usinas\\_Hidretricas.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Usinas_Hidretricas.aspx)> Acesso em: 19 ago. 2020.

CLARKE, L. et al. Effects of long-term climate change on global building energy expenditures. **Energy Economics**, v. 72, p. 667-677, 2018.

CONAB. **Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil**: edição para a safra 2014/15. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, 2017.

CONAB. **Boletim de Safra de grãos, 11º levantamento**: safra 2019/2020. 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra-graos/boletim-da-safra-de-graos?limitstart=0>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

COSTA, M. H. et al. Climate risks to Amazon agriculture suggest a rationale to conserve local ecosystems. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, n. 10, p. 584-590. 2019.

CUNHA, A. et al. **Secas e seus Impactos no Brasil em 2018**, v. 1, p. 1-19. 2019a. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/categoria/monitoramento/boletim-de-impactos>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

CUNHA, A. et al. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, 2019b.

DEPAULA, G.; MENDELSON, R. Development and the impact of climate change on energy demand: evidence from Brazil. **Climate Change Economics**, v. 1, n. 03, p. 187-208, 2010.

ELETROSUL. **Relatório anual e de sustentabilidade Eletrosul**. Florianópolis: [s.n.], 2014. Disponível em: <[http://www-en.eletrosul.gov.br/files/files/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/RELATÓRIO ANUAL E DE SUSTENTABILIDADE ELETROSUL 2014\(1\).pdf](http://www-en.eletrosul.gov.br/files/files/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/RELATÓRIO ANUAL E DE SUSTENTABILIDADE ELETROSUL 2014(1).pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2020.

EMATER/RS-Ascar. **Informativo Conjuntural**. Emater/RS-Ascar. Gerência de Planejamento. Núcleo de Informações e Análises. Jun. 1989. Porto Alegre, 2020.

EPE. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Ano III, n. 30, Rio de Janeiro, 2010.

EPE. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Ano VII, n. 78, Rio de Janeiro, 2014a.

- EPE. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Ano VII, n. 86. Rio de Janeiro, 2014b.
- EPE. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Ano IX, n. 97. Rio de Janeiro, 2015a.
- EPE. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Ano IX, n. 98. Rio de Janeiro, 2015b.
- EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Ministério de Minas e Energia. MME/EPE. Brasília. 2017.
- EPE. **Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento Energético**: considerações iniciais. 2018.
- EPE. **Brazilian Energy Balance**. 2019. Year, 2018 p. 303, 2019.
- EPE. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Ano XII, n. 137. Rio de Janeiro, 2019b.
- EPE. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Ano XII, n. 145. Rio de Janeiro, 2019c.
- EPE. **Solar Fotovoltaica Flutuante**. 2020.
- FARFAN, J.; BREYER, C. Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: a virtual battery of great global potential. **Energy Procedia**, v. 155, p. 403-411, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.038>>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- FORRESTER, S. **Residential Cooling Load Impacts on Brazil's Electricity Demand**. 2019. Tese (Doutorado), p. 33, 2019.
- GEIRINHAS, J. L. et al. Characterizing the atmospheric conditions during the 2010 heatwave in Rio de Janeiro marked by excessive mortality rates. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 796-808, Rio de Janeiro, 2019.
- GLEICK, P. H. **Impacts of California's Ongoing Drought**: hydroelectricity generation. Pacific Institute, n. February, p. 1-14, 2016.
- GOMES, J. **Tempo seco e lavoura envelhecida reduzem safra de cana 18/19 no centro-sul, diz FCStone**. Reuters/Portal Terra. 2018. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/economia/tempo-seco-e-lavoura-envelhecida-reduzem-safra-de-cana-1819-no-centro-sul-diz-fcstone,daaddbe27b3601e3c21dcb1ebc6e94dap09xce9y.html>>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- HIRAKURI, M. Impactos econômicos de estresses na produção de soja da safra 2015/16. **Circular Técnica**, 125. Londrina, PR: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p. 8. 2016.
- INMET. **Boletim Agroclimatológico mensal**, v. 44, n. 01, 2010. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO\\_MENSAL\\_201002.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_MENSAL_201002.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- INMET. **Boletim Agroclimatológico Mensal**, v. 48, n. 02, 2014a. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO\\_MENSAL\\_201402.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_MENSAL_201402.pdf)> Acesso em: 20 jul. 2020.
- INMET. **Boletim Agroclimatológico Mensal**, v. 48, n. 10, 2014b. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO\\_MENSAL\\_201410.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_MENSAL_201410.pdf)> Acesso em: 20 jul. 2020.
- INMET. **Boletim agroclimatológico mensal**, v. 49, n.09, 2015. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO\\_MENSAL\\_201509.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_MENSAL_201509.pdf)> Acesso em: 20 jul. 2020.
- INMET. **Boletim Agroclimatológico Decendial**. 2019a. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO\\_DECENDIAL\\_201901.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_DECENDIAL_201901.pdf)>. Acesso em: 23 jul. 2020.
- INMET. **Boletim Agroclimatológico Mensal**, v. 54, n. 03, 2019b. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO\\_MENSAL\\_201910.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_MENSAL_201910.pdf)>. Acesso em: 23 jul. 2020.
- INMET. **Alert-AS – Centro Virtual para Avisos de Eventos Meteorológicos Severos**. 2019c. Disponível em: <[http://alert-as.inmet.gov.br/cv/emergencia/cap/10598?fbclid=IwAR0MsQMIBb-8\\_it670SwhkEZMd5hFzJyVUv5NBOeVEblmvkJI4nU\\_q4wikl](http://alert-as.inmet.gov.br/cv/emergencia/cap/10598?fbclid=IwAR0MsQMIBb-8_it670SwhkEZMd5hFzJyVUv5NBOeVEblmvkJI4nU_q4wikl)> Acesso em: 23 jul. 2020.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20-32, 2016.

