

## CONTRATO Nº 12/2018

### TDR Nº 66

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

## PRODUTO 2

### ESTADO DA ARTE DA VULNERABILIDADE DO SETOR ELÉTRICO

**META**

PROJETO DE ASSISTÊNCIA  
TÉCNICA DOS SETORES DE  
ENERGIA E MINERAL



**BANCO MUNDIAL**  
BIRD • AID | GRUPO BANCO MUNDIAL

MINISTÉRIO DE  
**MINAS E ENERGIA**



Pesquisa / Produto / Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD, em 1º de março de 2012.

**Julho/2018**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>2. FUNDAMENTOS GERAIS.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Adaptabilidade, Transformabilidade e Disruptibilidade .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Incerteza, Risco e Ameaça .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Confiabilidade x Vulnerabilidade .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4. Resiliências sistêmicas .....</b>	<b>12</b>
<b>3. ESTADO DA ARTE SOBRE VULNERABILIDADE EM DIFERENTES SETORES... 14</b>	
<b>3.1. Vulnerabilidade ambiental .....</b>	<b>17</b>
3.1.1. Ecossistemas e recursos hídricos.....	17
3.1.2. Clima .....	18
3.1.3. Desastres naturais .....	21
3.1.4. Desastres tecnológicos.....	21
<b>3.2. Vulnerabilidade socioeconômica .....</b>	<b>22</b>
3.2.1. Insegurança alimentar .....	22
3.2.2. Humana .....	22
3.2.3. Econômica .....	23
<b>3.3. Planos Nacionais de Adaptação (PNAs) .....</b>	<b>23</b>
<b>4. VULNERABILIDADE ENERGÉTICA.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1. Políticas e ações para enfrentamento das mudanças climáticas.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2. PNA em países em desenvolvimento .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3. PNA em países desenvolvidos .....</b>	<b>40</b>
<b>4.4. Avaliação e melhoria da resiliência energética a ameaças climáticas ..</b>	<b>43</b>

<b>5. VULNERABILIDADE APLICADA AO SETOR ELÉTRICO .....</b>	<b>60</b>
<b>5.1. Mapeamento geográfico das ameaças climáticas para o setor elétrico</b>	<b>64</b>
5.1.1. Aumento da temperatura .....	66
5.1.2. Alterações no regime de chuva e disponibilidade de água .....	68
5.1.3. Alterações das velocidades de vento .....	70
5.1.4. Queimadas.....	70
5.1.5. Descargas atmosféricas .....	72
<b>5.2. Fragilidades e resiliências do setor elétrico .....</b>	<b>74</b>
5.2.1. Geração não renovável.....	75
5.2.2. Geração renovável .....	78
5.2.3. Transmissão .....	86
5.2.4. Distribuição .....	94
5.2.5. Demanda .....	103
<b>6. VULNERABILIDADE INCORPORANDO O LADO DA DEMANDA (DA SOCIEDADE).....</b>	<b>109</b>
6.1. Fragilidades e resiliências da sociedade.....	109
6.2. Análise espacial das vulnerabilidades sociais .....	117
<b>7. PROPOSIÇÕES E OBSERVAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>122</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>124</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O levantamento do estado da arte do tema vulnerabilidade do setor elétrico face às mudanças climáticas exige uma visão abrangente, tendo em vista a diversidade de conceitos e de nomenclaturas envolvidos, que, muitas vezes, são contraditórios entre si. O estabelecimento do conceito de vulnerabilidade exige, previamente, definições que estão diretamente relacionados e são correntes, como incerteza, risco, ameaça, fragilidade, resiliência, adaptabilidade, transformabilidade, disruptibilidade, etc., embora existam conflitos significativos entre estas definições. Assim, a revisão da literatura em amplos e diversos setores permitiu que se escolhesse as definições que melhor se adaptavam aos interesses e práticas do setor elétrico.

O levantamento bibliográfico concentrou-se nas áreas envolvidas neste projeto, como social, econômica, ambiental e energética. Para isso, primeiramente, serão apresentados os conceitos dos termos ameaça, fragilidade e vulnerabilidade em outras áreas, notadamente a de desastres ambientais e da própria mudança climática, em que se destacam documentos da Organização das Nações Unidas (ONU) estabelecendo taxonomia e conceitos. Este levantamento estendeu-se a setores como o ambiental, socioeconômico e energético. Na área energética, o levantamento prendeu-se a estudos com foco em política energética, que fazem uso frequente do conceito de vulnerabilidade. Deu-se destaque para os Planos Nacionais de Adaptação, que indicam as ações para melhoria da resiliência dos países, face as ameaças climáticas.

Finalizando, após consolidado o conceito de ser a vulnerabilidade a operação binária entre ameaça e o inverso da resiliência sistêmica, e que a resiliência é uma função da fragilidade estrutural e de procedimentos operacionais, partiu-se para a elaboração do estado da arte e definições de vulnerabilidade aplicadas ao setor elétrico. Buscou-se, para esse fim, diferenciar conceitualmente as bases dos estudos de confiabilidade e de vulnerabilidade. Apesar de o foco ser a vulnerabilidade face às mudanças

climáticas, foi necessária, novamente, uma visão mais abrangente dos ativos e dos sistemas de energia elétrica, destacando suas fragilidades frente a distintas ameaças ambientais. Em seguida, apresentou-se o mapeamento geográfico das ameaças climáticas que impactam o setor elétrico (aumento da temperatura, alterações no regime de chuva e disponibilidade de água, alterações das velocidades de vento, queimadas, descargas atmosféricas, etc.), uma vez que são inerentemente espacializadas e o planejamento do setor elétrico deve se adequar a essa realidade (planejamento espacial). Assim, foram levantados e apresentados modelos geográficos que podem (ou devem) ser incorporados ao planejamento do setor elétrico.

De posse do entendimento do conceito de vulnerabilidade e do mapeamento geográfico das ameaças climáticas, pode-se avaliar a vulnerabilidade no contexto do setor elétrico, segregando em geração (não renovável e renovável), transmissão, distribuição e demanda. O conceito de vulnerabilidade do setor elétrico incorporou o lado da demanda (da sociedade), dado que uma forma de se medir a vulnerabilidade é analisando o impacto socioeconômico do dano. Foram destacadas as fragilidades e resiliências do consumidor/usuário, incorporando suas preferências (utilidade) e capacidade de resposta em diferentes horizontes, e foi feita uma análise espacial das fragilidades consideradas. Posteriormente, fez-se um levantamento de estudos/trabalhos de maior relevância, nacional e internacionalmente, relacionados à adaptação do setor energético face às mudanças climáticas, em que foram descritas suas principais características. Em outras palavras, ações para melhoria da resiliência do setor elétrico face às mudanças climáticas.

Finalmente, foi realizada uma consolidação dos estudos, que serviram de base para a elaboração de propostas a serem aplicadas ao planejamento do setor elétrico. Essas propostas têm a característica fundamental de se adaptar a possíveis evoluções que venham a surgir ao longo do trabalho, como consequência das demais atividades e da maturação natural do processo.

## 2. FUNDAMENTOS GERAIS

Tendo em vista a diversidade (e mesmo, contradições) existente na definição de vulnerabilidade (e dos conceitos correlatos), notadamente pelo fato de ser um conceito aplicado em muitas e distintas áreas, optou-se por apresentar nesta seção uma discussão objetivando construir fundamentos conceituais que venham a embasar futuras métricas a serem utilizadas nos modelos de planejamento do setor elétrico.

### 2.1. Adaptabilidade, Transformabilidade e Disruptibilidade

Neste item serão explicados os conceitos gerais adotados para adaptabilidade, transformabilidade e disruptibilidade (ou disruptividade), independentemente da área de aplicação, que embasarão as análises e críticas posteriores. Assim, seguem as definições:

- **Adaptabilidade:**

Do ponto de vista físico, é a capacidade de um elemento ou sistema de suportar ações externas, se adequando, sem, entretanto, perder suas características operacionais fundamentais.

Do ponto de vista social, como definida por Walker et al. (2004), consiste na competência de um indivíduo em se adaptar a determinadas situações ou circunstâncias diferentes daquelas que está originalmente acostumado. O grau de adaptabilidade varia de acordo com o indivíduo e com as circunstâncias em questão, tanto em intensidade quanto em frequência ou quantidade.

- **Transformabilidade:**

Do ponto de vista físico, é a capacidade de um elemento ou sistema de suportar ações externas, se transformando, estabelecendo novas características operacionais adequadas a essas condições.

Do ponto de vista socioambiental, é a capacidade de criar um sistema fundamentalmente novo quando as condições ecológicas, econômicas ou sociais (incluindo políticas) tornam o sistema existente insustentável (WALKER et al., 2004).

- **Disruptibilidade:**

Do ponto de vista físico, é o limite da capacidade operacional de um elemento ou sistema de suportar uma determinada ação externa, após se adaptar e transformar, quando for o caso.

Em termos de sociedade, a disruptibilidade é a quebra de algum padrão, em que não há a chance do retorno ao padrão original, por exemplo, a falência de uma empresa.

## 2.2. Incerteza, Risco e Ameaça

Embora o conceito de risco seja bem fundamentado dentro do pensamento técnico, a matemática desenvolvida para tal se baseia em observações do passado. Assim, a estimativa de risco assume que o futuro repete o passado, levando, com total segurança, a se dizer qual a probabilidade de se ter uma condição adversa, denominada risco. Fatos como a Grande Guerra vieram evidenciar que o passado não se repete, podendo sempre ocorrer eventos negativos muito além do previsto. Verdadeiros desastres que não respeitam as leis matemáticas. A esse respeito, dois economistas destacaram-se nesse momento: Frank Knight e John Mainard Keynes. O que ambos expuseram não é a determinação da inutilidade dos modelos probabilísticos, e o risco por aí calculado, mas, apenas, a evidenciação que esses métodos têm aplicação limitada a condições específicas e não são capazes sozinhos de prever todos os eventos. Há no ar sempre a possibilidade de ocorrer algo inusitado, muitas vezes mais danoso que um risco probabilisticamente calculado. E, pelo dano que esse pode causar, caracteriza-se como uma ameaça ou perigo. (em inglês, *threat* ou *hazard*, respectivamente). Estes eventos são denominados em inglês *High Intensity*

*and Low Probability – HILP* (Grande Impacto e Reduzida Probabilidade). Pode-se expandir este conceito para afirmar que é um evento rigoroso possível, mas raro.

Estritamente na engenharia, as posições revolucionárias e radicais de Knight e Keynes não tiveram o mesmo eco que na economia, até porque a ingerência do homem sobre esses sistemas é menos severa. Mesmo para sistemas de engenharia, há de se cuidar com relação a esses modelos. No caso de uma peça, por exemplo, as condições laboratoriais não vão se repetir em campo, onde há um desconhecimento maior das condições de serviço. Em função disto, o projetista adota, como segurança, trabalhar com limites bem inferiores ao ponto de rompimento (por exemplo, 20% da tensão de ruptura). Quanto melhor ele conheça as condições ambientais em que estará a peça, melhor será o dimensionamento, aumentando ou diminuindo a tensão de projeto. Mas, as incertezas de uso (antrópicas) ou das condições ambientais estão muitas vezes mais próximas às considerações de Knight e Keynes do que o pensamento clássico.

Entende-se por ameaça ou perigo sistêmico, em um sentido mais amplo, uma condição social, ambiental ou técnica que atua sobre um sistema de interesse e que extrapola os valores usuais, podendo trazer perdas significativas e muitas vezes irreparáveis. Essa relação imbricada entre o sistema e o seu ambiente é essencial para bem defini-la. As condições de exposição do sistema a este ambiente vão definir a ameaça. Um veículo que só percorre áreas urbanas está sujeito a ameaças distintas, do ponto de vista mecânico, de um que percorre estradas rurais. O que é ameaça para um pode não ser para outro.

A ameaça pode ser analisada, fundamentalmente, segundo dois caminhos. Na análise probabilística, a ameaça estará associada a uma determinada probabilidade. Por exemplo, uma rajada de vento que atua sobre uma estrutura metálica. Com base em medições, pode-se associar uma distribuição de probabilidade à velocidade de vento observada. A partir disso, calcula-se qual é o valor da rajada que respeita uma certa probabilidade de não ser ultrapassado (risco). Por outro lado, a ameaça pode ser



estabelecida com base em poucas observações, insuficientes para suportar um estudo probabilístico ou por cálculos de simulação, por exemplo. Nesses casos, estabelece-se a velocidade máxima observada ou simulada, mesmo que seja para uma única condição. Em resumo: ameaça é uma ação externa anômala que se submete um determinado elemento ou sistema de interesse, levando-o a uma condição não operacional.

Face ao exposto, o conceito de risco foi estendido, extrapolando os métodos probabilísticos, avançando, para análises possibilísticas e, mesmo, para métodos qualitativos, ao invés de quantitativos. Assim também se deu com o trato da ameaça, destacando-se os métodos de cenarização, muitos deles resultantes de simulações determinísticas.

### 2.3. Confiabilidade x Vulnerabilidade

Algumas áreas da engenharia (como eletricidade e mecânica) têm, há muito tempo, desenvolvido métodos e modelos para o estudo da Confiabilidade (*Reliability*), entendendo-se, esta, como sendo uma avaliação numérica da disponibilidade (*Availability*) de um elemento ou sistema técnico estar disponível para funcionamento pleno, considerando os carregamentos em operação normal. Majoritariamente, esses métodos levam em consideração os estudos probabilísticos, com base em estatísticas das falhas de sistemas e componentes semelhantes. Assim, estão incorporadas nesses modelos as ameaças endógenas e exógenas que levaram à falha, como envelhecimento ou sobrecarregamento. Há métodos que trabalham com técnicas determinísticas, prendendo-se a características técnicas dos sistemas e elementos e a padrões de carregamentos, que permitem estimar a disponibilidade dos mesmos (em geral, com simulações).

Os métodos probabilísticos mais comuns são os que avaliam a frequência e/ou a duração das falhas (no setor elétrico, predominantemente empregado em estudos de redes de transmissão e distribuição), com base nas taxas de falhas e nas taxas de reparo, e aqueles que avaliam o risco de falha ou do serviço não prestado (no setor

elétrico, predominantemente empregado em estudos de geração). Esses métodos não se prendem (como regra) às características das ameaças que levaram à falha, nem tampouco extrapolam a fronteira do setor, no intuito de entender as consequências do serviço não prestado. Por exemplo, prendendo-se ainda ao setor elétrico, os estudos de frequência e duração nos sistemas de distribuição consideram o número de consumidores atingidos por falha, ou a potência interrompida, sem se preocupar com o que este consumidor estava fazendo naquele momento, ou qual a sua perda. Em parte, isso pode ser compensado por estimativas do “custo de interrupção”, como proposto por Bilington (1994). Ainda assim, poucos esforços têm sido despendidos para avaliar a capacidade do usuário do serviço de suportar uma interrupção do mesmo, notadamente em condições severas. Com relação a isso, é interessante observar o que se passa nos sistemas hidrelétricos: trabalha-se, em geral, com o risco de não se atender plenamente a carga, não diferenciando, entretanto, a severidade deste não atendimento. Assim, probabilisticamente, a falta de 1% do suprimento ou de 100% do mesmo são tratados de forma idêntica.

A severidade da ameaça que levou à falha ou da consequência da falha sobre o usuário não é tratada, convenientemente, nos modelos dominantes de confiabilidade. Ameaças mais severas levam, normalmente, a falhas mais profundas (em tempo ou duração de interrupção, ou, ainda, na quantidade de serviço não prestado). As falhas impactam de formas distintas os usuários, em função da severidade delas próprias e/ou das características dos mesmos. Nasce, assim, a necessidade de se entender esta característica sistêmica, que engloba a severidade da falha, a característica endógena do sistema e a característica de reação ao impacto do usuário.

As definições de vulnerabilidade são bastantes vagas e, por vezes, contraditórias na literatura especializada, mesmo tratando-se de um mesmo setor, como o de energia elétrica (note-se que esses estudos nesta área são ainda emergentes). Por vezes confunde-se vulnerabilidade com a fragilidade intrínseca do sistema, que é, ocasionalmente, também definida como suscetibilidade.

Assumindo posições de áreas nas quais esses estudos estão em um grau de maturidade mais elevado, a vulnerabilidade deve ser uma medida do impacto (diretamente ou indiretamente) no usuário/receptor, provindo de uma ameaça externa sobre um sistema. Em termos matemáticos, pode-se dizer que a vulnerabilidade é a operação binária entre a ameaça e a fragilidade, como segue (Equação 1):

$$\text{Vulnerabilidade} = \text{Ameaça} \otimes \text{Fragilidade} \quad \text{Equação 1}$$

Essa definição será adotada como referencial neste trabalho, mesmo sabendo que outras (apresentadas por distintos autores) serão apresentadas, pois as diferenças fundamentais entre elas estão mais nas nomenclaturas do que nos conceitos que as suportam.

Estudos de vulnerabilidade são comuns em alguns setores, como o nuclear, por meio de técnicas de Análise de Risco (árvores de falha, contingência, etc.) ou outras. Poucos, entretanto, extrapolam o próprio sistema técnico. Ou seja, prendem-se às consequências diretamente ligadas ao sistema em análise, como é o caso do número de consumidores ou potência interrompidos quando de uma falha no sistema elétrico. Se essa interrupção causou a parada de bombas de drenagem urbana e, como consequência, causou inundação, não é um problema tratado pelo setor elétrico. Entretanto, a vulnerabilidade pode e deve (na maioria dos casos) ter uma visão transversal. Neste exemplo dado, a vulnerabilidade poderia ser avaliada como a área inundada em consequência da falta de energia para bombeamento ou os danos materiais associados. São casos notáveis e, em franco desenvolvimento, aqueles que incorporam a visão transversal na análise de vulnerabilidade.

De outra forma, resumindo: pode-se afirmar que a confiabilidade tem o foco nas condições operacionais do sistema, enquanto a vulnerabilidade prende-se a avaliar as consequências de eventos extraordinários.

## 2.4. Resiliências sistêmicas

Pode-se dizer que a fragilidade de elementos ou sistemas que não se moldam (transformam) é uma função inversa da resiliência. Assim, define-se uma outra operação binária para a vulnerabilidade, associando a ameaça com a resiliência (Equação 2).

$$Vulnerabilidade = Ameaça \otimes \frac{1}{Resiliência} \quad \text{Equação 2}$$

Nesse ponto, faz-se necessário apresentar a definição microeconômica de curto e longo prazos. Entende-se por curto prazo a condição estática de um sistema (parque ofertante e parque consumidor), em que as partes envolvidas adaptam-se a preço e qualidade do produto, na busca do equilíbrio, alterando os níveis de produção e consumo. A capacidade de resposta dos atores pode ser medida (de forma marginal) pela elasticidade, que é quanto varia o consumo (ou oferta) face à variação de preço (ou qualidade). Essa é a condição inerente à operação.

Quando os parques de produção e consumo se transformam (expandem), podendo variar no tempo, caracteriza-se uma análise dinâmica de longo prazo. Lançando mão dos conceitos mecânicos apresentados, ao se moldarem, os sistemas passam a absorver melhor as tensões (ameaças). Embora essa capacidade de se moldar para absorver as ameaças (tensões) nos sistemas mecânicos seja denominada tenacidade, nos estudos dinâmicos de vulnerabilidade o termo utilizado permanece sendo resiliência.

Podem-se definir elasticidades de longo prazo, que são, como regra, maiores que as de curto prazo, refletindo maiores capacidades de resposta, inerentes às capacidades de se moldarem frente às tensões.

Os estudos de vulnerabilidade devem ter enfoques estáticos e dinâmicos. Observando a definição de referência, apresentada anteriormente, tanto a ameaça quanto a fragilidade/resiliência sistêmica podem variar com o tempo. Assim são, por exemplo,

as ameaças ambientais, como vento, tempestade elétrica, humidade do ar, etc., que se alteram em suas variabilidades, valores extremos e médios. Os sistemas, por outro lado, devem buscar se adaptar, tornando-se mais resilientes, para manter a vulnerabilidade em níveis adequados. As infraestruturas, normalmente, são projetadas com margens significativas de segurança, conferindo-lhes grande resistência (pouco frágeis). A resistência, em si, é um elemento importante da resiliência. Mas não é único e vem perdendo sua importância relativa com o tempo, à medida que tecnologias e procedimentos permitem reduzir o tempo de interrupção de um serviço ou o impacto desta interrupção. A resiliência sistêmica, portanto, engloba este conjunto de estruturas físicas (infraestrutura) e processos operacionais.

Muitos autores convergem ao ponto (em maneiras distintas) de que se faz necessário, para aumentar a resiliência de um sistema, torna-lo mais capaz de prever, absorver, adaptar e rapidamente recuperar de um evento disruptivo (ameaça). A Fragilidade intrínseca (Fi) de um sistema, vista de forma estática, pode ser “compensada” por: desenvolvimento de instrumentos dinâmicos de Predição (Pr), que antevêm a ameaça; criação de capacidade de Adaptação (Ad), que transforma o sistema, face às predições; evolução da habilidade de Absorção (Ab), principalmente no lado do usuário impactado, reduzindo os danos; tempos relativamente reduzidos de Recuperação (Re), que reduzem os danos.