IPCC. Wind Energy. In: **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change**. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011.

IPCC. **Climate Change 2014**: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. v. 1, n. October, p. 1-169, 2014b. 2014.

IRENA. **Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access**: an opportunity not to be missed. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, p. 144, 2019.

JEREZ, S. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. **Nature Communications**, v. 6, 2015.

JONG, P. et al. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 390-401, 2019.

LELIS, T. A. et al. Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: simulação de cenários. Impacts of climate change on erosion of a watershed: simulation of scenarios. **Revista Ambiente & Água**, v. 6, n. 2, p. 282, 2011.

LUCENA, A. et al. Interactions between climate change mitigation and adaptation: the case of hydropower in Brazil. **Energy**, 164, p.1161-1177, 2018.

LUCENA, A. et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil, **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 879-889, 2009.

MARENGO, J. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil**. Cachoeira Paulista v. CPTEC/Inpe, p. 16. 2004.

MARENGO, J. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, v. 106, n. 31, 2015.

MARENGO, J. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.

MARTINS, E.; FRANCISCO JÚNIOR. O clima da Região Nordeste entre 2009 e 2017: monitoramento e previsão. **Parc. Estrat.**, v. 22, n. 44, p. 63-80, 2017.

\_\_\_\_\_. A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos. **Parcerias Estratégicas**, 107-128, 2015.

NOBRE, C. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 02, p. 252-262, 2016.

ONG, P. et al. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 1540-1553, 2018.

ONS. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 22 ago. 2020.

PEREIRA, E. B. et al. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable energy**, v. 49, p. 107-110, 2013.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I.; FILHO, A. J. P. Climate perspective on the large-scale circulation associated with the transition of the first South Atlantic hurricane. 2008. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 8, mar. 2018. p. 2011-2029.

PIRES, G. et al. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and forest meteorology**, v. 228, p. 286-298, 2016.