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

Resumindo e incorporando os conceitos recém apresentados, a Vulnerabilidade deve ser vista como uma operação binária entre a Ameaça, dependente do risco (R) ou

cenário (C) adotado, e a Resiliência, que é função da Fragilidade Intrínseca e das capacidades de Predição (Pr), Adaptação (Ad), Absorção (Ab) e de Recuperação (Re), conforme apresentado na Equação 3.

$$Vulnerabilidade = Ameaça(R \vee C) \odot \frac{1}{Resiliência(Fi \wedge Pr \wedge Ad \wedge Ab \wedge Re)} \quad \text{Equação 3}$$

### 3. ESTADO DA ARTE SOBRE VULNERABILIDADE EM DIFERENTES SETORES

Diferentemente dos estudos de confiabilidade do setor elétrico, em que o usuário do serviço é considerado de forma simples, por meio de sua potência, energia ou como um elemento consumidor, ao se estudar a vulnerabilidade para este setor, tem-se que extrapolar as fronteiras técnicas do mesmo, seja pela necessidade de entender a ameaça, seja para avaliar a severidade do dano. No caso presente, que é o de se incorporar a avaliação na vulnerabilidade do setor elétrico face às mudanças climáticas, a compreensão do que é chamado de ameaça e de vulnerabilidade em setores, como o ambiental e o econômico, torna-se fundamental. A este respeito, é mister dizer que as definições conceituais em alguns destes setores (como o de desastres naturais e de mudanças climáticas) estão consolidadas e até regulamentadas por instituições multigovernamentais, como se apresentará, a seguir. Observe que muitas destas definições diferem do que se adotou como referenciais deste trabalho, o que não invalida suas apresentações. Ao contrário, evidenciam a necessidade do que se desenvolveu anteriormente, na busca de uma consolidação conceitual.

Para o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2017), o risco é um evento prejudicial e preocupante que pode causar danos ao indivíduo, ao meio ambiente e/ou aos bens materiais. Já para o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2005) e para o Departamento de Assuntos

Humanitários das Nações Unidas (*United Nations Department of Humanitarian Affairs-UNDHA*, 1992), o risco é definido como a probabilidade de ocorrer um evento com consequências nocivas ou com perdas (sejam elas, de vidas, pessoas feridas, bens danificados, danos ambientais ou atividade econômica interrompida), decorrentes da interação de perigos naturais, induzidos por atividade humana e condições de vulnerabilidade. De maneira mais resumida:  $\text{Risco} = \text{Perigo} \times \text{Vulnerabilidade}$  (UNDHA, 1992; IBGE, 2005). Para o UNDHA (1992), uma população em risco é uma população bem definida, cujas vidas, propriedades e empregos estão ameaçados por determinados perigos. Já o perigo é visto como um evento físico, fenômeno ou atividade humana que pode ocasionar perda de vida, estragos a propriedades, prejuízos econômicos e degradação ambiental e pode ter origem natural ou ser induzido por processos antropogênicos (IBGE, 2005).

O CEMADEN (2017) diz respeito ao desastre como a combinação de ameaças e perigos, com condições de vulnerabilidade e a escassa capacidade ou escassas medidas para moderar as consequências negativas e possíveis do risco. Menciona, ainda, que o desastre é quando acontece a interrupção do funcionamento de uma comunidade ocasionando perdas humanas e/ou importantes perdas materiais ou ambientais, que extrapolam a capacidade da comunidade afetada de lidar com a situação. Por sua vez, o banco de dados internacional de desastres emprega ao menos um dos seguintes critérios objetivos para caracterizar um desastre: 10 ou mais mortes humanas, 100 ou mais pessoas se relatarem afetadas, haver declaração de estado de emergência ou pedido de auxílio internacional (GUHA-SAPIR; HOYOIS; BELOW, 2013). O mesmo banco de dados, ainda subdivide os tipos de desastres em cinco: geofísico, meteorológico, hidrológico, climatológico e biológico.

A avaliação da vulnerabilidade mostrou 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).



O Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (UNDP- *United Nations Development Programme*; 2014) destaca questões como “quem é vulnerável, ao que e por quê?”. A análise da Figura 1 mostra que, sobretudo, os pobres são os mais vulneráveis, especialmente a choques econômicos e na saúde. A coluna “A quê?” refere-se à ameaça e a “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.

**Figura 1 - Quem é vulnerável, ao que e por quê?**

**Fonte: Traduzido de UNDP (2014).**

A vulnerabilidade não depende apenas das características internas de um sistema, mas também considera o potencial de dano do perigo e sua capacidade de enfrentamento, levando em consideração as três dimensões de um sistema: o meio ambiente, social e econômico (CIRELLA; IYALOMHE; RUSSO, 2016). Segundo Moser (1998), analisar a vulnerabilidade abrange identificar a ameaça e a “resiliência”, ou a capacidade de resposta na exploração de oportunidades, de resistir ou recuperar-se dos efeitos negativos de um ambiente em mudança.

O conceito de vulnerabilidade do UNEP (2002), baseia-se em:

Vulnerabilidade  $\cong$  (proporcional a) exposição ao risco + incapacidade de enfrentamento



Portanto, quanto maior proteção e menor risco, menor vulnerabilidade e quanto maior risco e menor proteção, maior vulnerabilidade (TROMBETA; GUZZO, 2002, p. 32 apud BRANDÃO, MAHFOUD, GIANORDOLI-NASCIMENTO, 2011).

O UNEP (2002) trata de seis tipos de vulnerabilidade, a saber:

- ✓ Vulnerabilidade econômica;
- ✓ Vulnerabilidade ambiental;
- ✓ Vulnerabilidade a desastres naturais;
- ✓ Vulnerabilidade a desastres tecnológicos;
- ✓ Vulnerabilidade a insegurança alimentar;
- ✓ Vulnerabilidade humana.

Em seguida, é abordado sucintamente cada um destes tipos, agrupando-se, entretanto, em dois grandes grupos (vulnerabilidade ambiental e vulnerabilidade socioeconômica). No item seguinte, será tratada a vulnerabilidade energética, dentro de contextos nacionais, face a sua importância no planejamento dos sistemas elétricos.

### **3.1. Vulnerabilidade ambiental**

#### **3.1.1. Ecosystemas e recursos hídricos**

Segundo Aquino, Paletta e Almeida (2017), a vulnerabilidade ambiental é referente ao risco exposto pelo meio ambiente, cuja origem pode ser natural ou causado por fatores externos e, por risco ambiental se entende como a possibilidade de um evento (esperado ou não) de certa magnitude ocorrer num sistema, desta forma, perturbando o seu estado instantaneamente anterior.

As análises socioambientais, no âmbito dos estudos de aproveitamento energético dos recursos hídricos, contemplam os conceitos de sensibilidade e fragilidade ambiental, porém com definições distintas daquelas adotadas no presente estudo.

Segundo o Manual de Inventário Hidroelétrico (BRASIL, 2007), o conceito de sensibilidade é utilizado para identificação e espacialização das áreas mais sensíveis

das subáreas da bacia hidrográfica, de modo a expressar a integridade dos recursos naturais, os aspectos qualitativos da paisagem e as diferentes situações socioeconômicas. Já a fragilidade é empregada na identificação de situações e subespaços de ocorrência de impactos relacionados à implantação de empreendimentos hidroelétricos, em áreas já caracterizadas como sensíveis.

As áreas de sensibilidade são determinadas em etapa anterior à fragilidade, por meio da elaboração, seleção e mapeamento de Indicadores de Sensibilidade Ambiental (ISA), compostos por variáveis socioambientais que representam as características intrínsecas das subáreas e possam ser representadas espacialmente (ex: índice de qualidade da água, tipo de solo, riqueza de espécies, entre outros). Assim, no contexto do Manual, as áreas de sensibilidade representam a capacidade natural de reagir, de forma positiva ou negativa, a determinada ação humana. No entanto, no presente estudo, essa característica é atribuída ao conceito de fragilidade ambiental.

Já a fragilidade ambiental, segundo o Manual de Inventário Hidroelétrico (BRASIL, 2007), resulta da integração espacial dos indicadores de sensibilidade ambiental com os de impacto ambiental. Representa, portanto, a incidência das diferentes intensidades dos impactos identificados sobre as áreas de diferentes sensibilidades ambientais. Assim, para o Ministério de Minas e Energia (MME), a fragilidade é resultante de uma ameaça, representada pelos impactos ambientais oriundos da implantação de empreendimentos hidrelétricos, sobre determinada área com diferentes sensibilidades. Já no presente estudo, esse conceito é associado à vulnerabilidade.

### 3.1.2. Clima

Em geral, tempo e clima são termos usados de maneira errada e costumeiramente confundidos. Dias e Silva (2009) explica que o tempo é o que sentimos no dia a dia, as chuvas, o calor, o frio, é o que vemos acontecer na atmosfera, enquanto o clima é caracterizado, pela média das condições do tempo ao longo do período de algumas

décadas. Geralmente, se usa um período de 30 anos, para se definir o clima de um determinado local.

Em se tratando de clima, também se faz necessário esclarecer os termos: extremos climáticos, variabilidade climática e mudança climática. Em Meteorologia, os extremos climáticos estão relacionados a fenômenos que acontecem com baixa frequência, mas que, em geral, ocasionam impactos negativos a sociedade (FERRAZ; REBOITA; AMBRIZZI, 2015). De acordo com o IPCC (2012), um evento climático extremo é aquele que raramente ocorre em determinado local e época do ano. Porém, as definições de raro variam e nem todo evento extremo pode ser associado às mudanças climáticas, pois existe a chance de este ter ocorrido de forma natural. Todavia, se a ocorrência deste evento persistir por determinado tempo, gerando um padrão, ele pode ser classificado como evento climático extremo (IPCC, 2012). Já a variabilidade climática diz respeito às variações na situação do clima, tanto temporal quanto espacialmente, podendo ser atribuída a processos internos ou externos, sendo eles naturais ou antropogênicos (IPCC, 2012). Enquanto a mudança climática é caracterizada como uma mudança no estado do clima, identificada por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades climáticas e que perdura por um período de décadas ou mais. Estas mudanças podem ser devidas a processos internos ou externas naturais, ou ainda, devido à forçantes antropogênicas, com persistentes alterações na composição da atmosfera ou no uso da terra (IPCC, 2012).

Em se tratando de mudança do clima, o IPCC (2012) define a capacidade de adaptação como sendo a combinação dos pontos fortes, características e recursos disponíveis para um indivíduo, comunidade, sociedade ou organização, a qual pode ser usada para preparar e realizar ações que possam reduzir o potencial de destruição ou explorar oportunidades que resultem em benefícios. Vale destacar, que medidas de adaptação são diferentes de medidas de mitigação. Medidas de adaptação visam enfrentar os impactos das mudanças climáticas, estabelecendo medidas imediatas para se conviver, da melhor maneira possível, com a ocorrência de determinado evento,

enquanto que medidas de mitigação buscam reduzir ou eliminar estes impactos, por exemplo, por meio de estabelecimentos de metas e prazos (JACOBI; GRANDISOLI; TOLEDO, 2015).

Adaptar-se às mudanças climáticas implica em adotar as medidas apropriadas para restringir seus efeitos negativos ou explorar oportunidades, as quais variam de opções tecnológicas a mudanças de comportamento (UNDP, 2017). O PNMC (2008) diz que a capacidade de adaptação de um sistema depende essencialmente de duas variáveis: a vulnerabilidade e a resiliência. Define a vulnerabilidade como sendo “o reflexo do grau de suscetibilidade do sistema para lidar com os efeitos adversos da mudança do clima”, e a resiliência como a “habilidade do sistema em absorver impactos preservando a mesma estrutura básica e os mesmos meios de funcionamento”. Já o IPCC (2012, 2014) define a vulnerabilidade como a propensão ou predisposição a ser adversamente afetada, englobando os componentes básicos de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Esses componentes são capazes de influenciar a vulnerabilidade e podem aumentá-la ou diminuí-la de acordo com características inerentes ao sistema humano ou natural de interesse (MENEZES et al., 2018). Com relação à resiliência, o IPCC (2012) como a capacidade de um sistema social ou ecológico de antecipar, absorver, acomodar ou recuperar-se dos efeitos de um evento de perigo, de maneira aceitável e eficiente.

Há também a necessidade de se abordar os riscos associados ao clima, os quais são ocasionados por uma variedade de fatores e ameaças, tanto de origem natural quanto de humana. Alguns destes riscos demoram mais tempo para se manifestar, como é o caso dos riscos de mudanças na temperatura e precipitação, que acarretam a secas ou perdas agrícolas, enquanto outros riscos se apresentam de forma mais rápida, como exemplos, as tempestades tropicais e inundações (UNDP, 2017).

Segundo Marengo (2008), uma crise potencialmente catastrófica pode ser induzida pela combinação das alterações do clima, na forma de pouca/falta de chuva,

acompanhada de altas temperaturas, altas taxas de evaporação e a competição por recursos hídricos.

### 3.1.3. Desastres naturais

Nos últimos anos, os desastres naturais tornaram-se cada vez mais regulares no cotidiano da população mundial e, em todos os continentes, houve eventos naturais adversos que ocasionaram em desastres com consequências, sobretudo, para a vida humana (RIBEIRO; VIEIRA; TÔMIO, 2017). Conforme Moura e Silva (2008), os eventos naturais somente se convertem em desastres quando os seres humanos que residem na área de ocorrência do evento são afetados.

Vale advertir que desastres naturais são distintos de mudanças climáticas, não sendo obrigatoriamente relacionados. Já que desastres naturais são causados pelo impacto de um fenômeno natural de grande intensidade sobre uma determinada área ou região. Entre eles, podem ser citados: terremotos, maremotos, tsunamis, erupções vulcânicas e até mesmo quedas de meteoritos. Sua ocorrência e sua intensidade não estão ligadas às mudanças climáticas, porém, podem ou não ser agravados pelas atividades antrópicas. Portanto, as pessoas mais vulneráveis a desastres naturais, são aquelas que não estão preparadas para a ocorrência de eventos naturais. Em geral, os impactos dos eventos naturais na sociedade são agravados pelo modo de uso e ocupação do solo, pela qualidade construtiva e pela presença ou ausência de infraestrutura adequada (MOURA; SILVA, 2008).

### 3.1.4. Desastres tecnológicos

Desastres tecnológicos são definidos como episódios provenientes do uso do conhecimento científico (LIEBER; ROMANO-LIEBER, 2005), consequentes de acidentes envolvendo substâncias químicas, radioativas ou equipamentos perigosos (CRID, 2001). Como exemplos, podem ser citados derramamentos de óleo no golfo do México em 2010, os casos das usinas nucleares de Chernobyl (Ucrânia) em 1986 e Fukushima (Japão) em 2011, o caso do césio 137 em Goiânia em 1987 e o caso da

barragem do fundão em Minas Gerais em 2015. Estes desastres trazem enormes danos ao meio ambiente, sendo que alguns destes podem ser irreversíveis, ou demorar muitos anos para o meio ambiente se recompor.

### **3.2. Vulnerabilidade socioeconômica**

#### **3.2.1. Insegurança alimentar**

A insegurança alimentar não engloba apenas a insegurança humana, mas também a animal, a qual também pode estar intimamente ligada à insegurança alimentar humana, que depende de vários produtos de origem animal. Os grupos mais vulneráveis à insegurança alimentar e nutricional coincidem com aqueles grupos tradicionalmente mais afetados pela fome, que se encontram, na sua grande maioria, no meio rural e, são crianças, mulheres (viúvas, grávidas), idosos e pequenos agricultores (FAO, 2011).

Com a tendência do aumento da temperatura devido às mudanças climáticas, várias culturas produzidas no Brasil podem perder partes consideráveis de suas áreas potenciais para o plantio (alterando fortemente a geografia da produção agrícola) e pode gerar perdas nas safras de grãos de R\$ 7,4 bilhões já em 2020 (podendo chegar a R\$ 14 bilhões em 2070) (PINTO et al., 2008). Estima-se também, o aumento de eventos extremos de precipitação no Sul e Sudeste do Brasil, com isso tempestades de granizo, geadas, enchentes e inundações, seriam mais frequentes (PBMC, 2014) podendo causar danos à produção e problemas de abastecimento na alimentação.

#### **3.2.2. Humana**

Com relação às mudanças climáticas de origem antrópica, antagonicamente o próprio homem é um dos primeiros alvos dos impactos dos desequilíbrios ambientais por ele originados. A população, principalmente de áreas urbanas, são as que sofrem estes impactos, sejam eles por meio das inundações, dos deslizamentos de terra, do

agravamento de doenças veiculadas por insetos, da carência de água e alimentos e dos deslocamentos de grande número de pessoas (PBMC, 2014).

O UNEP (2002) sugere que existem três fatores principais que contribuem para verificar a vulnerabilidade humana diante das mudanças ambientais: perigo, exposição e capacidade de enfrentamento. Classifica, também, a vulnerabilidade como econômica, social, ecológica ou institucional. Aborda, ainda, oito temas pelos quais o bem-estar humano geralmente é afetado pelas mudanças ambientais, a saber: danos à saúde; perdas/ganhos econômicos; pobreza; insegurança alimentar; perda de patrimônio natural; perda de direitos de propriedade intelectual (*Intellectual Property Rights-IPR*); conflito e; eventos extremos e impactos das mudanças climáticas.

### 3.2.3. Econômica

A vulnerabilidade econômica centra-se sobre os potenciais efeitos negativos de uma gama de fatores, incluindo o tamanho e estrutura da economia, as desvantagens geográficas, a exposição aos riscos ambientais, crescimento econômico e o nível de desenvolvimento (UNEP, 2002; UNDP, 2014). Vale ressaltar que a política local também pode gerar uma vulnerabilidade econômica. As outras formas de vulnerabilidades (ambiental, a desastres naturais, a desastres tecnológicos, a insegurança alimentar e humana), que foram apresentadas anteriormente, também podem estar associadas à vulnerabilidade econômica.

Segundo Briguglio (2004 apud BRIGUGLIO et al., 2008), a vulnerabilidade econômica é a combinação do risco de um país ser adversamente afetado por choques externos, com a capacidade de enfrentamento que permite ao país resistir à recuperação desses choques.

## 3.3. Planos Nacionais de Adaptação (PNAs)

O Plano Nacional de Adaptação (PNA), também conhecido como NAP (do inglês National Adaptation Plan) é uma estrutura de estratégia básica, para a obtenção das metas de adaptação para os países em desenvolvimento, visando melhorar o



planejamento e a ação nacional de adaptação dos mesmos, através da coordenação de apoio bilateral e atores nacionais (NAP GLOBAL NETWORK, 2018a). A rede global do PNA foi criada em dezembro de 2014, durante a 20ª Conferência das Partes (COP 20) em Lima, no Peru. Possui como integrantes, quase 30 países em desenvolvimento, envolvidos na criação e implementação de planos nacionais de adaptação, em que o financiamento inicial dessa rede é fornecido pelo Departamento de Estado dos Estados Unidos e pelo Ministério Federal de Cooperação Econômica e Desenvolvimento BMZ da Alemanha, visando a implementação de ações de adaptação dos países em desenvolvimento, para abordar as prioridades identificadas por meio dos processos do PNA (NAP GLOBAL NETWORK, 2016b).

Um princípio orientador dos processos do PNA é que ele “visa aumentar a consistência da adaptação e planejamento de desenvolvimento nos países, ao invés de duplicar esforços”. Dessa forma, é de relevante importância a elaboração de um inventário, que inclua a identificação de atividades presentes e passadas de adaptação, com agências e ministérios responsáveis pelos setores sensíveis ao clima, o qual deve ajudar no entendimento da capacidade de adaptação atual, dos planos institucionais e do planejamento e, das atividades de adaptação do país (PRICE-KELLY; HAMMILL, 2015). Os países que participaram do primeiro Fórum de Tópicos Específicos da Rede Global do PNA estão adotando diferentes métodos para começar uma integração da adaptação no planejamento setorial e, em alguns destes países, segundo Price-Kelly e Hammill (2015), os próprios setores já estão tomando medidas para lidar com as considerações de adaptação, no planejamento e na criação de políticas setoriais.

## 4. VULNERABILIDADE ENERGÉTICA

### 4.1. Políticas e ações para enfrentamento das mudanças climáticas

As partes interessadas do setor de energia, incluindo governos, reguladores, empresas de energia e instituições financeiras (bancos, seguradoras, investidores) precisam internalizar os conceitos de resiliência e adaptação às mudanças climáticas,



bem como identificar as ações necessárias para enfrentar esses desafios. Nesse sentido, a Agência Internacional de Energia - IEA (2015) ressalta as seguintes mensagens chaves para tornar o setor de energia mais resiliente:

- O setor deve identificar e avaliar como os impactos da mudança climática podem afetar a oferta, os padrões de demanda e danificar a infraestrutura. Como exemplo, cita-se o caso do furacão Sandy que atingiu Nova York e a costa leste ao redor em 2012, causando falta de energia para oito milhões de moradores e prejuízos da ordem de 50 bilhões de dólares. No mesmo ano uma monção atrasada e ondas de calor na Índia causaram grandes apagões (afetando quase metade da população do país). Em 2015, o Brasil e a Zâmbia sofreram uma forte seca, ocasionando um déficit da ordem de 560 MW na Zâmbia (cerca de 25% da capacidade total do país), e alto índice de despacho termelétrico de combustíveis fósseis no Brasil. Esses eventos são um aviso prévio do tipo de impactos que podem ser esperados de um clima em mudança. Para lidar com esses desafios o setor de energia deve ser mais resiliente e fazer esforços para adaptar-se às mudanças climáticas.
- Os sistemas de suprimento de eletricidade e combustível devem tornar-se mais resilientes às condições climáticas extremas e às restrições crescentes nos recursos hídricos. Os impactos das alterações climáticas constituem um novo desafio para a segurança energética, nomeadamente para a disponibilidade ininterrupta de fontes de energia a um preço acessível. Interrupções de curto prazo devido a eventos climáticos extremos já causaram perdas multibilionárias para os países afetados. A crescente escassez de água devida ao aquecimento global e a crescente demanda são sérias preocupações para o setor de energia em muitos países ao redor do mundo.
- As empresas são os principais atores na concepção e implementação de medidas de construção de resiliência e práticas adaptativas, devendo utilizar ferramentas de avaliação e gerenciamento de risco para identificar riscos físicos e financeiros e para determinar estratégias e planos de investimento

relevantes. O gerenciamento de riscos é essencial para a tomada de decisões nos negócios e tornar ativos e operações resilientes à mudança climática.

- Os governos devem incentivar ações de fortalecimento da resiliência e também ter um papel de implementação, tanto no apoio a situações de emergência como na gestão de seus próprios ativos de energia. Incertezas em relação ao momento, magnitude e localização dos impactos previstos complicam o desenvolvimento de estratégias de resposta efetivas pelas empresas. Os governos devem desempenhar um papel ativo, criando um ambiente favorável que facilite as ações de fortalecimento da resiliência dos negócios, desenvolvendo políticas estimulantes e solidárias e também por meio do exemplo, integrando as preocupações futuras do clima com as ações de planejamento. Além disso, os próprios governos são importantes para proteger e apoiar a recuperação de ativos.

As secas que ocorreram no Brasil e na Zâmbia em 2015 e os furacões nos Estados Unidos mostraram que países em diferentes estágios de desenvolvimento econômico são vulneráveis a condições climáticas extremas e enfrentam o desafio de tornar seus setores de energia mais resilientes. Embora o desafio seja comum, as respostas precisam ser localizadas e dependerão dos impactos e da natureza do sistema energético. Serão necessárias várias abordagens, incluindo avaliação de riscos, soluções tecnológicas e práticas de gestão flexíveis adaptadas, bem como medidas de preparação para emergências. As respostas políticas, institucionais e funcionais serão necessárias para facilitar esses processos. Estratégias e planos de ação nacionais, regionais e setoriais precisam ser desenvolvidos para orientar as ações necessárias de adaptação e fortalecimento da resiliência de maneira informada e coordenada. Alguns países necessitarão de assistência técnica e ajudarão na capacitação da comunidade internacional para se envolver efetivamente nessas atividades. Os Planos Nacionais de Adaptação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) fornecem um mecanismo útil para identificar prioridades.

Segundo o IEA (2015), para mitigar a mudança climática, o suprimento de energia do futuro precisará depender mais de tecnologias de baixo carbono que limitam o uso de combustíveis fósseis e emitem muito menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Neste contexto, é importante explorar o nexo de mitigação-adaptação ao clima. A seguir, são apresentados exemplos de possíveis benefícios e desafios para a resiliência do setor de energia que podem ser esperados de um sistema de energia mais descarbonizado, caracterizado pela utilização de energia renovável e de tecnologias de baixo teor de carbono, pela melhor eficiência energética e pelo gerenciamento da demanda.

1. O aumento da eletricidade de baixo carbono e o subsequente deslocamento de óleo pela eletricidade podem reduzir a exposição a perturbações no fornecimento global de combustível (causadas por eventos climáticos extremos e estresse hídrico), enquanto que a expansão da geração e da infraestrutura T&D podem criar novas exposições que precisam ser avaliadas;
2. O aumento de energia renovável geralmente pode reduzir a demanda de água em comparação com a energia térmica, entretanto podem surgir novos desafios com relação à energia solar de concentração de água e à produção de bioenergia. A produção de energia renovável variável (por exemplo, eólica e solar) está sujeita a riscos de intermitência no fornecimento da fonte que podem ser exacerbados pelas mudanças climáticas. Por outro lado, essas fontes são frequentemente associadas a uma geração mais distribuída, criando uma profusão de fontes de eletricidade e uma maior capacidade de localizar e amortecer interrupções;
3. Melhor gerenciamento do lado da demanda e eficiência energética podem levar a uma maior capacidade de resposta às mudanças na demanda e na oferta (incluindo aquelas causadas pelas mudanças climáticas) e à redução da demanda de água. Usinas de energia mais eficientes usam menos água para resfriamento, enquanto a eficiência energética do lado da demanda compensa a necessidade de adições de capacidade de eletricidade e, por sua vez, de água

adicional para resfriamento. No entanto, a nova infraestrutura de rede inteligente pode estar exposta a novos riscos como de ataques cibernéticos;

4. Tecnologias de energia com baixo teor de carbono, como usinas nucleares e movidas a combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS), podem fornecer energia confiável e reduzir a vulnerabilidade das usinas renováveis intermitentes. No entanto, o crescimento da energia nuclear pode resultar no aumento da demanda de água de resfriamento, bem como no aumento das preocupações de segurança pública com o aumento dos riscos climáticos extremos. A demanda de água de usinas de energia com CCS pode quase dobrar em comparação com plantas não-CCS.

As empresas, bem como os governos, utilizam ferramentas de avaliação e gestão de risco para identificar riscos físicos e financeiros e determinar estratégias e planos de investimento relevantes. O gerenciamento de riscos é essencial para a tomada de decisões nos negócios. No entanto, para tornar os ativos e as operações resilientes aos impactos das mudanças climáticas e adaptá-los a mudanças futuras, as empresas e as agências governamentais precisam avaliar os riscos dos futuros impactos das mudanças climáticas.

As recomendações da Agência Internacional de Energia - IEA (2015) incluem as seguintes medidas:

1. Avaliação de riscos, auditoria e relatórios: A autoavaliação e o relato dos riscos climáticos futuros e seu gerenciamento são um exercício útil para agências governamentais e empresas. Os investidores precisam realizar avaliações de risco de impacto das mudanças climáticas para antecipar os riscos futuros representados por um clima em mudança. Os governos poderiam catalisar tais avaliações, exigindo-as como parte dos processos de licenciamento de novos projetos de infraestrutura e grandes *retrofits*. Por exemplo, o Reino Unido solicita que empresas estratégicas conduzam a autoavaliação de riscos climáticos a cada cinco anos. O *Carbon Disclosure Project* incentiva as empresas

- públicas e seus fornecedores a divulgar os riscos e as oportunidades da mudança climática, incluindo os riscos físicos das mudanças climáticas, aos investidores institucionais. A auditoria de risco climático também poderia ser introduzida para encorajar avaliações regulares e recomendar medidas de melhoria de resiliência de ponta;
2. Prevenção de riscos: Embora nem todos os riscos possam ser evitados, as medidas preventivas minimizam os riscos residuais. De acordo com a Swiss RE, até 65% das futuras perdas relacionadas ao clima podem ser evitadas usando medidas de adaptação custo-efetivas / práticas adaptativas;
  3. Preparação e resposta a emergências: Uma vez identificados os riscos, medidas precisam ser desenvolvidas para gerenciar os riscos previstos. Medidas emergenciais de preparação e resposta permitem reações organizadas e coordenadas a desastres. Governos e empresas precisam trabalhar juntos para garantir o funcionamento de ativos estratégicos e uma recuperação rápida da emergência. A AIE conduz preparação dos países membros para situações de emergência que afetam o fornecimento de energia;
  4. Seguro: O seguro é uma ferramenta crítica para o compartilhamento de riscos, mantendo a estabilidade econômica e motivando a construção de resiliência e o comportamento preventivo de risco. A indústria de seguros tem um interesse comum em limitar os danos causados pela mudança climática. A cobertura de clima é um produto de seguro emergente, com pagamentos baseados em eventos climáticos mensuráveis e não em avaliações de perdas individuais. Complementaridades entre produtos de seguros garantidos pelo governo e produtos privados podem ser úteis.

As ações das empresas para responder às diversas ameaças representadas pelas mudanças climáticas podem ser categorizadas como:

- a) Medidas técnicas e de gestão;
- b) Medidas tecnológicas e estruturais;

- c) Treinamento;
- d) Ações de recuperação.

É importante documentar experiências de todo o mundo e compartilhar as melhores práticas. A seguir, estão alguns exemplos de práticas adaptativas emergentes realizadas pelas empresas para cada categoria.

- a) Medidas técnicas e de gestão: Exemplos incluem programas para gerenciar a poda de árvores próximas a linhas de transmissão e distribuição; instalação de as redes de transmissão e distribuição subterrâneas; instalação de sistemas de *backup* de bombeamento para permitir o bombeamento de água quando os níveis de água estiverem baixos; fabricação de postes de material mais resistentes do que a madeira ou reforçados; modificação da localização da infraestrutura no planejamento de novos empreendimentos em função das condições climáticas; realização de previsão de carga usando informações climáticas; modelagem de impactos climáticos em ativos existentes e no planejamento considerando serviços meteorológicos; avaliação e simulação de dados hidrológicos para o planejamento; gerenciamento do lado da demanda pode ser crítico para lidar com interrupções de eletricidade da hidrelétrica; reciclagem de água para lidar com a escassez de água quando possível: algumas empresas usam águas residuais municipais, águas salobras ou marinhas em vez de água doce escassa. Há também tentativas de realizar fraturamento hidráulico sem água (por exemplo, com propano ou CO<sub>2</sub>).
- b) Medidas tecnológicas e estruturais: As boas práticas incluem a fortificação de infraestruturas costeiras contra inundações e aumentos do nível do mar; projetos de turbinas eólicas mais robustas para gerenciar melhor as altas velocidades do vento; modificação de materiais de tubulação para resistir a eventos climáticos extremos e flutuações de temperatura; o uso de tecnologias aprimoradas que aumentam a eficiência energética e de uso da água dos processos energéticos é outra medida adaptativa, benéfica tanto para os

setores de água quanto de energia; novas tecnologias para reduzir o consumo de água e melhorar a reutilização da água também desempenham um papel importante; introdução de sistemas de resfriamento aprimorados pelas centrais térmicas, como os sistemas de resfriamento circulantes, menos vulneráveis a modificações na disponibilidade de água do que sistemas de resfriamento de passagem única; refrigeração a ar (ou resfriamento “seco”) ajudam a reduzir as perdas por evaporação e não usam água no processo, mas requerem energia extra (da ordem de 5% a 7%) e podem não ser adequadas para a recuperação de plantas existentes; microrredes e geração distribuída fornecem opções para melhorar a resiliência; as conexões inter-regionais podem ajudar os países a extrair energia de áreas não afetadas; os depósitos de água subterrânea também foram testados para garantir a disponibilidade de água para usos críticos em situações de emergência causadas por níveis de água extremamente baixos (por exemplo, a técnica de armazenamento e recuperação de aquíferos (ASR) que tem sido usada nos Emirados Árabes Unidos);

- c) Treinamento e educação: O treinamento de equipes de resposta a emergências é imprescindível para uma resposta rápida e adequada no caso de um desastre, e também para ações rápidas de reparo e restauração. O treinamento para gerenciamento de dados, modelagem, previsão e projeção é necessário para começar a integrar as projeções do clima no planejamento do sistema de energia. Essas atividades podem ser organizadas em cooperação com programas de capacitação liderados pelo governo;
- d) Ações de recuperação: Embora a robustez seja um elemento importante de resiliência, as rupturas do lado da oferta podem ser inevitáveis em certos casos. Assim, a capacidade de gerenciar operações durante um evento climático extremo e ações de recuperação eficientes são importantes e precisam ser pensadas através de antecedência. Uma estratégia importante para as empresas é desenvolver planos de logística e *backup* para fornecer



uma recuperação rápida das interrupções de fornecimento. Esses incluem pré-implantação de resposta de emergência abrangendo veículos, equipes de treinamento para ações específicas de recuperação e desenvolvimento de estratégias de recuperação. As atividades nessa área concentram-se na redução do período necessário para se recuperar de um evento climático extremo. Novas práticas de gerenciamento usando medidores inteligentes e dispositivos de comutação automatizados que permitem tempos de recuperação mais rápidos de interrupções também são usados.

Em 2017, foi desenvolvido pelo Grupo de Energia da APEC (*Asia-Pacific Economic Cooperation*) um projeto visando prover diretrizes para o aprimoramento de resiliência no setor energético, com foco nos sistemas isolados (*off-grid*) de seus países membros<sup>1</sup> - APEC (2017), abrangendo a definição de parâmetros, estruturas, melhores práticas e casos de estudos. As diretrizes basearam-se em quatro áreas principais de mecanismos viabilizadores apresentadas a seguir.

1. Alinhamento de Políticas e Regulamentos;
2. Reavaliação dos Arranjos Institucionais;
3. Elaboração de Programas e Projetos;
4. Avaliação dos Mecanismos de Financiamento.

As diretrizes para cada uma das quatro áreas de mecanismos viabilizadores estão sumarizadas a seguir:

1. Alinhamento de Políticas e Regulamentos: As diretrizes concentram-se em como as políticas podem ser traduzidas para atividades, projetos, mudança de comportamento ou investimentos para promover a resiliência:
  - a. Reconhecimento dos impactos das mudanças climáticas nos planos e políticas nacionais e setoriais;

---

<sup>1</sup> Austrália, Brunei Darussalam, Canadá, Chile, China, Indonésia, Japão, Coréia, Malásia, México, Nova Zelândia, Papua Nova Guiné, Peru, Filipinas, Rússia, Cingapura, Taipei, Tailândia, Estados Unidos, Vietnã



- b. Realização de inventário e avaliação de políticas existentes, identificando lacunas e inconsistências, e se necessário formular novas políticas;
  - c. Avaliação da vulnerabilidade nacional e local ao impacto das mudanças climáticas;
  - d. Formulação e imposição de padrões mais altos de projeto (infraestrutura);
  - e. Consideração da resiliência em subsídios, nas concessões e incentivos governamentais.
2. Reavaliação dos Arranjos Institucionais: As diretrizes concentram-se em arranjos, mecanismos e melhores práticas coordenativas estabelecidas em diferentes organizações ou setores e que resultaram em melhor resiliência energética abrangendo as seguintes ações:
- a. Revisão dos arranjos institucionais existentes;
  - b. Fortalecimento da rede multisetorial e cooperação das Agências governamentais e privadas;
  - c. Empoderamento e a mobilização das comunidades.
3. Elaboração de Programas e Projetos: Incluiu iniciativas reais em diferentes partes da cadeia de fornecimento de energia, desde a geração até o usuário final:
- a. Ênfase na integração da resiliência durante a fase de desenho do projeto (infraestrutura) e no desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis;
  - b. Aplicações de uso produtivo de energia e parcerias público-privadas;
  - c. Atividades técnicas não relacionadas à infraestrutura, como manutenção preventiva ou antecipatória.

4. Avaliação dos Mecanismos de Financiamento: As diretrizes concentram-se nas fontes e mecanismos de financiamento que apoiam especificamente o desenvolvimento da resiliência energética. Embora haja uma ampla gama de fundos de financiamento para energia tradicional, energia renovável e desenvolvimento de eficiência energética, o financiamento de medidas específicas de resiliência de energia precisa ser melhor definido e apoiado. As discussões abrangem pontos chave ou experiências reais sobre como a resiliência energética pode ser integrada aos modelos financeiros ou ao fluxo de investimentos de projetos de energia abrangendo:
- a. Avaliação das necessidades de financiamento;
  - b. Levantamento do Inventário de mecanismos de financiamento;
  - c. Definição dos requisitos de elegibilidade para financiamento e condições de acesso aos fundos climáticos.

Além dessas medidas, o trabalho destaca a importância do equilíbrio do consumo de água e energia para tornar as instalações energéticas resistentes e sustentáveis. Com o uso de enormes quantidades de água na geração de energia, na extração, transporte e processamento de combustíveis e no cultivo de matérias-primas de biomassa, há uma necessidade de reconhecer e lidar com os impactos climáticos sobre os recursos hídricos, bem como confrontar a questão da extração excessiva de água para energia. Dessa forma, devem ser avaliados os problemas de energia hídrica e desenvolvidos protocolos para gerenciamento da água e dos recursos energéticos.

Em termos da incorporação da resiliência de energia nas políticas, planos e projetos, a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OCDE (2015) identifica uma série de prioridades, tais como tornar as informações relevantes sobre o clima mais comuns e utilizáveis como base para o planejamento e a tomada de decisões e disseminação de melhores práticas. Além disso, recomenda a aplicação consistente de uma “lente” climática que permita ao formulador de políticas discernir se uma política, um plano ou um programa está em risco devido às mudanças

climáticas e, conseqüentemente, decidir sobre o trabalho que precisa ser feito para mensurar a extensão do risco e identificar medidas práticas de mitigação.

Os governos precisam criar estruturas facilitadoras para viabilizar a construção de resiliência, o que implica na criação de condições favoráveis para as empresas agirem. As atividades governamentais e de negócios que aumentam a resiliência às mudanças climáticas podem ser facilitadas pelo acesso à informação (por exemplo, dados climáticos, resultados de pesquisas e serviços climáticos), engajamento de partes interessadas e colaboração, ligações institucionais claras entre os diferentes níveis e domínios dos governos e parcerias públicas-privadas. Alguns exemplos incluem:

1. Informação sobre o clima: Isso inclui a coleta e o rastreamento de dados estatísticos sobre clima, o desenvolvimento de avaliações regionais de vulnerabilidade, o desenvolvimento de cenários de futuros padrões climáticos regionais e locais e a comunicação de dados e informações a todas as partes interessadas;
2. Estratégias e planos de adaptação: Os governos poderiam fornecer orientações gerais ao setor de energia sobre como aumentar sua resiliência aos impactos das mudanças climáticas, aumentar a segurança energética e criar sinergias entre a mitigação e adaptação. Os governos são também os principais intervenientes na promoção da cooperação regional (por exemplo, a Comissão Europeia fornece subsídios para programas regionais) e planos de gestão intersectoriais (por exemplo, o plano de infraestrutura do Reino Unido);
3. Coordenação institucional e parcerias: Requer coordenação entre domínios de políticas (por exemplo, água, transporte, energia) e níveis de governo (por exemplo, entre governos centrais e locais), o envolvimento de organizações não-governamentais e do setor privado e a mobilização de conhecimento científico. Novos links institucionais e informativos devem ser incorporados aos processos estabelecidos de tomada de decisão e gestão. Por exemplo, o Canadá lançou uma plataforma de adaptação em 2012 para promover a

colaboração e produzir informações e ferramentas que poderiam ser usadas por todos os setores e regiões para entender e se adaptar aos efeitos de uma mudança climática. Essa plataforma inclui um grupo de trabalho do setor de energia. As instituições locais desempenham um papel crítico em lidar com impactos específicos de cada localização;

4. Capacitação: A capacitação inclui o intercâmbio de informações e melhores práticas, treinamento para auditoria de riscos e medidas de aprimoramento de resiliência, treinamento para resposta e recuperação de emergências rápidas e treinamento de dados, gestão e previsão. Atenção especial é necessária para capacitação nos países em desenvolvimento. O ambiente capacitador deve apoiar ações de resiliência promovendo maior robustez, facilitando a capacidade de gerenciar operações durante eventos extremos e aumentando a capacidade de se recuperar rapidamente.

#### 4.2. PNA em países em desenvolvimento

De acordo com o PNA (2016), no **Brasil**, para a realização do mapeamento da vulnerabilidade à mudança do clima, foram definidas 11 estratégias setoriais e temática em seu PNA, a partir de um amplo processo de discussão no âmbito do GEx-CIM. Foi analisado, além da determinação legal dos temas setoriais, critérios de divisão de competências no âmbito do Governo Federal, prioridades e urgências em relação às vulnerabilidades, sendo eles: Agricultura\*; Biodiversidade e Ecossistemas; Cidades, Desastres Naturais, Indústria\*; Mineração\*; Infraestrutura (Energia\*, Transportes e Mobilidade Urbana\*); Povos e Populações Vulneráveis; Recursos Hídricos; Saúde\*; Segurança Alimentar e Nutricional e; Zonas Costeiras. Os setores marcados com asterisco, contam com Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima, de acordo Lei 12.187 de 2009 e Decreto 7.390 de 2010.