PORTAL AGRONOTÍCIAS. **Seca atual é comparada com a que provocou quebra na safra de 2012**. Notícias/Clima e Temperatura. 2020. Disponível em: <<http://www.portalagronoticias.com.br/noticia/7836/rs-seca-atual-e-comparada-com-a-que-provocou-quebra-na-safra-de-2012>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

- PORTUGAL-PEREIRA et al. Interactions between global climate change strategies and local air pollution: lessons learnt from the expansion of the power sector in Brazil. 2018. **Climatic Change**. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2193-3>.
- SAILOR, D. J.; SMITH, M.; HART, M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. **Renewable Energy**, v. 33, n. 11, p. 2393-2406, 2008.
- SAMORA, R. **Moagem de cana do centro-sul cai abaixo de previsão**: Unica cita perdas por geadas. Economia/Notícias/Reuters/UOL. 2019. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/reuters/2019/07/24/moagem-de-cana-do-centro-sul-recua-95-na-1-quinzena-unica-cita-perdas-por-geadas.htm>>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- SANTOS, A. **Impacto de Mudanças Climáticas no Potencial de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro**. 426f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.
- SCHAEFFER, R. et al. **Adaptação às mudanças climáticas no Brasil**: cenários e alternativas, p. 1-56, 2015.
- SCHAEFFER, R. et al. **Energy sector vulnerability to climate change**: a review, *energy*, v. 38, n. 1, p. 1-12, 2012.
- SIMIONI, T.; SCHAEFFER, R. Georeferenced operating-efficiency solar potential maps with local weather conditions – An application to Brazil. **Solar Energy**, v. 184, n. October 2018, p. 345-355, 2019.
- SINGH, P.; RAVINDRA, N. M. **Temperature dependence of solar cell performance**: an analysis, *solar energy materials and solar cells*, v. 101, p. 36-45, 2012.
- SIVAK, M. Potential energy demand for cooling in the 50 largest metropolitan areas of the world: implications for developing countries. **Energy Policy**, v. 37, n. 4, p. 1382-1384, 2009.
- SKOPLAKI, E.; BOUDOUVIS, A. G.; PALLYVOS, J. A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 92, n. 11, p. 1393-1402, 2008.
- TEIXEIRA, M. et al. Assaí: an energy view on an Amazon residue. **Biomass and Bioenergy**, 58, p. 76-86, 2013.
- TOBIN, I. et al. Assessing climate change impacts on European wind energy from Ensembles high-resolution climate projections. **Climatic Change**, v. 128, n. 1-2, p. 99-112, 2015.
- ÚNICA. **Relatório final da safra 2014/2015**: região centro-sul. São Paulo: União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2015.
- ÚNICA. **Relatório final da safra 2019/2020**. 2020. Disponível em: <<http://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=118>>. Acesso em: 22 ago. 2020.
- VELLOSO, M. F. **Possibilidade de geração híbrida hidrossolar na bacia do São Francisco, 145f**. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.
- WANDERLEY, L. DE A. et al. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149-164, 2018.
- WORLD BANK. **Avaliação de Perdas e Danos**: inundações bruscas em Santa Catarina em novembro de 2008. 2012a. Disponível em: <<http://documents1.worldbank.org/curated/en/250881468232500513/pdf/NonAsciiFileName0.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- WORLD BANK. **Avaliação de Perdas e Danos**: inundações bruscas em Pernambuco em junho de 2010. 2012b. Disponível em: <<http://documents1.worldbank.org/curated/pt/495391468013874079/pdf/NonAsciiFileName0.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- WORLD BANK. **Avaliação de Perdas e Danos**: inundações e deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011. 2012c. Disponível em: <<http://documents1.worldbank.org/curated/en/260891468222895493/pdf/NonAsciiFileName0.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- ZULLO, J.; PEREIRA, V.; KOGA-VICENTE, A. Sugar-energy sector vulnerability under CMIP5 projections in the Brazilian central-southern macro-region. **Climatic Change**, v. 149, n. 3-4, p. 489-502, 2018.