O princípio do PNA brasileiro consiste na diversificação de fontes, sendo as energias renováveis tratadas com prioridade. Destas fontes, a energia hidrelétrica mostra-se a mais importante e é encontrada em todo o país, possuindo mais hidrelétricas na

região centro sul. Também valem ressaltar outras fontes importantes como a eólica, com grande potencial no Nordeste, Sudeste e Sul do país, biomassa, principalmente encontrada nas regiões do Sudeste e Nordeste, ligada à produção de biocombustível, e solar, com potencial encontrado em todo o país.

Ao se analisar os impactos da mudança do clima sobre o sistema elétrico, é importante destacar que a vulnerabilidade diz respeito à oferta de energia elétrica como um sistema interligado, inclusive considerando os seus aspectos de gerenciamento, sendo assim, é possível determinar as possíveis ações de adaptação.

Tendo isso em vista, o PNA brasileiro lista os aspectos do sistema elétrico que devem ser considerados:

- ✓ Impacto da inserção de novas tecnologias, como por exemplo, veículos elétricos e políticas de eficiência energética;
- ✓ Impacto dos futuros padrões de consumo em construções residenciais e comerciais (habitações e prédios “inteligentes”);
- ✓ Penetração de tecnologias como as redes inteligentes e linhas de transmissão de ultra tensão;
- ✓ Maior penetração da geração distribuída por diferentes fontes, a exemplo da geração fotovoltaica em telhados de edificações;
- ✓ Autoprodução de energia elétrica por grandes consumidores utilizando-se de fontes renováveis e fósseis, como no caso da cogeração a gás natural.

Vale destacar que a segurança energética é um dos principais objetivos do programa de adaptação do setor. Sendo assim, fontes fósseis, mesmo sendo emissores de GEE, cumprem um importante papel, oferecendo a necessária estabilidade requerida ao sistema.

Adicionalmente, condutas propostas poderão orientar programas de capacitação no setor elétrico através do intercâmbio entre países ou inserido em um programa mais

abrangente multilateral no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas. Assim sendo, abaixo são listadas, algumas propostas de diretrizes:

- ✓ Promover maior envolvimento das instituições do setor elétrico ao tema de adaptação visando, quando aplicável, a adequação das políticas institucionais a novos parâmetros climáticos;
- ✓ Aprofundar os estudos de impactos no setor elétrico em regiões específicas, considerando as tendências de alterações climáticas;
- ✓ Estudos dos riscos à infraestrutura do setor de energia face à mudança do clima com vista a aperfeiçoar o gerenciamento das atividades, com foco ao contingenciamento de situações extremas;
- ✓ Avaliar os possíveis co-benefícios e sinergias entre mitigação e adaptação relacionadas às diferentes alternativas aplicadas ao setor de energia;
- ✓ Avaliar, nos casos pertinentes, as interseções quanto às medidas adaptativas entre água, energia, uso da terra e biodiversidade, de forma que se possa compreender e gerir suas interações;
- ✓ Estudos visando definir a necessidade de aperfeiçoamento das ferramentas de planejamento, com vistas a adequar seus parâmetros conforme as alterações dos eventos climáticos verificados com base científica.

O PNA do **Chile** (*Departamento de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente*, 2015) prioriza 9 setores para a elaboração de planos setoriais de adaptação às mudanças climáticas: Silvoagricultura; Recursos hídricos; Biodiversidade; Pesca e aquicultura; Saúde; Energia; Infraestrutura; Cidades e; Turismo. Com relação ao setor elétrico o PNA do Chile diz que, devido ao aumento das temperaturas, são esperadas mudanças no consumo de energia tanto das indústrias quanto nas residências, em virtude do maior consumo de energia nos sistemas de ar-condicionado. Esse fato, somado à redução na geração hidrelétrica, pode motivar um aumento no consumo de outras fontes de energia. Para isto, o PNA menciona algumas medidas que devem ser abordadas:

- ✓ Introduzir medidas para popularizar o desenvolvimento de projetos de eficiência energética;
- ✓ Desenvolver em massa campanhas e programas educacionais em Eficiência Energética (EE);
- ✓ Incentivar a integração das Energias Renováveis Não Convencionais (ERNC - *Energías Renovables no Convencionales*) em conformidade com a Lei de Promoção do NCRE (20/25);
- ✓ Promover a incorporação e utilização de energia solar a nível residencial, tanto em edifícios como em residências.

Segundo o Plano de adaptação do clima **Queniano** (*Kenya National Adaptation Plan*), programas estão em andamento na promoção de energia limpa, eficiência energética e ampliação do acesso à eletricidade o país, dando enfoque na diversificação das fontes energéticas a fim de diminuir sua vulnerabilidade no setor. A inclusão de considerações referente às mudanças do clima em ações setoriais atuais e futuras é necessário para construir uma estrutura resiliente. São citados, como exemplos:

- ✓ Desenvolvimento de energia geotérmica em Olkaria, Menengai, Morendat Malewa;
- ✓ Desenvolvimento de carvão em Lamu, Dongo-Kundu, Kilifi, Kwale, Meru / Isiolo;
- ✓ Projeto de Energia Eólica do Lago Turkana;
- ✓ Instalação de vento e armazenamento de energia em Marsabit;
- ✓ Melhor conexão de eletricidade ao público.

O governo do **Sri Lanka** identifica em seu PNA nove setores, sendo que, indústria, transporte e energia são colocados no mesmo tópico. Geração de energia do Sri Lanka é, em sua maioria hidroelétrica, por esta razão mudanças nos padrões de precipitação teriam um impacto significativo na geração. Padrões de precipitação são cruciais para o fornecimento de matérias-primas para as indústrias agropecuárias. Além disso, a crescente escassez de água e a alta extração de águas subterrâneas poderiam gerar



problemas de abastecimento para a indústria. Por essas razões, o PNA do Sri Lanka visa em especial para o setor energético (CLIMATE CHANGE SECRETARIAT, 2016):

- ✓ Promover uma infraestrutura resiliente ao clima, assim como para as práticas de design de construção, tais como: identificar melhorias de design para setor de transportes, energia e indústria; desenvolver diretrizes; criar consciência entre os planejadores, construtores e operadores de instalações e; desenvolver e conduzir programas de treinamento;
- ✓ Avaliar intervenções adequadas para fortalecer resiliência climática do setor energético e instalações industriais para eventos extremos, tais como: introduzir melhoramentos nas instalações e na distribuição; aperfeiçoamento de equipamentos e instalações e; realocização de instalações se necessário.

O PNA dos países: Brasil, Burkina Faso, Camarões, Chile, Colômbia, Fiji, Quênia, Sri Lanka, Estado da Palestina, Sudão e Togo, encontram-se para download, no site: <http://www4.unfccc.int/nap/Pages/national-adaptation-plans.aspx>.

#### 4.3. PNA em países desenvolvidos

Com relação aos países desenvolvidos, os mesmos já desenvolvem seus próprios programas nacionais, com medidas de adaptação e mitigação.

No **Reino Unido**, trabalhos como o *climate change risk assessment government report* (CCRA) ressalta a geração energética e sua distribuição, as redes estratégicas de transporte e esgotos como estando em risco significativo. Perda ou interrupção de qualquer um destes serviços levaria a graves consequências no funcionamento eficaz das organizações em todos os o país como a perda de telecomunicações e dificuldades com o abastecimento energético e combustível, afetando toda a população.

Levando em conta as evidências da CCRA, o “*Climate Resilient Infrastructure Report*” do governo britânico descreve as principais questões para os transportes, energia, água e Setores de Comunicação, abrangendo três áreas principais:



- ✓ Incorporação de riscos climáticos em estruturas regulatórias;
- ✓ Melhorar a compreensão do risco de falhas em cascata;
- ✓ Fortalecer as ligações entre setores do PNA e trabalhar na melhoria da resiliência na infraestrutura do Reino Unido aos atuais perigos, como os Planos de Resiliência Setorial (SRPs), de modo a incentivar níveis proporcionais de investimento de suas infraestruturas.

Para a energia, o governo britânico toma medidas a respeito de riscos importantes, como danos ou interrupções relacionados com o calor, perdas na transmissão de energia, capacidade de eficiência e possíveis restrições na captação de água para geração de energia.

Com relação à transmissão e distribuição, a Associação de Redes de Energia (ARP) liderou um grupo de trabalho para melhorar a resiliência da subestação; já para a geração de energia, os relatórios produzidos sob o ARP estabelecem trabalhos que estão em andamento para garantir que as usinas geradoras sejam resilientes. Ações preparatórias incluem modelagem de inundação e planejamento sobre a resiliência local, afim de gerenciar medidas contra eventos climáticos extremos. Manutenção e substituição de peças além de uma mitigação dos geradores a perigos decorrentes de condições meteorológicas extremas também se mostra importante (HM GOVERNMENT, 2013).

O governo da **Alemanha** tem como grande preocupação o aumento do consumo de energia pela população na refrigeração das residências no verão e aquecimento no inverno, devido ao aumento dos extremos de temperaturas causados pelas mudanças climáticas. Alterações no ciclo de precipitação também se mostram preocupantes, pois a água utilizada no refrigeração das usinas térmicas (carvão, gás e nuclear) provém, em grande parte, de fontes subterrâneas e seus níveis podem cair preocupantemente de vido a grandes períodos de estiagem. Outra preocupação é como a mudança do ciclo de precipitação afetaria usinas hidrelétricas e, como

extremos meteorológicos mais intensos poderiam prejudicar a transmissão e distribuição de eletricidade.

As mudanças climáticas também podem afetar o rendimento e confiabilidade dos sistemas renováveis de geração de energia, afetando, por exemplo, a produção de biomassa, assim como o potencial eólico e solar. As autoridades federais alemãs levam este aspecto em consideração na futura expansão das fontes de energia renováveis. Por outro lado, um setor energético descentralizado e diversificado poderia ser mais seguro, principalmente se as estruturas de geração forem complementares entre si. Isso é particularmente válido para eventos extremos. O crescente campo da meteorologia energética estuda como a produção de energia renovável pode ser adaptada para alterar as condições climáticas.

Devido à necessidade de identificação e avaliação de riscos de fornecimento e redução os mesmos, o Ministério Federal da Economia Tecnologia criou um grupo de trabalho sobre e "Precauções de Crise na Indústria de Eletricidade". Juntamente com o governo federal, as indústrias de energia discutem cenários e medidas para possíveis crises no *"Energy Industry Act"* e o *"Energy Security Supply Act"*. Porém, o desenvolvimento de estratégias de adaptação às mudanças climáticas no setor elétrico é essencialmente uma tarefa para a própria indústria de energia.

Assim, pretende-se implementar melhor proteção dos edifícios contra aquecimento excessivo, especialmente por meio de isolamento térmico, sombreamento externo e minimização de cargas térmicas internas. Porém sabe-se que este isolamento não será possível em todas as residências, por isso esperasse um aumento no consumo de energia. Além disso, segundo o *German Federal Government* (2008), empresas de fornecimento de energia na Alemanha planejam medidas contra eventos climáticos extremos, por exemplo:

- ✓ Maior proporção (em uma comparação europeia) de seções de cabos para fornecer proteção contra os ventos fortes;
- ✓ Ligações de água de emergência para centrais eléctricas em caso de seca;

- ✓ Desenvolvimento dos sistemas de águas residuais na indústria central de energia;
- ✓ Estabelecimento de forças-tarefa de crise para permitir uma resposta rápida em casos de danos e falhas em eventos climáticos extremos.

#### **4.4. Avaliação e melhoria da resiliência energética a ameaças climáticas**

O sistema elétrico é um elemento do complexo sistema energético de um país ou região. No caso brasileiro, até recentemente, havia um significativo isolamento entre eles, tendo em vista a característica hidrelétrica predominante, a pouca conexão na formação de preços e a pouca elasticidade cruzada da demanda entre os diferentes energéticos. Esse quadro está passando por profundas mudanças, o que exige uma análise integrada do setor elétrico com outros setores energéticos. Assim, a área de energia elétrica pode passar a ser fortemente afetada pelas vulnerabilidades de outros setores energéticos, 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 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 Khamarrazi et al. (2015), que apresenta uma revisão da literatura sobre o tema e que será largamente empregado aqui. O autor destaca, mais uma vez, a 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 (FATH et al., 2015; HOLLING; GUNDERSON, 2002). 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. (HOLLING, 1973).

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 adaptabilidade (FATH et al., 2015; HOLLING; GUNDERSON, 2002). 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 (HOLLING, 1973). 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.

Idealmente, deveria se utilizar uma técnica confiável para quantificar diretamente a resiliência de um sistema, a fim de identificar os atratores em um sistema e o ambiente de resiliência que ele cria. No entanto, na ausência de uma técnica tão direta para estimar a resiliência, pode-se trabalhar com as qualidades de resiliência (BEILIN et al., 2013; ZOLLI; HEALY, 2012). As mais comuns e quantificáveis dessas qualidades incluem modularidade, redundância e feedback regulatório (BIGGS et al., 2015; LEVIN, 1999; MARTIN-BREEN; ANDERIES, 2011). Essas qualidades poderiam ser usadas por formuladores de políticas e profissionais para avaliar medidas para aumentar a resiliência. Khamarrazi et al. (2015) propõe um modelo para isto voltado ao setor energético.

Khamarrazi 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 (EAGLE et al., 2010; GRUBB et al., 2006). 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.

Sterling (1994, 2010) 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 relacionadas do que o vento e o gás natural, por isso contribuem menos para a diversidade geral. O autor argumenta ainda que, embora não exista uma representação matemática que considere todas essas três propriedades da diversidade, o índice Shannon-Weaver é a abordagem mais preferida porque leva em consideração a variedade e o equilíbrio e é dado pela Equação 4, em que  $p_i$  representa a parte da fonte de energia  $i$  no mix de geração de energia em um sistema energético.

$$H = - \sum_i p_i \cdot \ln(p_i) \quad \text{Equação 4}$$

Quanto maior o valor de  $H$ , mais diverso é o sistema avaliado. O índice de Shannon-Weaver foi aplicado para avaliar a resiliência de ecossistemas por ecologistas (ODUM, 1983) e, mais recentemente, para avaliar a distribuição de sistemas de energia em sistemas econômicos (GRUBB et al., 2006; STERLING, 1994; TEMPLET, 1999).

Khamarrazi et al. (2015) sugere que a aplicação do índice de diversidade de Shannon-Weaver no exame da diversidade da energia incorporada no comércio global forneceria informações e visões úteis para que os formuladores de políticas e tomadores de decisões medissem objetivamente a eficácia dos investimentos em recursos energéticos alternativos e renováveis.

Como resultado da globalização, no entanto, a diversidade de geração de energia em nível nacional é insuficiente para examinar os padrões de consumo de energia. A fim de avaliar corretamente a contabilidade socialmente responsável baseada no consumo (*Socially Responsible Consumption-Based Accounting-CBA*) (FORAN et al., 2005; KISSINGER E REES, 2010; MUNKSGAARD E PEDERSEN, 2001), o impacto estimado de uma nação no uso de recursos energéticos deve incluir a energia incorporada em produtos e serviços importados, omitindo a energia incorporada nas exportações. A CBA complementa a abordagem nacional adotada pela Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas e oferece uma compreensão mais genuína das responsabilidades e vulnerabilidades entre os países resultantes de vínculos comerciais. Além disto, contribui com os formuladores de políticas em escolhas e sensibilização (WIEDMANN, 2009).

Finalmente, Khamarrazi et al. (2015) apresenta o resultado do cálculo do índice de Shannon-Weaver para os dez países com maiores PIB (inclusive o Brasil): a Tabela 1 apresenta a matriz de insumos energéticos para a produção de eletricidade; a Tabela 2 apresenta a matriz com os insumos energéticos incorporados (ou embutidos), através da eletricidade, nos produtos consumidos nestes países; a Tabela 3 apresenta a matriz dos insumos energéticos incorporados, através da eletricidade, nos produtos importados por esse país.



**Tabela 1 - Porcentagens de geração de eletricidade de diferentes fontes de energia**

Fonte: Khamarrazi et al. (2015).

Country	Coal	Gas	Nuclear	Oil	Hydro	Bio	Geo	SolarPV	SolarTH	Tide	Waste	Wind	Other
Brazil	2.27	3.48	2.77	3.00	84.02	4.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.27
Russia	16.73	47.94	15.76	1.70	17.63	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
India	66.58	11.71	2.08	1.56	14.82	1.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	0.00
China	80.90	0.93	1.89	1.04	14.76	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00
US	48.70	21.04	19.23	1.80	6.33	1.14	0.39	0.02	0.02	0.00	0.51	0.80	0.03
Japan	27.24	25.45	23.23	13.96	7.42	1.39	0.27	0.18	0.00	0.00	0.64	0.23	0.00
Germany	48.72	12.13	22.06	1.35	4.47	3.04	0.00	0.48	0.00	0.00	1.53	6.23	0.00
UK	34.65	41.78	15.88	1.27	2.25	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	1.33	0.00
France	4.95	3.86	77.17	1.08	11.16	0.35	0.00	0.00	0.00	0.09	0.62	0.71	0.00
Italy	15.84	55.00	0.00	11.28	12.26	1.19	1.77	0.01	0.00	0.00	1.02	1.29	0.33

**Tabela 2 - Percentagens de eletricidade incorporadas em bens e serviços consumidos a partir de diferentes fontes de energia**

Fonte: Khamarrazi et al. (2015).

Country	Coal	Gas	Nuclear	Oil	Hydro	Bio	Geo	SolarPV	SolarTH	Tide	Waste	Wind	Other
Brazil	7.49	5.83	4.08	3.11	75.53	3.43	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.23	0.21
Russia	20.30	44.22	15.77	1.91	17.28	0.13	0.06	0.01	0.00	0.00	0.21	0.10	0.00
India	64.17	12.65	3.08	2.12	14.89	1.68	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	1.34	0.00
China	76.64	3.08	3.22	1.59	14.79	0.37	0.04	0.01	0.00	0.00	0.04	0.22	0.00
US	47.68	20.22	17.69	2.36	9.28	1.11	0.38	0.02	0.01	0.00	0.46	0.76	0.03
Japan	32.50	23.49	20.34	12.02	9.12	1.27	0.28	0.15	0.00	0.00	0.55	0.29	0.00
Germany	44.47	15.33	20.04	2.37	9.98	2.27	0.14	0.29	0.00	0.00	1.08	4.01	0.02
UK	37.54	32.09	15.48	2.44	8.68	1.67	0.11	0.02	0.00	0.00	0.63	1.31	0.02
France	15.00	9.33	58.48	2.02	12.71	0.65	0.08	0.02	0.00	0.06	0.62	1.01	0.02
Italy	24.28	37.97	9.65	7.78	15.73	1.18	1.04	0.03	0.00	0.00	0.85	1.30	0.25

**Tabela 3 - Percentagens de eletricidade incorporadas nas importações de diferentes fontes de energia**

Fonte: Khamarrazi et al. (2015).

Country	Coal	Gas	Nuclear	Oil	Hydro	Bio	Geo	SolarPV	SolarTH	Tide	Waste	Wind	Other
Brazil	30.01	15.95	9.69	3.61	38.90	0.78	0.16	0.03	0.00	0.00	0.24	0.61	0.01
Russia	45.04	18.50	15.84	3.35	14.88	1.02	0.15	0.04	0.00	0.00	0.31	0.83	0.03
India	47.36	19.17	10.05	5.99	15.38	0.90	0.27	0.03	0.00	0.00	0.24	0.59	0.02
China	38.00	22.63	15.32	6.53	15.02	1.08	0.32	0.05	0.00	0.00	0.41	0.64	0.02
US	42.71	16.23	10.19	5.10	23.62	0.97	0.35	0.03	0.00	0.00	0.21	0.59	0.01
Japan	54.35	15.32	8.36	3.93	16.17	0.79	0.33	0.02	0.00	0.00	0.20	0.52	0.02
Germany	38.48	19.85	17.19	3.80	17.75	1.19	0.33	0.02	0.00	0.01	0.46	0.89	0.04
UK	41.49	18.89	14.93	4.03	17.44	1.16	0.25	0.05	0.00	0.01	0.43	1.28	0.03
France	39.20	22.50	13.46	4.29	16.46	1.36	0.27	0.07	0.00	0.00	0.59	1.74	0.05
Italy	34.52	17.28	21.37	3.54	19.93	1.16	0.14	0.06	0.00	0.01	0.64	1.32	0.02

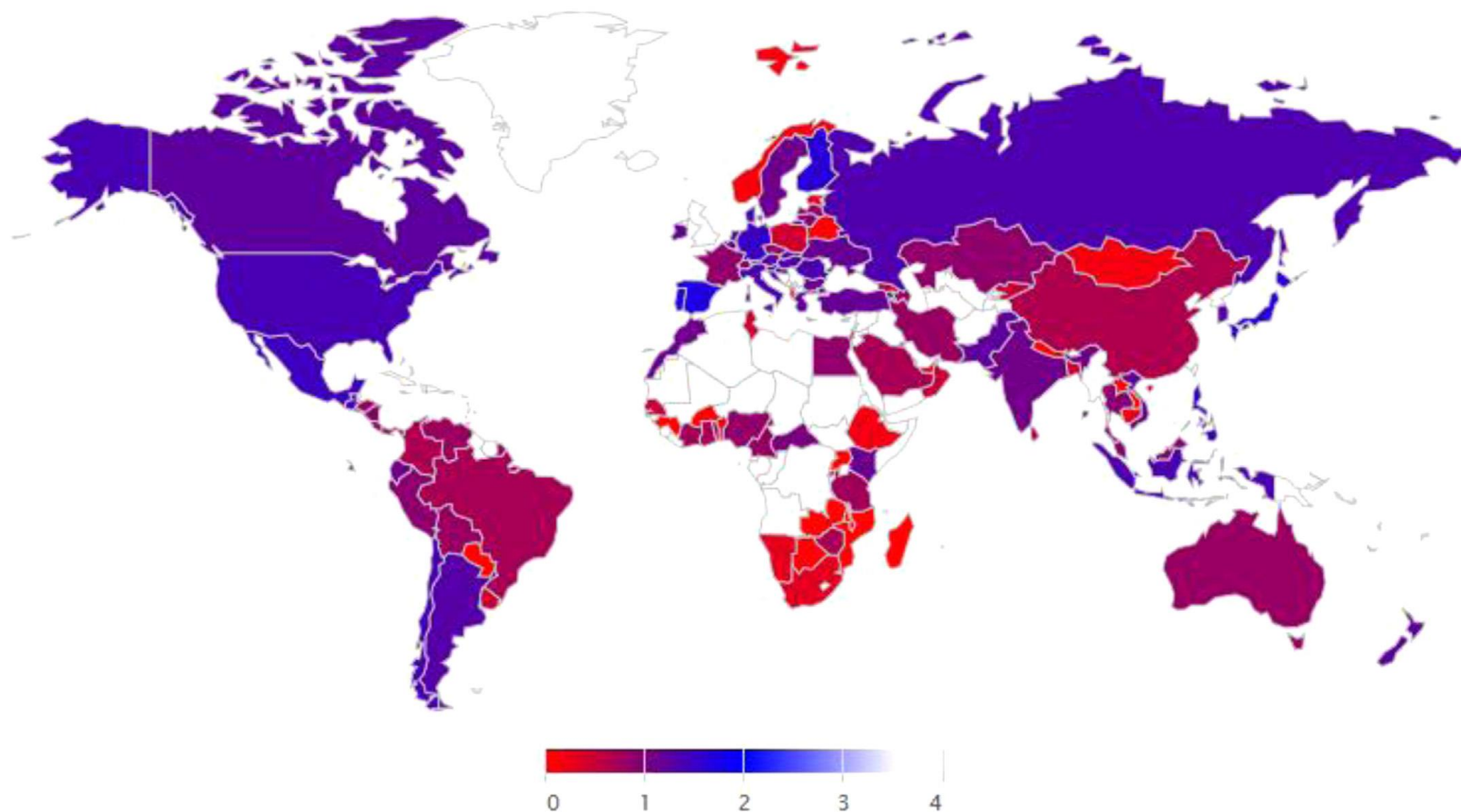
A Tabela 4 apresenta os índices Shannon-Weaver para esses países, considerando a diversidade energética na produção de eletricidade, na energia elétrica importada nos produtos consumidos e na energia elétrica embutida nos produtos importados. Vê-se que, considerando a geração, os países que apresentam melhores índices são Alemanha e Japão, notadamente pelas políticas de desenvolvimento de novas fontes de energia (principalmente renováveis) adotadas nos últimos tempos. O mesmo índice calculado para as importações não apresenta tanta disparidade entre os países, provavelmente pela diversidade de produtos e origens. Sob a ótica do consumo, o Brasil e a China têm índices bem piores que os demais, influenciados pelos índices de produção e pelo fato da importação ter pouca participação no vetor de consumo de sua população. Tomando todos os países, Espanha, Japão e Finlândia (na ordem) são os países com maior diversidade energética na produção de eletricidade. No outro extremo, incluindo todos os países, o Qatar (com base a gás), a Noruega (com base hídrica) e a Polônia (com base em carvão) destacam-se com os piores índices Shannon-Weaver.

**Tabela 4 - Índices Shannon-Weaver para estes países, considerando a diversidade energética na produção de eletricidade, na energia elétrica importada nos produtos consumidos e na energia elétrica embutida nos produtos importados**

Fonte: Khamarrazi et al. (2015).

Country	Diversity of generation	Diversity of imports	Diversity of consumption
Brazil	0.709	1.465	0.960
Russia	1.334	1.481	1.389
India	1.084	1.466	1.151
China	0.649	1.582	0.812
US	1.386	1.495	1.430
Japan	1.642	1.348	1.630
Germany	1.505	1.566	1.580
UK	1.341	1.551	1.493
France	0.861	1.589	1.285
Italy	1.371	1.598	1.642

A Figura 2 apresenta um mapa-múndi da diversidade energética para produção de eletricidade. Esta medida de resiliência ajuda a formular políticas nacionais para suportar ameaças de variação de preços ou das disponibilidades de energia primária (como é o caso da hidroeletricidade face às mudanças climáticas). Esta pode ser uma importante ferramenta para ser incluída em estudos de longo prazo, como em matrizes energéticas.



**Figura 2 - Mapa-Múndi da diversidade energética na produção de eletricidade**  
Khamarrazi et al. (2015).

Um outro trabalho relevante sobre resiliência energética é Roege et al. (2014). Para os autores, a resiliência energética é a capacidade de um sistema de se recuperar da adversidade, ou seja, diferentemente de Khamarrazi et al. (2015) (que se prende à susceptibilidade de ser impactado por uma ameaça), os autores prendem-se à capacidade de reação frente ao dano e que há uma necessidade de métodos para quantificar e medir a resiliência do sistema. A partir de trabalhos anteriores, propõem uma série de métricas relevantes para avaliar a resiliência energética de um sistema. Comentam, ainda, que essas métricas são úteis para implementar um guia para a energia, relacionado ao planejamento, projeto, investimento e operação.

Essas métricas são estruturadas em um formato matricial, em que a primeira dimensão corresponde aos diferentes estágios de mudança do sistema frente a uma perturbação (Figura 3) e a segunda dimensão corresponde aos domínios relacionados aos aspectos de consciência situacional e de tomada de decisão descentralizada (Figura 4). O que se apresenta nesta figura é bastante inovador e relevante, pois põe em destaque não somente os sistemas físico-cibernéticos, mas também os sistemas cognitivos e sociais. Os sistemas cognitivos são aqueles capazes de absorver as informações e, com base nos sistemas físicos, tomar as decisões. A Inteligência Artificial tem-se tornado um aliado imprescindível destes sistemas, sem, contudo, prescindir da inteligência humana contida nos especialistas. Os sistemas sociais têm um caráter mais abrangente e incorporam o que, em última análise, é o foco final da prestação do serviço: a sociedade usuária da infraestrutura e consumidora da energia. Esta sociedade deve ter informação suficiente, organização e meios para responder eficiente e eficazmente aos danos potenciais consequentes de ameaças.

A Tabela 5 apresenta uma de síntese de métricas para aumentar a resiliência energética dentro destas vertentes. Trata-se de uma matriz resultante das dimensões apresentadas acima, em que cada célula pode ser usada para examinar um aspecto limitado de capacidades e posturas, enquanto a estrutura global abrangente fornece o tratamento holístico de sistemas inter-relacionados com objetivos finais que se têm em mente. As métricas de resiliência apresentadas são orientadas para abordar substancialmente a flexibilidade construtiva, o aprendizado e a adaptação, em vez de

enfocar na melhoria da resistência a condições adversas de curto prazo, que normalmente preterem a capacidade dos sistemas de se transformarem no longo prazo.

#### Planejar / Preparar

- Estabelecer as bases para manter os serviços disponíveis e os ativos funcionando durante um evento disruptivo (mau funcionamento ou ataque).

#### Absorver

- Manter a função e a disponibilidade do serviço dos ativos mais importantes enquanto repele ou isola a disrupção.

#### Recuperar

- Restaurar todas as funções e disponibilidade de serviços para a funcionalidade pré-evento.

#### Adaptar

- Utilizar conhecimento do evento para alterar protocolos, configuração do sistema, treinamento de pessoal ou outros aspectos para se tornar mais resiliente.

**Figura 3 - Estágios de mudança**

**Fonte: ROEGE et al. 2014.**

#### Físico

- Recursos físicos e suas capacidades.

#### Informação

- Informação e desenvolvimento de informação sobre o domínio Físico.

#### Cognitivo

- Uso dos domínios de Informação e Físico para tomar decisões.

#### Social

- Estrutura organizacional e de comunicação para tomar decisões cognitivas.

**Figura 4 - Domínios para consciência situacional e tomada de decisão descentralizada**

**Fonte: ROEGE et al. 2014.**



**Tabela 5 - Matriz de resiliência energética**

**Fonte: ROEGE et al. 2014.**

	PLANEJAR E PREPARA PARA	ABSORVER	RECUPERAR DE	ADAPTAR PARA
<b>FÍSICO</b>	Redução da dependência de energia / aumento da eficiência	Definição de margem para acomodar impactos e definições de faixas de condicionais	Flexibilidade do sistema para reconfiguração e / ou instalação temporária	Arquitetura de rede flexível para facilitar a modernização e introdução de novas fontes de energia
	Diversidade de fontes de energia / fontes locais	Degradação limitada do desempenho sob condições variáveis	Capacidade de monitorar e controlar porções do sistema	Sensores, coleta de dados e recursos de visualização para suportar tendências de desempenho do sistema
	Capacidade de armazenamento de energia	Proteção do sistema operacional (por exemplo, alívio de pressão, disjuntores)	Flexibilidade de combustível	Capacidade de usar fontes de energia novas / alternativas
	Redundância de capacidades críticas	Componentes redundantes instalados / prontos (por exemplo, geradores, bombas)	Capacidade de redirecionar a energia de fontes disponíveis	Atualizar a configuração / funcionalidade do sistema com base nas lições aprendidas
	Manutenção preventiva em sistemas energéticos	Capacidade de isolar sistemas / componentes danificados / degradados (automático / manual)	Investigação e reparo de controles ou sensores com defeito	Eliminar ativos obsoletos ou danificados e introduzir novos ativos

	PLANEJAR E PREPARA PARA	ABSORVER	RECUPERAR DE	ADAPTAR PARA
	Sensores, controles e links de comunicação para apoiar a conscientização e a resposta	Capacidade para operação independente local / subrede/microrede	Flexibilidade da rede de energia para restabelecer o serviço por prioridade	Integrar novos padrões de interface e atualizações do sistema operacional
	Medidas de proteção contra-ataque externo (físico / cibernético)	Métodos / equipamentos alternativos (por exemplo, cópia em papel, lanternas, rádios)	Comunicação de backup, iluminação, sistemas de energia para operações de reparo / recuperação	Atualizar equipamentos / suprimentos de resposta com base nas lições aprendidas
<b>INFORMAÇÃO</b>	Capacidades e serviços priorizados com base em requisitos de criticidade ou desempenho	Previsão de condições ambientais e transmissão de avisos de eventos	Informações disponíveis para autoridades e equipes sobre necessidades / status do cliente / comunidade	Início do evento, ponto de entrada do incidente, vulnerabilidades associadas e impactos identificados
	Dependências do sistema internas e externas identificadas	Status do sistema, tendências, margens disponíveis para operadores, gerentes e clientes	Progresso da recuperação rastreado, sintetizado e disponível para tomadores de decisão e interessados	Previsões de dados de eventos e ambiente operacional utilizados para antecipar condições / eventos futuros
	Dados de projeto, controle, operação e manutenção arquivados e protegidos	Dados críticos do sistema monitorados, anomalias com alarme	Dados de projeto, peças de reparo, informações de substituição disponíveis para equipes de recuperação	Informações atualizadas sobre recursos energéticos, alternativas e tecnologias emergentes disponíveis para gerentes e interessados
	Informações do fornecedor	Procedimentos operacionais / de resolução de problemas /	Localização, disponibilidade e propriedade de energia,	Informações de design, operação e manutenção atualizadas de

	PLANEJAR E PREPARA PARA	ABSORVER	RECUPERAR DE	ADAPTAR PARA
	disponíveis	resposta disponíveis	hardware e serviços disponíveis para equipes de restauração	acordo com as modificações do sistema
	Sistemas de controle operacionais e protegidos com antivírus e outras salvaguardas	Os limites de status / tendência acionam salvaguardas e isolam componentes para interromper o efeito cascata	Necessidades de recursos, fontes e autoridades disponíveis para os tomadores de decisão	Conscientização do consumidor / partes interessadas sobre alternativas energéticas, custo / benefício e requisitos de implementação
	Previsões do ambiente operacional capturadas em cenários de planejamento	Informações de status / resposta / mitigação transmitidas de forma eficaz e eficiente às partes interessadas / tomadores de decisão	Informações sobre instalações centralizadas e distribuição de suprimentos e serviços essenciais disponíveis para a comunidade	Impactos na comunidade, prioridades, interdependências atualizadas para capturar as lições aprendidas
	Planos de resposta / recuperação estabelecidos e distribuídos	Coordenação de informações e comunicações em toda a cadeia de suprimentos	Informações de coordenação, comunicações disponíveis entre organizações de recuperação	Planos de resposta atualizados com lições aprendidas
<b>COGNITIVO</b>	Compreender as compensações de desempenho dos objetivos organizacionais	Conscientização e foco de esforços em ativos e serviços críticos identificados	Utilize dados e ferramentas de decisão para selecionar rapidamente as opções de recuperação	Documentar e rever gerenciamento de processos de resposta e tomada de decisão
	Treinamento operacional e de manutenção de base ampla	Protocolo de tomada de decisão ou ajuda para determinar o curso correto de ação	Equipes de recuperação gerenciam a recuperação incremental com equipamentos	Revisitar periodicamente a tolerância ao risco organizacional e as prioridades

	PLANEJAR E PREPARA PARA	ABSORVER	RECUPERAR DE	ADAPTAR PARA
			disponíveis	da missão, ajustando conforme necessário
	Operador periódico, gerenciamento e práticas comunitárias	Operadores e gerentes utilizam o pensamento crítico e mantêm postura proativa para reconhecer e deter eventos	Os membros da comunidade utilizam recursos disponíveis e improvisam para atender às necessidades locais	Integrar lições aprendidas e melhores práticas de fontes internas e externas
	Desenvolver competências individuais em impactos, técnicas e alternativas energéticas (cultura energética)	Resposta da comunidade para mitigar os impactos (por exemplo, redução de demanda)	Os membros da comunidade gerenciam recursos energéticos restritos de forma responsável e consistente com a orientação pública	Clientes e partes interessadas tomam medidas para implementar soluções energéticas mais resilientes
SOCIAL	Identificar as partes interessadas (internas e externas)	Prioridades e limites operacionais mitigam a interrupção das necessidades de energia para as principais funções da comunidade	Organizações de recuperação e comunidades seguem planos de recuperação de contingência	Realocar recursos humanos para melhor lidar com eventos adversos
	Uso de jogos de guerra baseados em cenários para desenvolver a compreensão das dependências e interações do sistema	Ações protetoras predefinidas limitam as influências externas nos domínios físicos e de informação	As partes interessadas da comunidade participam no estabelecimento de prioridades energéticas e na coordenação de ações de restauração	Os governos locais e as partes interessadas mantêm-se informados sobre ameaças, mudança de ambiente, métodos de proteção e tecnologias
	Análise de risco robusta e	O gerenciamento operacional	Abrigos e outros serviços	Governos locais e partes

	PLANEJAR E PREPARA PARA	ABSORVER	RECUPERAR DE	ADAPTAR PARA
	capacidades de suporte à decisão para facilitar a resposta	ágil permite uma resposta rápida e eficaz sob condições variáveis	centralizados aumentam a eficiência e o controle de recursos energéticos escassos para atender às necessidades críticas	interessadas colaboram para desenvolver, priorizar e implementar melhorias no portfólio de energia
	Diminuir a dependência geral de energia ou de fontes específicas de energia	Indivíduos e organizações implementam planos de resposta	Entidades públicas / privadas se coordenam para entregar ajuda às partes afetadas	Incentivar clientes e demais partes para implementar soluções energéticas mais resilientes
	Prioridades e políticas estabelecidas para resposta a eventos	Indivíduos e organizações tomam medidas em resposta a observações e / ou orientações de autoridades	Assistência pró-vizinhança proativa, voluntariado, conformidade com a direção do gerente de resposta de energia	A cultura informada da energia leva a decisões coletivas e investimentos que continuamente melhoram a eficácia energética

## 5. VULNERABILIDADE APLICADA AO SETOR ELÉTRICO

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

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

O entendimento das alterações climáticas e uma maior resiliência às ameaças decorrentes serão essenciais para a viabilidade técnica do setor de energia elétrica e sua capacidade de atender, de forma sustentável, às crescentes demandas de serviços de energia elétrica impulsionadas pelo crescimento econômico e populacional global.

Em uma visão mais ampla, em que as vulnerabilidades do sistema elétrico frente às mudanças climáticas são consideradas pelos agentes na operação e planejamento do sistema elétrico, o *United States Department of Energy* (DOE) (2016) propõe uma abordagem desenvolvimento de um plano de resiliência, dividido em 8 etapas.

1. Definição do escopo do plano de resiliência;
2. Desenvolvimento das entradas para avaliação de vulnerabilidade;
3. Determinação da exposição de ativos e operações;
4. Estimativa das consequências dos impactos das mudanças climáticas;

5. Avaliação de vulnerabilidades;
6. Identificar e avaliar medidas de resiliência;
7. Construção de portfólio de medidas de resiliência;
8. Monitoramento, avaliação e reavaliação do plano de resiliência.

A etapa inicial contempla os esforços para definição do plano de resiliência, abordando a identificação dos elementos de motivação, restrições e partes interessadas. As etapas 2, 3, 4 e 5 compreendem os processos necessários à avaliação da vulnerabilidade, enquanto as etapas 6 e 7 abordam os componentes analíticos das soluções de resiliência. A etapa final direciona uma reavaliação crítica das premissas das etapas anteriores, permitindo a aplicação em um contexto de melhoria contínua.

A seguir, apresenta-se o detalhamento dos objetivos definidos para cada:

1. Definição do escopo do plano de resiliência
  - a. Entender as motivações e as metas para o plano de resiliência;
  - b. Definir um escopo útil e prático;
  - c. Envolver-se com parceiros e partes interessadas que participarão do esforço;
  - d. Caracterizar o nível de detalhe requerido;
  - e. Considerar quais tipos de clima, eventos extremos e de ativos críticos serão abordados;
  - f. Identificar as restrições de custo no desenvolvimento do plano.
2. Desenvolvimento das entradas para avaliação de vulnerabilidade
  - a. Identificar as informações e dados necessários para caracterizar os riscos climáticos futuros e os possíveis impactos;
  - b. Selecionar quais cenários de mudança climática serão considerados;
  - c. Escolher quais projeções climáticas, recursos de dados e ferramentas usar;
  - d. Compreender os benefícios e desafios de gerar novas projeções climáticas;
  - e. Coletar os dados necessários sobre ativos e operações.



3. Determinação da exposição de ativos e operações
  - a. Identificar os tipos de ameaças relacionadas às mudanças climáticas e as vulnerabilidades associadas ao setor elétrico;
  - b. Compreender e identificar métodos para avaliar vulnerabilidades operacionais e de ativos, incluindo triagem e análises detalhadas;
  - c. Entender as considerações de dimensionamento associadas às ameaças climáticas em larga escala;
  - d. Considerar meios para determinar a probabilidade ou severidade de dano ou interrupção, dado um evento climático.
4. Estimativa das consequências dos impactos das mudanças climáticas
  - a. Distinguir entre custos diretos, indiretos e induzidos de impactos climáticos;
  - b. Reconhecer a importância do crescimento dos custos não lineares dos impactos generalizados;
  - c. Identificar metodologias de exemplo para quantificar os custos dos impactos climáticos.
5. Avaliação de vulnerabilidades
  - a. Definir e fixar categorias para consequência e probabilidade;
  - b. Aplicar entradas reunidas em etapas anteriores para distribuir ativos em categorias;
  - c. Desenvolver uma matriz de probabilidade-consequência.
6. Identificar e avaliar medidas de resiliência
  - a. Filtrar os riscos para se concentrar naqueles com maior oportunidade de melhoria de resiliência;
  - b. Identificar opções para melhorar a resiliência;
  - c. Decidir como abordar cada risco;
  - d. Escolher e estimar custos de medidas de resiliência.
7. Construção de portfólio de medidas de resiliência
  - a. Desenvolver critérios para avaliar medidas de resiliência;
  - b. Priorizar e selecionar medidas de resiliência;

- c. Desenvolver um plano de ação;
  - d. Integrar planos de resiliência na tomada de decisão.
- 8. Monitoramento, avaliação e reavaliação do plano de resiliência
  - a. Monitorar o progresso e coletar informações sobre a implementação do plano de resiliência;
  - b. Coletar novas informações sobre impactos e resiliência das mudanças climáticas;
  - c. Avaliar a implementação comparando a experiência e as novas informações às expectativas;
  - d. Reavaliar plano de resiliência usando novas informações e experiência recente.

A Figura 5, extraída do Quadrennial Energy Review (2017), sintetiza uma avaliação integrada dos riscos e de resiliência do setor elétrico.

Ameaça	Intensidade	Transmissão	Geração	Subestação	Distribuição	Distribuição Subterrânea	Armazenamento
Avaliação de Risco e de Resiliência							
<b>Ameaças Ambientais/Naturais</b>							
Furacão	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Seca	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Tempestades (gelo, neve)	Alto	●	●	●	●	●	●
	Baixo	●	●	●	●	●	●
Calor Extremo		●	●	●	●	●	●
Inundações	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Incêndios	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Aumento do nível do mar		●	●	●	●	●	●
Terremotos	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Geomagnetismo	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Vegetação/animais selvagens		●	●	●	●	●	●
<b>Ameaças Humanas</b>							
Física	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Cibernética	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Eletromagnética	Baixo	●	●	●	●	●	●
	Alto	●	●	●	●	●	●
Falha de equipamentos		●	●	●	●	●	●
Ameaças combinadas		●	●	●	●	●	●
<p><b>Níveis de Risco</b></p> <p>○ Baixo</p> <p>● Moderado</p> <p>● Alto</p> <p>○ Desconhecido</p> <p><b>Status atual da prática de Gestão de Risco</b></p> <p>○ Existência de vulnerabilidades</p> <p>● Estabilizado com aprimoramentos</p> <p>● Bem Estabelecido e Robusto</p>							

**Figura 5 - Avaliação Integrada dos riscos e ameaças à Resiliência do Setor Elétrico**

Fonte: Traduzido de Quadrennial Energy Review (2017).

A seguir, propõe-se discutir a vulnerabilidade do setor elétrico<sup>2</sup> frente às mudanças climáticas, fazendo uso de alguns elementos definidos pelo documento do DOE (2016) para identificação das fragilidades e das resiliências dos segmentos do setor elétrico brasileiro, mas sem a pretensão de propor políticas de planejamento.

### 5.1. Mapeamento geográfico das ameaças climáticas para o setor elétrico

Além das alterações na temperatura, ventos e regimes de precipitação, a frequência e intensidade de eventos meteorológicos extremos e desastres naturais podem

<sup>2</sup> Além das mudanças climáticas, o setor de energia está exposto a riscos como ataques cibernéticos, interferências eletromagnéticas e instabilidade e conflitos políticos e sociais.

aumentar em decorrência das mudanças climáticas. Tempestades e enchentes têm afetado o Brasil de forma severa nos últimos anos (ÁVILA et al., 2016).

De acordo com Dias (2011), a partir de registro de jornais, televisão e internet, é evidenciado que a ocorrência de tornados no Brasil tem aumentado nos últimos anos. Apesar de o autor indicar como uma das explicações para esse aumento o crescimento da cobertura e acesso de mídias como televisão e internet, estudos recentes sobre mudanças climáticas sugerem aumentos de eventos extremos de precipitação (CHOU et al., 2014; GROISMAN et al., 2005; MARENGO et al., 2009).

Eventos meteorológicos e alterações climáticas têm impacto em toda a cadeia de produção e consumo de energia. De acordo com Korbátov et al. (2017), cerca de 25% das interrupções no fornecimento de energia elétrica não planejadas nos Estados Unidos, em 2015, foram decorrentes de eventos meteorológicos extremos. As perdas anuais, decorrentes dos desligamentos de energia causados por enchentes, furacões e temperaturas extremas, foram estimadas em mais de 20 bilhões de dólares. Segundo GAO (2014), toda a cadeia de suprimento de energia Norte Americana está cada vez mais vulnerável aos impactos causados por mudanças climáticas. Diferentes componentes do setor elétrico são vulneráveis a diferentes ameaças naturais. Por exemplo, as linhas de transmissão podem ser bastante susceptíveis a desligamentos causados por ventos extremos, raios e queimadas; redes de distribuição podem ser afetadas por tempestades, em decorrência de quedas de postes, raios ou mesmo quedas de árvores sobre fios; alterações nos regimes de vazões e eventos de seca podem comprometer a geração hidrelétrica; a geração solar pode ser afetada pelo aumento da nebulosidade média e cobertura de nuvens, reduzindo a radiação solar total incidente e reduzindo a geração.

O Brasil possui uma matriz elétrica essencialmente renovável e um sistema de transmissão interligando todo o parque gerador. Aproximadamente 60,8% da energia elétrica é produzida a partir de usinas hidrelétrica, 8,7% plantas de biomassa, 7,7% de eólicas e 0,8% de plantas solares (ANEEL, 2018). Dada a importância das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira e as dimensões continentais de seu sistema de

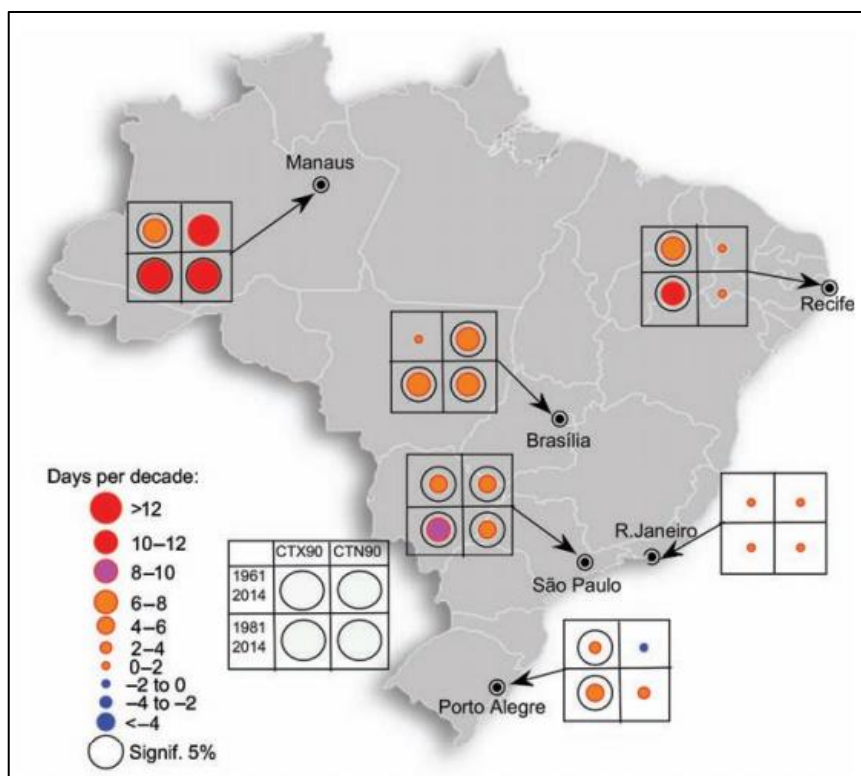
transmissão, é ainda mais importante avaliar as mudanças climáticas no planejamento do setor. Apenas dessa forma será possível aumentar a resiliência do sistema elétrico e reduzir a vulnerabilidade do sistema frente às ameaças climáticas, por meio da diversificação na geração, investimento em tecnologias de componentes de proteção, metodologias de monitoramento e manutenção e até mesmo revisão de normas para avaliação de riscos em novos projetos. Nos próximos tópicos, as principais ameaças climáticas ao setor elétrico serão discutidas em relação à distribuição geográfica e tendências, de acordo com artigos e trabalhos mais recentes sobre o tema.

#### 5.1.1. Aumento da temperatura

Dados observados mostram tendências de aumento da temperatura de superfície média global a partir da segunda metade do século 20 (IPCC, 2014). Para o Brasil, de acordo com Gosling et al. (2011), a análise de dados de temperatura de 1960 a 2010 indicam uma tendência média de aumento (aquecimento) de 0,08°C por década nos verões (considerando intervalo de confiança entre 5 e 95%, correspondente a 0,03 a 0,14°C por década) e 0,08°C nos invernos (intervalo de confiança entre 5 e 95%, correspondente a 0,01 a 0,16°C por década).

Projeções climáticas em escala regional para o Brasil são apresentadas por Chou et al. (2014) para os períodos e 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, utilizando como referência (baseline) o período de 1961 a 1990. Os autores utilizaram o modelo regional Eta com base em dados de modelos climáticos de escala global, para realizar simulações climáticas em escalas mais refinadas (regional), em um processo denominado *downscaling*. Quatro simulações foram realizadas, com base em dois modelos de circulação global, o HadGEM2-ES e o MIROC5, e dois cenários de emissões, RCP4.5 e 8.5. O cenário de emissões RCP4.5 indica uma concentração intermediária de Gases do Efeito Estufa (GEE), enquanto que o RCP8.5 indica um cenário mais pessimista, de alta concentração de GEE. Estas projeções serão aprofundadas no Produto 3.

As tendências de aumento das temperaturas médias são acompanhadas de eventos extremos, com temperaturas significativamente altas em relação a valores climatológicos esperados, chamados de ondas de calor (*Heat Waves – HW*). Estudo recente para caracterização climática de ondas de calor em capitais brasileiras indica tendência de aumento nas ocorrências desses eventos (GEIRINHAS et al., 2017). Os autores utilizaram dados de estações meteorológicas para o período de 1961 a 2014 e a identificação das ondas de calor foi feita com base em dois índices: percentil 90 das temperaturas máximas diárias em uma janela de 15 dias (CTX90pct) e o mesmo para temperaturas mínimas diárias (CTN90pct). Dessa forma, para cada dia, tem-se um valor diferente de percentil para temperaturas máximas e mínimas. Assim, os autores definiram HW como um período de três ou mais dias em que as temperaturas máxima ou mínima nesses dias ficaram acima de CTX90pct e CTN90pct, respectivamente. A cidade de Manaus apresentou a maior tendência de aumento na frequência de ondas de calor, com aumento de mais de 12 dias por década (Figura 6).



**Figura 6 - Tendência de aumento da ocorrência de ondas de calor, em dias por década, para os períodos de 1961-2014 e 1981-2014**

**Fonte: Geirinhas et al. (2017).**

#### 5.1.2. Alterações no regime de chuva e disponibilidade de água

Assim como para a temperatura, as tendências de alterações no comportamento das precipitações decorrentes de mudanças climáticas são avaliadas, em uma escala regional, por Modelos Climáticos Regionais (MCR), como o Eta, por meio da técnica denominada *downscaling*, com o intuito de se obter resultados em uma grade mais refinada. Para isto, esses modelos utilizam como condições iniciais e de fronteiras resultados de Modelos Climáticos Globais (MCG).

Chou et al. (2014) apresenta estudo sobre a avaliação das mudanças climáticas na América do Sul utilizando o modelo Eta sobre diferentes cenários de mudanças climáticas indicando redução das chuvas durante o século 21 para a maior parte da Amazônia e região Sudeste. Nessas regiões, a precipitação anual pode reduzir em cerca 700 mm em relação às condições climáticas atuais. Por outro lado, aumento nas



precipitações anuais em mais 500mm pode ocorrer na região Sul do país no final do século.

Apenas a análise das tendências de mudança nos regimes de precipitação e frequência de eventos extremos não são suficientes para avaliar a disponibilidade futura de água em uma bacia hidrográfica. Para isso, é necessária a utilização de modelos hidrológicos para simular os fluxos de água na bacia, nos quais além de séries de precipitação, dados de temperatura são utilizados para simular o ciclo hidrológico. Devem ser consideradas, ainda, as tendências de alterações no uso da água (irrigação, abastecimento humano, etc.) e mudanças na cobertura do solo da bacia.

Neto et al. (2016) avaliou os processos hidrológicos das regiões hidrográficas brasileiras sobre o efeito das mudanças climáticas. Para isso, os autores utilizaram o modelo hidrológico MGB-IPH (COLLICHONN et al., 2007) e projeções climáticas simuladas a partir do modelo Eta forçado pelos modelos climáticos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (CHOU et al., 2014). Seus resultados indicam redução da disponibilidade hídrica para a maior parte do país. Isso pode ser verificado pelo escoamento superficial que segue uma tendência de redução em relação ao período presente para a maior parte do país nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos três períodos futuros. Por outro lado, parte da região Amazônica e porção da região Nordeste apresentam tendência contrária, de aumento do escoamento superficial, mais intenso no cenário de mudanças climáticas mais otimista (RCP4.5) e períodos futuros mais recentes. A avaliação dos padrões de umidade do solo também pode ser importante para avaliação da disponibilidade de água. Para o cenário mais otimista (RCP4.5) a maioria do país apresenta tendências de redução na umidade, com exceção de pequenas porções na região Nordeste, Sul e Norte. Para o cenário pessimista (RCP8.5) as tendências de redução da umidade são mais intensas e, as pequenas porções com tendência de aumento são menos expressivas e quase se anulam para o período de 2071-2099.

### 5.1.3. Alterações das velocidades de vento

A maioria dos estudos climáticos sugerem que as velocidades de vento de superfície estão reduzindo globalmente. Essa tendência é suportada por diversos estudos conduzidos na Europa, enquanto que alguns estudos para América do Norte indicam tendência contrária. Esta discrepância nos estudos regionais pode ser explicada pela diferença na altura avaliada nos diferentes trabalhos, em que os estudos pra Europa utilizaram medidas de 10m para superfície de vento, enquanto os estudos para a América do Norte utilizaram dados de reanálise para altura de aproximadamente 41 metros (GILLILAND; KEIM, 2017).

Além desses problemas, outro debate na literatura tem foco em se a superfície e variáveis atmosféricas podem explicar mudanças em ventos próximos à superfície. Muitos autores atribuem tendências de redução das velocidades do vento à urbanização e às mudanças de cobertura do solo, que aumentam a rugosidade da superfície e reduzem a velocidade dos ventos próximos a superfície. Por outro lado, estudos também sugerem que as alterações podem ser explicadas por circulação atmosférica em macro-escala. Outras causas para alterações nas velocidades dos ventos também são avaliadas pelos climatologistas, como radiação solar, atividade solar, evapotranspiração e até mesmo a qualidade dos dados medidos, em que ajustes de altura, realocação, substituição de instrumentos e erros de observação podem explicar os padrões temporais e espaciais das mudanças (GILLILAND; KEIM, 2017)

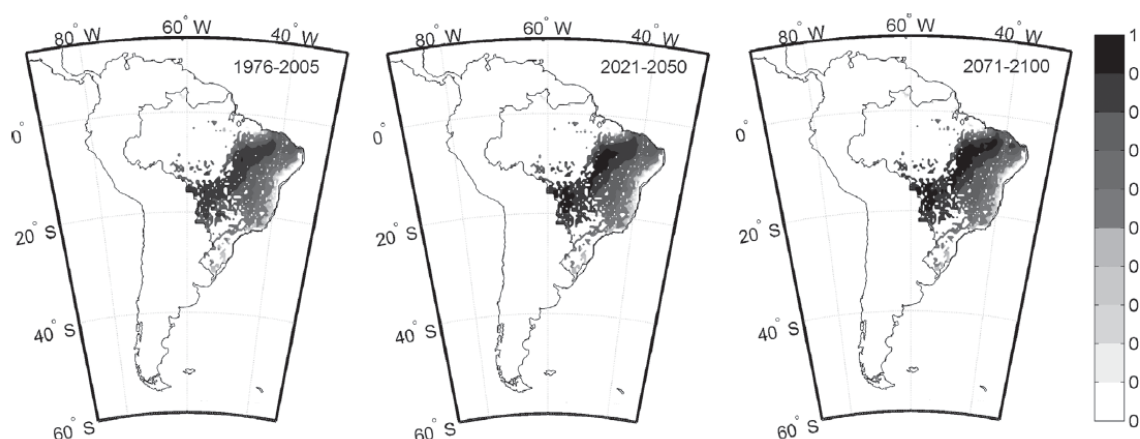
Lucena et al. (2010) avalia as condições climáticas futuras para vento de superfície no Brasil, utilizando o modelo regional PRECIS para *downscaling* de resultados do modelo de circulação global HadCM3 para os cenários de emissões A2 (pessimista) e B2 (otimista) do IPCC. Os resultados sugerem aumento em mais de 20% nas velocidades médias anuais para região Norte, Nordeste e costa Leste para os dois cenários avaliados, há tendência que se expanda para a região central do país no final do século.

### 5.1.4. Queimadas

A ocorrência de queimadas depende fortemente de condições ambientais, fonte de ignição e disponibilidade de combustível (vegetação). Temperatura, umidade relativa,

precipitação e velocidade do vento determinam a intensidade e propagação desses eventos e a coincidência com situações extremas de seca, vento e altas temperaturas podem aumentar, significativamente, a severidade. Dessa forma, redução no regime de precipitação em algumas regiões, aumento de temperatura e eventos de secas severas, decorrentes de mudanças climáticas, podem aumentar o risco de queimadas. De acordo com IPCC (2013), as mudanças climáticas provavelmente contribuirão para o aumento do risco de eventos extremos de queimadas.

Em estudo sobre projeções futuras de risco de ocorrências de queimadas em áreas de savana e vegetação arbustiva no Brasil, Silva et al. (2016) concluiu que para um cenário intermediário de mudanças climáticas (RCP4.5) há um aumento sistemático dos níveis extremos de perigo de fogo no cerrado brasileiro ao longo do século 21 (Figura 7). A avaliação de risco foi realizada com base no Índice Meteorológico de Risco de Fogo, desenvolvido pelo CPTEC/INPE, e é calculado com base em informações sobre a cobertura do solo (vegetação), temperatura máxima diária, umidade relativa mínima diária e precipitação acumulada.



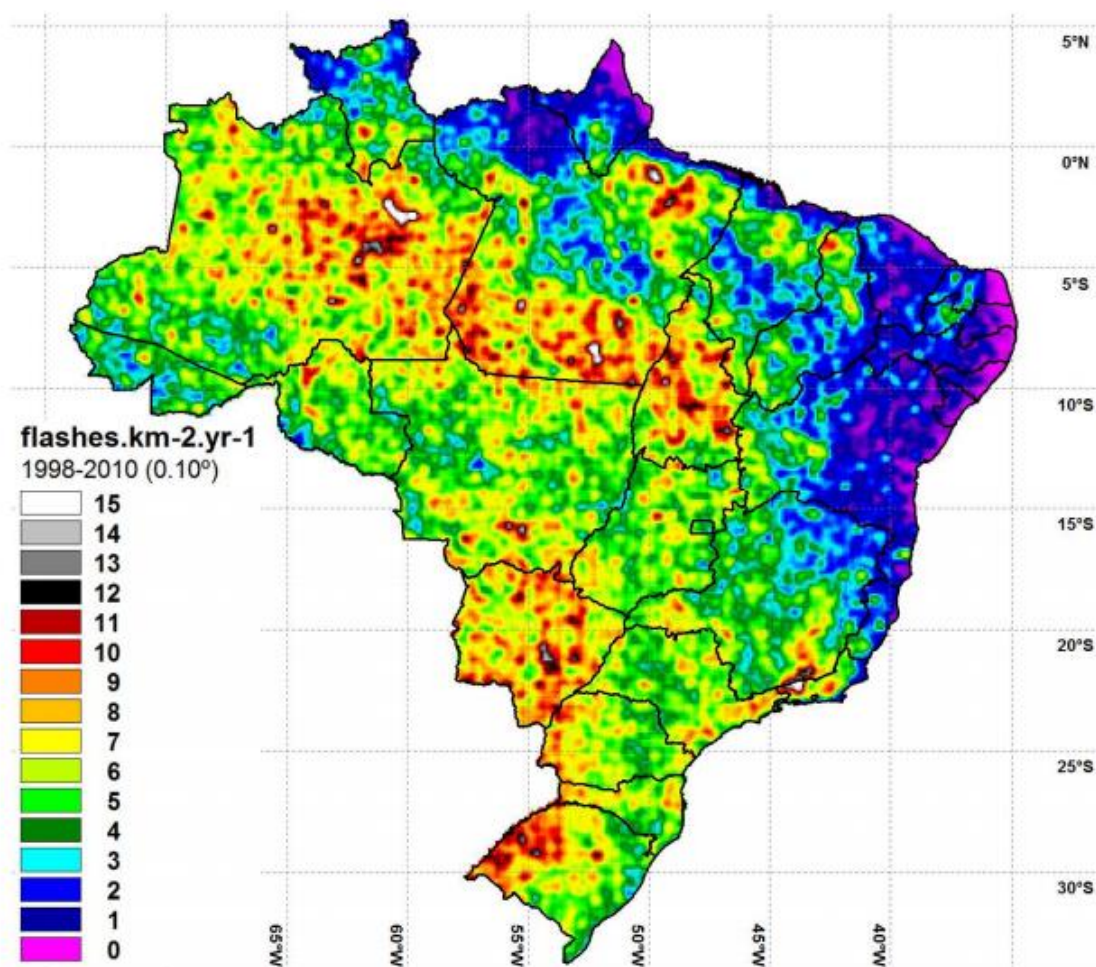
**Figura 7 - Distribuição espacial do para o Índice Meteorológico de Risco de Fogo, determinados a partir de projeções climáticas considerando cenário de mudanças climáticas RCP4.5**

**Fonte: Silva et al. (2016).**

#### 5.1.5. Descargas atmosféricas

As principais condições que levam a ocorrência de descargas atmosféricas são aspectos físicos dinâmicos e termodinâmicos. Com relação aos aspectos dinâmicos, a ocorrência de uma descarga está relacionada à formação de campos de vento ascendente, produzidos de diferentes formas, como frentes frias ou quentes, zona de convergência intertropical, brisa marítima, aquecimento diferencial de superfície em áreas urbanas, montanhas, dentre outros. Com relação à termodinâmica, os perfis de temperatura e umidade criam as condições de instabilidade necessárias à formação de tempestades elétricas. Outros elementos também estão envolvidos na formação de tempestades elétricas, como padrões climatológicos de larga escala, e outros aspectos como concentrações de aerossóis (PINTO et al., 2015).

Naccarato et al. (2011) avaliou a distribuição espacial de descargas atmosféricas para o Brasil a partir de dados do sensor *Lightning Image Sensor* (LIS), um instrumento óptico a bordo do satélite TRMM. Os autores utilizaram uma série de dados de 13 anos, no período de 1998 a 2010. Os resultados indicam que o Brasil possui seis regiões com maior densidade de descargas atmosféricas (12 a 15 descargas por km<sup>2</sup> e por ano): porção da bacia Amazônica, região central do Estado do Tocantins, Oeste do Rio Grande do Sul, Noroeste do Mato Grosso do Sul, Vale do Paraíba e Região Metropolitana de São Paulo (Figura 8).



**Figura 8 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas baseado em 13 anos de dados do sensor *Lightning Image Sensor (LIS)***

**Fonte: Naccarato et al. (2011).**

De acordo com Pinto et al. (2013), não existem evidências diretas de aumento da ocorrência de descargas atmosféricas em decorrência do aumento da temperatura média global, entretanto, tendências de aumento são observadas em áreas onde o aumento de temperatura é mais significativo. Dessa forma, mesmo não havendo evidências da influência das mudanças climáticas na ocorrência de tempestades elétricas, efeitos localizados decorrentes de mudanças climáticas, ou mudanças antrópicas do ambiente, podem influenciar a ocorrência de descargas atmosféricas.

Por exemplo, de acordo com estudo de Bourcheidt et al. (2016), foi observada maior ocorrência de descargas elétricas sobre a região metropolitana de São Paulo. Esse



efeito é explicado, principalmente, pela influência do efeito de ilhas de calor, que resulta no aumento da temperatura e aumenta a instabilidade. Os autores também identificaram amplificação do efeito das ilhas de calor sobre as descargas atmosféricas por fatores locais, como brisa marítima e continental, eventos sinóticos e topografia. Pinto et al. (2015) avaliaram a ocorrência de tempestades elétricas em 14 cidades do Brasil, no período de 1951 a 2010, e verificaram um aumento de 72% da primeira para a segunda metade do século 20. Os autores sugerem que essa tendência de aumento está relacionada à urbanização nas cidades avaliadas, e não as mudanças climáticas.

## 5.2. Fragilidades e resiliências do setor elétrico

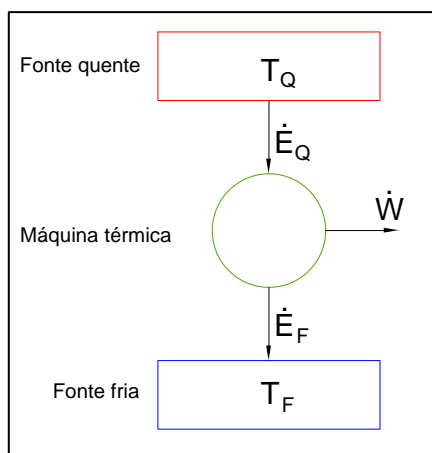
De uma forma geral, as ameaças ao setor elétrico, decorrente das mudanças climáticas, podem ser divididas em duas categorias, segundo Ohshita e Johnson et al. (2017): estresses climáticos e choques climáticos. O estresse climático está relacionado as mudanças nos padrões médios do clima, como aumentos das temperaturas e mudanças nos padrões de precipitação. Esse tipo de ameaça climática gera impactos de menor intensidade, mas persistentes. Por exemplo, redução de vida útil e eficiência de equipamentos, componentes e plantas de geração termelétrica em decorrência do aumento de temperatura, ou redução da capacidade de geração hidrelétrica decorrente de reduções na disponibilidade de água. Já os choques climáticos, são interpretados como eventos extremos, com tempestades, furacões, enchentes e ondas de calor. Esse tipo de evento causa danos localizados e de grande intensidade, como por exemplo a queda de torres de transmissão e colapso geradores eólicos em tempestades, rompimento de barragens em cheias de intensidade acima do adotado em projeto, desligamentos de linhas de transmissão em queimadas ou por curtos causados por descargas atmosféricas.

Nos próximos tópicos é apresentada uma discussão sobre as fragilidades e resiliências de cada componente do setor elétrico frente às ameaças climáticas.

### 5.2.1. Geração não renovável

A geração de energia elétrica por fontes não renováveis é feita através de máquinas térmicas. Essas, foram desenvolvidas para converter a energia térmica de um combustível em energia mecânica ou trabalho. Para que elas possam operar, é necessário que exista um diferencial de temperatura entre duas fontes de calor, em que uma delas deverá estar em uma temperatura mais alta que a outra fonte. A de maior temperatura é normalmente denominada de fonte quente e a de menor temperatura é a fonte fria.

Essas máquinas térmicas fazem essa conversão transformando uma parcela da energia térmica que é proveniente da fonte quente em energia mecânica e rejeitando a outra parte da energia térmica para a fonte fria. Ou seja, uma fração da energia térmica tem que ser, obrigatoriamente, descartada e não pode ser convertida em trabalho. Isso pode ser visualizado na Figura 9, onde se apresenta o esquema simplificado de uma máquina térmica motora.



**Figura 9 - Esquemático de máquina térmica.**

Usando esse esquema é possível derivar duas expressões muito importantes. Pela Primeira Lei da Termodinâmica, tem-se a Equação 5:

$$\dot{E}_Q = \dot{W} + \dot{E}_F \quad \text{Equação 5}$$

Ou então (Equação 6):



$$\dot{W} = \dot{E}_Q - \dot{E}_F \quad \text{Equação 6}$$

E o rendimento dessa máquina térmica é dado por (Equação 7):

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_Q} \quad \text{Equação 7}$$

Que também pode ser escrita pela Equação 8:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{E}_F}{\dot{E}_Q} \quad \text{Equação 8}$$

Aplicando-se os conceitos da Segunda Lei da Termodinâmica, é possível mostrar que o rendimento máximo obtido nessa máquina é dado pela Equação 9:

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad \text{Equação 9}$$

Como na grande maioria das máquinas térmicas a fonte fria é o próprio ambiente, fica evidente que qualquer elevação da temperatura da fonte fria resulta em redução do rendimento alcançado pela máquina.

Quando se utilizam ciclos térmicos de geração de energia, por exemplo em um ciclo Rankine com vapor d'água na pressão de 62 bar, superaquecido a 510 °C e com condensação a 0,1 bar absoluto, observa-se que acréscimos da ordem de 1,5 °C na temperatura do ambiente resultam em perdas de até 5,7% nas eficiências globais desses ciclos. Em ciclos com turbinas a gás essas perdas são ainda mais significativas, chegando a reduções da ordem de 12%.

Outro efeito que também pode ser negativo é que a diminuição da disponibilidade de água para o transporte do calor rejeitado nesses ciclos térmicos resulta em maiores diferenciais entre a temperatura do ambiente e da água de resfriamento. Dependendo

das condições locais isso pode ser um limitante para o funcionamento e operação desses equipamentos.

Além da redução da eficiência em decorrência do aumento de temperatura, os limites de descarga térmica de água estabelecidos para garantir a proteção dos ecossistemas aquáticos, podem resultar reduções ainda maiores na geração (ZAMUDA et al., 2013). Além disso, o efeito combinado de aumento de temperatura e da redução da disponibilidade de água, pode reduzir ainda mais a capacidade de geração termelétrica. Estudo recente sobre a vulnerabilidade e resiliência da geração na Europa (TOBIN et al. 2018) indica redução da capacidade de geração de usinas termelétricas em todos os países europeus, dado o efeito combinado do aumento de temperatura da água e da redução das vazões nos rios, utilizados pelas usinas para captação de água para resfriamento. Para o cenário de aumento global da temperatura em 1,5°C, a redução da capacidade de geração projetada é de 5%, enquanto que aumento de 3°C acarreta uma redução de 15%, na maioria dos países.

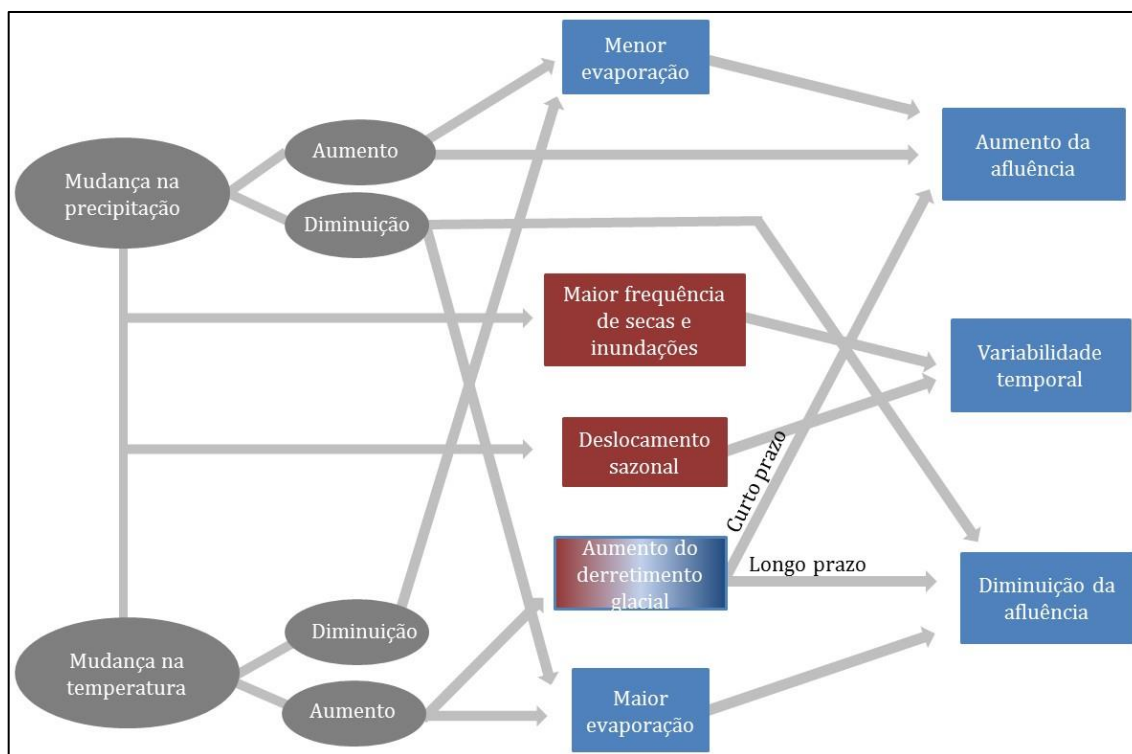
Cook et al. (2015) avalia a vulnerabilidade a eventos de ondas de calor e secas de 26 termelétricas localizadas na parte alta da bacia do rio Mississippi e na bacia da Costa do Golfo. Os autores utilizaram modelos termodinâmicos em conjunto com resultados de modelagem climática para estimar a temperatura de efluente das centrais termelétricas, entre 2015 e 2035, e prever quais usinas possuem risco de ultrapassar os limites de descarga térmica. Doze das 26 termelétricas avaliadas podem ultrapassar os limites térmicos para lançamento de efluente durante o período de verão. A metodologia utilizada pelos autores pode ser aplicada em conjunto com modelagem hidrológica e climática (NETO *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2014) para as termelétricas no Brasil, principalmente, para o planejamento de médio e longo prazo, possibilitando incluir o efeito das mudanças climáticas na geração.

Enchentes e tempestades também podem ser ameaças a plantas de geração termelétricas. De acordo com Zamuda *et al.* (2013), estruturas de admissão, estruturas civis e outros componentes de captação de água para resfriamento são vulneráveis a inundações e em alguns casos a tempestades.

### 5.2.2. Geração renovável

#### 5.2.2.1. *Hidrelétrica*

A Figura 10 apresenta as possíveis perturbações as quais os sistemas hídricos de geração hidrelétrica podem ser expostos, de uma forma geral, às mudanças climáticas. As perturbações estão diretamente ligadas a mudanças no regime de chuvas e na temperatura. Chuvas afetam diretamente as vazões na calha dos rios. Mudanças no padrão de chuvas podem provocar efeitos como o aumento da frequência e magnitude de cheias e de secas, bem como a modificação do padrão de sazonalidade das vazões. Mudanças na temperatura afetam as taxas de evaporação dos rios e reservatórios, que diretamente impactam na água disponível para geração de energia. Rios dependentes do degelo de geleiras são fortemente afetados por mudanças na temperatura, cuja tendência global é de aumento. No curto prazo, o degelo poderá aumentar as vazões nos rios, mas no longo prazo a consequência é a redução nas vazões. A temperatura impacta, ainda, nas taxas de evapotranspiração das bacias hidrográficas, afetando o balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera e, por consequência, impactando nas vazões afluentes aos reservatórios das usinas hidrelétricas.



**Figura 10 - Efeitos das mudanças climáticas sobre o potencial de geração hidrelétrica**

**Fonte: Traduzido de Blackshear et al. (2011).**

A geração hidrelétrica é afetada pela disponibilidade de água afluente e sua variabilidade, mas a magnitude dos efeitos irá variar dependendo das características do sistema de geração.

Na Figura 11 são apresentadas algumas características que podem influenciar nos impactos de mudanças climáticas. Usinas com capacidade de regularização normalmente possuem maiores reservatórios, sendo mais afetadas devido a mudanças na evaporação. Por outro lado, poderão ser menos afetadas por variabilidades temporais do clima. Já usinas a fio d'água possuem menor capacidade de se adaptarem às variações do clima. Reservatórios com alta relação área/volume, indicam que são rasos e com grande espelho d'água e, portanto, serão mais afetados por aumentos nas taxas de evaporação. Usinas com reservatórios grandes, em termos de volume, sofrem menores impactos devido a mudanças no clima, mas o que se observa atualmente é uma tendência de redução da capacidade de regularização das novas usinas hidrelétricas (MCNALLY et al., 2009; TULLOS, et al., 2013).

		Evaporação		Afluência		Variabilidade temporal			Derretimento glacial	
		Aumento	Diminuição	Aumento	Diminuição	Inundações	Secas	Deslocamento sazonal	Curto prazo	Longo prazo
Tipo	Reservatório									
	Fio d'água									
Relação área/volume	Alto									
	Baixo									
Tamanho do reservatório	Grande									
	Pequeno									

Mudanças relativas na capacidade de geração de eletricidade

Maior diminuição	Menor diminuição	Menor aumento	Maior aumento	N/A
------------------	------------------	---------------	---------------	-----

**Figura 11 - Efeitos de mudanças climáticas na geração hidrelétrica em função das características das usinas hidrelétricas**

Fonte: Traduzido de Blackshear et al. (2011).

Restrições ambientais, sociais e econômicas limitam significativamente a construção de reservatórios de regularização, aumentando a sensibilidade e reduzindo a capacidade dos sistemas de geração hidrelétrica de se adaptarem às mudanças climáticas. Ou seja, o cenário atual indica que há uma tendência de aumento na vulnerabilidade dos sistemas de geração hidrelétrica (RIBEIRO JÚNIOR, 2016). De acordo com Zamuda *et al.* (2013), o efeito da disponibilidade de água na geração hidrelétrica pode ser potencializado quando combinado com aumentos na temperatura. De acordo com os autores, o aumento na temperatura da água pode intensificar o nível de estratificação do reservatório e reduzir os níveis de oxigênio dissolvido, o que tem impactos diretos no ecossistema aquático. Essas alterações podem influenciar nas vazões mínimas regulatórias, o que tem impacto direto na capacidade de geração.

As consequências podem ser particularmente graves caso, por exemplo, o planejamento da expansão dos sistemas de geração hidrelétrica concentre-se em regiões em que as projeções de mudanças climáticas indicam maiores alterações, como o caso da bacia Amazônica (SOITO, 2011; QUEIROZ et al., 2016). Em estudo

sobre o efeito das mudanças climáticas na energia assegurada de usinas hidrelétricas no Brasil (LIMA et al., 2014), para o parque gerador existente, estima-se reduções de até 15% em comparação com o cenário climático atual (1960-1991). Já para um parque gerador futuro (2041 em diante) as reduções na energia assegurada podem chegar até 25%.

Além das alterações na disponibilidade de água, é importante atentar-se para alterações da frequência e intensidade de eventos extremos, em decorrência das mudanças climáticas. A avaliação de resultados de *downscaling* de modelos climáticos sugerem que porções na região Norte, Sul e Sudoeste e pequena área ao longo da costa Nordeste do Brasil apresentam intensificação de descargas extremas (NETO et al., 2016). Os vertedouros e barragens de usinas hidrelétricas são dimensionados para suportar vazões máximas dado um determinado período de recorrência. Esses valores de vazões máximas são obtidos através de análises estatísticas de séries históricas. Dessa forma, o aumento da intensidade de eventos extremos pode gerar vazões acima dos valores máximos de projeto de usinas em operação, o que aumenta o risco de colapso dessas barragens.

A Tabela 6 exemplifica um conjunto de medidas para cada tipo de impacto climático que podem ser consideradas em sistemas com usinas hidráulicas.

**Tabela 6 - Exemplos de Medidas de Resiliência para Hidráulica**

**Fonte: APEC (2017).**

Impacto Climático	Medida de Resiliência
<b>Aumento de temperatura e velocidades de vento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construção ou ampliação dos reservatórios de armazenamento de água.</li> </ul>
<b>Precipitação/seca</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento de técnicas aprimoradas de previsão hidrológica e regras de gestão operacional adaptativa;</li> <li>• Desenvolvimento de estratégias de gestão em toda a bacia que considere as restrições ambientais e o uso humano da água a jusante;</li> <li>• Restauração e aprimoramento da gestão da terra a montante, incluindo a florestação para reduzir as inundações, a erosão, o assoreamento e deslizamentos de terra;</li> <li>• Aumento da altura da barragem e/ou construção de</li> </ul>

Impacto Climático	Medida de Resiliência
	pequenas barragens a montante visando o aumento do fluxo; <ul style="list-style-type: none"> <li>• Construção ou ampliação dos reservatórios de armazenamento de água;</li> <li>• Modificação das capacidades do vertedouro e instalação de vertedouro controláveis nos reservatórios;</li> <li>• Modificação do número e o tipo de turbinas mais adequadas aos fluxos de água esperados;</li> <li>• Modificação dos canais ou túneis para lidar com mudanças esperadas nos fluxos de água;</li> <li>• Otimização da gestão do reservatórios e adaptação às mudanças de padrão das precipitações ou dos fluxos do rio.</li> </ul>
<b>Eventos extremos (inundações, degelo)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projetar barragens e infraestrutura mais robustas para inundando eventos extremos e projetos para fluxos aumentados de derretimento de geleiras.</li> </ul>

#### 5.2.2.2. Biomassa

Mudanças nos regimes de precipitação, assim como alterações na temperatura e umidade podem afetar a produção de algumas culturas voltadas à produção de biocombustíveis para geração de energia elétrica. Eventos de seca e outras mudanças no ciclo hidrológico podem reduzir a produção de determinadas culturas. A redução da disponibilidade de água, principalmente em locais em que já existe escassez, deverá afetar a produção de alimentos e a energia. De acordo com Zamuda et al. (2013), os riscos de redução na produção podem variar de acordo com diversos fatores, tais como: tipo de cultura, temperatura, precipitação, tipo de solo, umidade do solo e disponibilidade de água para irrigação. Segundo Pinto et al. (2008), para o Brasil, estima-se para os cenários de mudanças climáticas A2 e B2 do IPCC (otimista e pessimista, respectivamente) que diversas culturas para fins alimentícios podem ter área potencial para plantio reduzidas, enquanto a cana de açúcar pode ter aumento na área potencial para cultivo em mais de 100% em relação à área potencial atual. As expectativas para potencial de produção de culturas para fins energéticos devem considerar também melhorias nas técnicas de produção e desenvolvimento de cultivares adaptados.



A Tabela 7 exemplifica um conjunto de medidas para cada tipo de impacto climático que podem ser consideradas em sistemas com usinas a biomassa ou a biocombustíveis.

**Tabela 7 - Exemplos de Medidas de Resiliência para Usinas a Biomassa**

**Fonte: APEC (2017).**

Impacto Climático	Medida de Resiliência
<b>Enchentes/precipitações</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicação de técnicas de manejo de solo e nutrientes;</li> <li>• Melhoraria da captação e uso de água;</li> <li>• Desenvolvimento de ecossistemas resilientes;</li> <li>• Realização de Pesquisas &amp; Desenvolvimento sobre resistência de matéria prima à enchente.</li> </ul>
<b>Precipitação ou mudanças de temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expansão das técnicas de captação de água da chuva, armazenamento e conservação, reutilização de água, dessalinização, eficiência no uso e irrigação, realização de ajustes nas datas de plantio; realocação de culturas e melhoria na gestão do uso da terra;</li> <li>• Utilização de plantas tolerantes ao sal ou culturas robustas com alta tolerância ao calor biológico e tolerância ao estresse hídrico;</li> <li>• Melhoraria das proteções contra inundações;</li> <li>• Expansão dos sistemas de irrigação e da eficiência;</li> <li>• Realização de Pesquisa &amp; Desenvolvimento sobre resistência da matéria prima à seca.</li> </ul>
<b>Eventos extremos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da robustez das usinas de biomassa;</li> <li>• Utilização de medidas de adaptação comportamental, incluindo sistemas de aviso para chuva e anomalias de temperatura;</li> <li>• Apoio à colheita de emergência na iminência de eventos extremos e fornecimento de sistemas de seguro.</li> </ul>

#### 5.2.2.3. Solar

Para geração solar, tanto o aumento de temperatura quanto a redução da disponibilidade hídrica, podem ser ameaças à geração (ZAMUDA et al., 2013). Com relação à temperatura, a eficiência das placas fotovoltaicas reduz com o aumento da temperatura de operação. Segundo Dubey et al. (2013), a redução da eficiência com aumento da temperatura pode variar de 0,1 a 0,6% para cada 1°C de aumento na

temperatura de operação. Um dos fatores que também afetam a eficiência da geração solar é o acúmulo de poeira em painéis fotovoltaicos e em espelhos de plantas de concentração solar. Dessa forma, a disponibilidade de água para limpeza de painéis e espelhos tem impacto na energia gerada. Além desses fatores, outro elemento importante para a geração solar é a radiação solar incidente, fortemente influenciada pelo nível de nebulosidade.

A Tabela 8 exemplifica um conjunto de medidas para cada tipo de impacto climático que podem ser consideradas em sistemas com usinas solares fotovoltaicas.

**Tabela 8 - Exemplos de Medidas de Resiliência para Usina Solar**

**Fonte: APEC (2017).**

Impacto Climático	Medida de Resiliência
<b>Aumento de temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melhoria do fluxo de ar sob a estrutura de montagem para reduzir o ganho de calor e ampliar as saídas;</li> <li>Especificação das células fotovoltaicas resistentes ao calor e dos componentes do módulo para resistir a picos de temperaturas muito altos.</li> </ul>
<b>Aumento da precipitação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seleção do ângulo apropriado de inclinação para limpar a poeira do painel;</li> <li>Seleção da superfície do módulo propício para a autolimpeza;</li> <li>Escolha de locais com menor probabilidade de poeira, cascalho e neve se possível.</li> </ul>
<b>Velocidade do vento e Turbidez</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projetos das estruturas para resistir a ventos mais altos;</li> <li>Assegurar espaço livre (painel e montagem) para que a neve possa deslizar do painel.</li> </ul>

#### 5.2.2.4. Eólica

Estudos sobre efeitos das mudanças climáticas no comportamento dos ventos no Brasil indicam aumento nas velocidades médias para a maioria do país, o que pode indicar impacto positivo na geração eólica. A análise de resultados do modelo PRECIS-HadCM3 indica que a região Norte, nordeste e costa leste do Brasil podem experimentar aumentos de mais de 20% nas velocidades médias dos ventos enquanto

que apenas pequena porção da região Noroeste poderá experimentar reduções nas velocidades médias dos ventos (LUCENA et al., 2010). Em uma análise mais detalhada para a região Sul e Nordeste do Brasil, Pereira et al. (2013) avalia os impactos das mudanças climáticas na densidade de potencial eólico utilizando o modelo Eta-HadCM3. Os resultados indicam tendências de aumento em uma média de 15 a 30% para a maior parte da região Nordeste. Por outro lado, a região Sul apresenta tendências de aumento na densidade de potência eólica menores em comparação com a região Norte, com média de 10% e alguns picos de 20%. De uma forma geral, espera-se que o impacto das mudanças climáticas no potencial de geração eólica no Brasil será positivo. Entretanto, de acordo com Pereira et al. (2013), as incertezas associadas aos modelos climáticos, cenários de emissões e de séries históricas de observações meteorológicas deixa o tema aberto para estudos futuros e novas discussões.

Além das mudanças nas velocidades médias dos ventos, é importante avaliar a mudança na ocorrência e intensidade de rajadas extremas de vento, que podem comprometer o funcionamento de aerogeradores e até mesmo causar colapso de torres. Sob condições extremas de vento, há maior possibilidade de desconexão das turbinas eólicas em função da proximidade ou ultrapassagem da velocidade de corte, resultando na redução da potência disponível no parque eólico (LIN et al., 2012). A avaliação da magnitude dessa redução demanda simulações com uma maior resolução espacial, que considerem a dispersão geográfica das unidades geradoras dentro de um parque ou região. Deve ser considerada também a necessidade de uma modelagem com resolução temporal adequada aos ciclos de parada e partida das turbinas em função desses eventos extremos.

A Tabela 9 exemplifica um conjunto de medidas para cada tipo de impacto climático que podem ser consideradas em sistemas com usinas eólicas.

**Tabela 9 - Exemplos de Medidas de Resiliência para Usinas Eólicas**

**Fonte: APEC (2017).**

Impacto Climático	Medida de Resiliência
<b>Velocidade do vento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeção de turbinas capazes de operar velocidades altas de vento, rajadas e mudanças de direção;</li> <li>• Instalação de torres mais altas para capturar ventos mais fortes em altitudes mais altas;</li> <li>• Escolha de lugares que levem em consideração alterações esperadas de velocidade do vento durante a vida útil das turbinas;</li> <li>• Consideração de turbinas eólicas de eixo (maior produção por m<sup>2</sup> de área de terra; podem operar em uma faixa mais ampla de velocidades de vento).</li> </ul>
<b>Temperatura do ar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consideração dos efeitos de temperaturas extremas na turbina, na seleção das lâminas e na operação.</li> </ul>
<b>Picos de tempestade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projetos de estruturas mais robustos.</li> </ul>
<b>Eventos Extremos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projetos de turbinas offshore para suportar os aumentos esperados de forças nas ondas de vento e mar.</li> </ul>

### 5.2.3. Transmissão

A revisão bibliográfica sobre vulnerabilidade de linhas e sistemas de transmissão de energia elétrica está praticamente reproduzindo o trabalho de Panteli et al. (2016), dada sua amplitude, profundidade e ser propositivo e aplicado. Assim, as referências abaixo descritas são citações primárias deste trabalho. Fez-se uma adaptação e foram colocados alguns comentários sobre este texto, procurando direcioná-lo aos interesses do sistema brasileiro.

A modelagem dos impactos de climas extremos na confiabilidade dos sistemas de transmissão de energia elétrica concentrou-se principalmente na caracterização do efeito das condições climáticas nos atributos de confiabilidade dos componentes do sistema de potência. Ou seja, nas taxas de falha e restauração. Diferentes técnicas têm sido utilizadas, tais como modelagem de Markov (por exemplo, BILLINTON E BOLLINGER (1968); LIU E SINGH (2010)) e simulação sequencial de Monte Carlo (SMCS) (BHUIYAN E ALLAN (1994), ALVEHAG E SODER (2011), GENGFENG et al.

(2014), PANTELI E MANCARELLA (2015)). Uma extensa revisão de técnicas de avaliação de confiabilidade relacionadas ao clima é fornecida em Panteli e Mancarella (2015), enquanto metodologias e desafios de avaliar o risco de falhas em cascata são fornecidas em Vaiman et al. (2012).

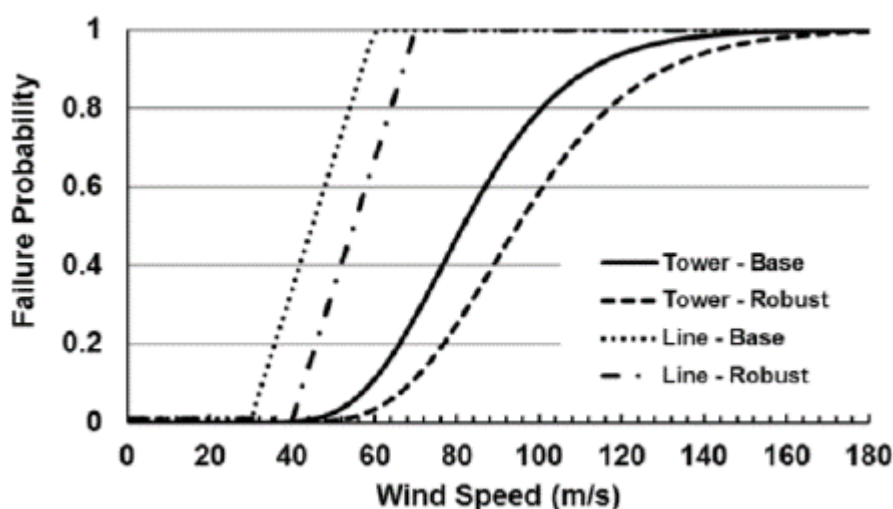
Por outro lado, diferentemente dos trabalhos anteriores mais focados em confiabilidade, modelos quantitativos orientados à resiliência, métricas e estratégias de aprimoramento foram desenvolvidos em Yuan et al. (2016), Francis e Bekera (2014), Ouyang e Dueñas-Ororio (2014) e Panteli et al. (2016). A esse respeito, uma visão geral de pesquisas anteriores sobre resiliência de sistemas de energia sob desastres naturais é apresentada em Wang et al. (2015) e uma estrutura para entender, conceituar e aperfeiçoar a resiliência de sistemas de potência foi apresentada em Panteli e Mancarella (2015) e Pickering et al. (2013). No entanto, esses trabalhos anteriores (incluindo PANTELI E. MANCARELLA (2015) e ESPINOZA et al. (2016)) não descrevem como construir o modelo de fragilidade da rede ou implementar a abordagem abrangente necessária para quantificar a resiliência da rede ao clima extremo; da mesma forma, não é mostrado antes como, usando uma combinação de índices de infraestrutura e operacionais, é possível demonstrar os benefícios e implicações de diferentes estratégias de melhoria que visam partes do sistema especificamente identificadas através de um algoritmo adequado.

Panteli et al. (2016) apresenta uma metodologia abrangente para avaliação da resistência multitemporal e multirregional de sistemas de transmissão para condições climáticas extremas, bem como desenvolvimento de melhorias, aplicando modelagem de impacto de tempestades severas em redes de transmissão. A abordagem é uma extensão da modelagem CAT usada pela indústria de seguros para obter as perdas esperadas para uma carteira de seguro para um determinado risco (por exemplo, terremoto, inundação, vento etc.). Esse método está ganhando popularidade e foi recentemente adotado pela Agência Federal de Gerenciamento de Emergências dos Estados Unidos (FEMA) por seu método padronizado para estimar as perdas por terremoto, inundação e furacão (HAZUS) (FEMA, 2016). Nesse artigo, estendeu-se o método para os impactos do sistema de transmissão de eletricidade

devido a fortes tempestades com vento. Um modelo de simulação probabilística de séries temporais é apresentado, de forma que, estocasticamente, modele e avalie o impacto espaço-temporal de frentes meteorológicas, à medida que elas se movem através de uma rede de transmissão em grande escala. Um modelo de fragilidade de componentes do sistema de potência é desenvolvido para caracterizar sua probabilidade de falha como uma função das condições climáticas que eles estejam submetidos a cada momento. A confiabilidade de todos os componentes e outros parâmetros (como o tempo de reparo das linhas) são então alimentados, a cada instante, em um modelo de fluxo de potência ótimo, de forma a se ter as condições elétricas no momento de uma falha consequente da tempestade. Propõe-se um Índice de Valoração da Resiliência (em inglês, *Resilience Achievement Worth – RAW*) de corredores de individuais de transmissão, que é uma forma de quantificar os impactos de uma tempestade e a degradação na resiliência de um sistema de energia elétrica, bem como apoiar o desenvolvimento de estratégias de aprimoramento de sua resiliência. A maneira de se calcular o RAW é baseado, na verdade, em um processo indireto, em que se estima o dano produzido pela falha. Ou seja, a vulnerabilidade. Esta é mensurada pelo número de linhas caídas, ou pela potência de carga cortada, ou pela energia não suprida, durante um período relativamente longo, que dura a tempestade (por exemplo, uma semana). O RAW para um corredor de transmissão é a diferença entre duas medidas de vulnerabilidade sistêmica: a primeira (de referência), que considera todos elementos frágeis e a segunda, que considera a situação anterior, salvo para o corredor focado, que é considerado disponível 100% do tempo, independentemente das condições climáticas. Assim, pode-se comparar RAWs de diferentes corredores, priorizando investimentos e melhorias de procedimentos. O artigo considera três meios de melhorar a resiliência de um corredor: reforçar as estruturas, deixando-as mais resistentes; construir estruturas paralelas redundantes; ou reduzir os tempos de reparo, melhorando a gestão das equipes.

Merece destaque, ainda, o método de avaliação de fragilidade de torres de transmissão apresentado por Panteli et al. (2016), pois este tratamento dos

elementos que compõem o sistema não é comum na literatura. Segundo ele, Curvas de Fragilidade podem ser derivadas (i) empiricamente da análise estatística de um grande conjunto de falhas observadas, (ii) experimentalmente, por ensaios destrutivos de torres, (iii) analiticamente, usando um modelo estrutural de simulação, (iv) usando julgamento de especialistas, ou (v) por meio de uma combinação destes métodos. Curvas empíricas muitas vezes podem ser construídas para torres de rede de distribuição, para as quais existem mais registros de falhas devido ao seu maior número e padrão simplificado de projeto (DUNN et al., 2015), uma vez que não há informações sobre falhas de torres de transmissão suficientemente detalhadas para desenvolver curvas empíricas e tampouco há conhecimento suficiente de especialistas para esta inferência. Nesse caso, as curvas analíticas de fragilidade foram produzidas com base em simulações numéricas de estruturas, como se faz na construção civil para ameaças como terremoto, e podem ser vistas na Figura 12.



**Figura 12 - Curvas de fragilidade do vento de linhas de transmissão e torres (estudo de caso base e robusto)**

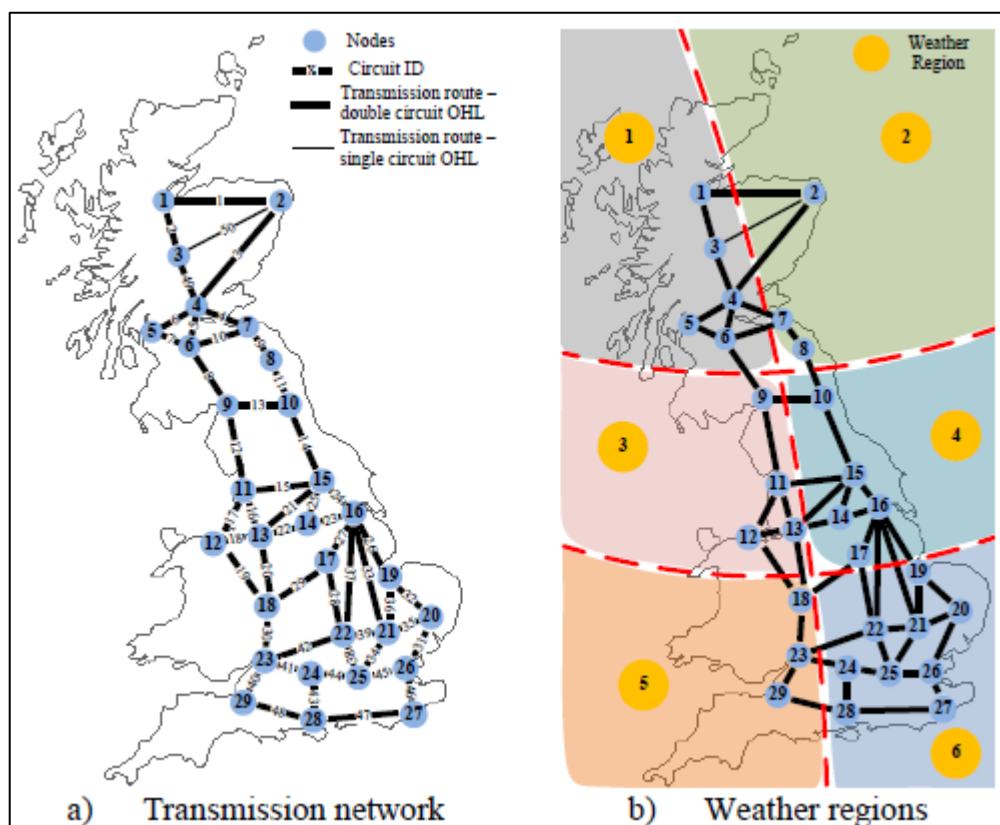
**Fonte: Panteli et al. (2016).**

Além da modelagem da fragilidade das torres de transmissão, a metodologia proposta incorpora, ainda, taxas de falhas das linhas, com base em dados estatísticos, expurgando as relativas à queda de torre. Também se adota tempos médios de



recuperação das mesmas, que podem ser modificados para analisar a sensibilidade à melhoria de gestão das equipes de manutenção.

Aplicou-se o modelo proposto ao sistema elétrico britânico, simplificando-o e dividindo-o em georregiões, em que as condições de vento são homogêneas, conforme apresentado na Figura 13. Entretanto, poderia ser estendido a mais elementos e diferenciado mais regiões.

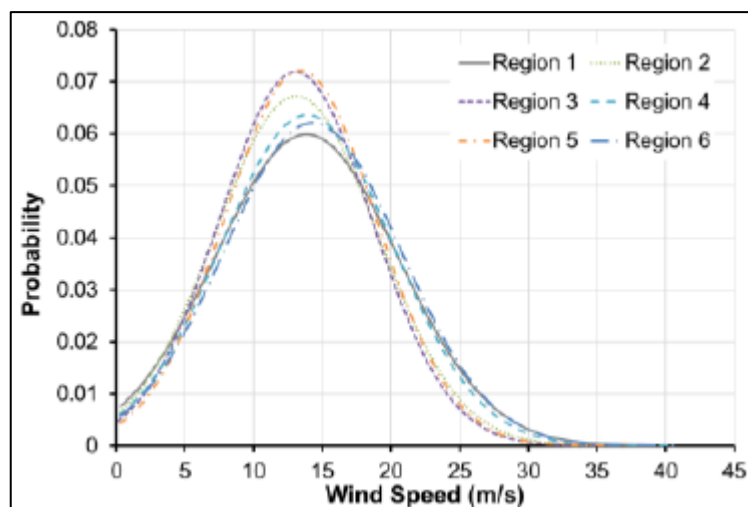


**Figura 13 - Sistema de transmissão da Grã-Bretanha**

**Fonte: Panteli et al. (2016).**

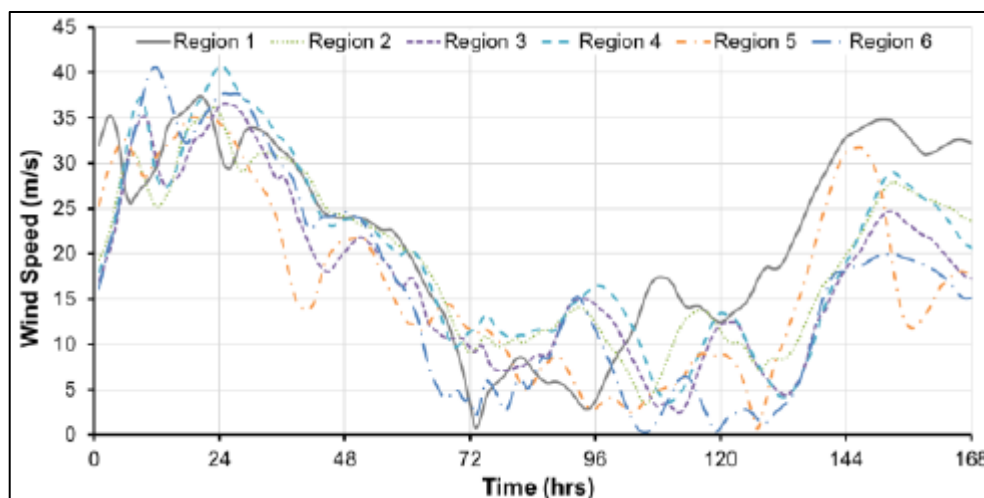
A construção das séries temporais dos perfis de vento regionais é feita usando a reanálise do *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications* (MERRA). Perfis de vento da série temporal para 33 anos com uma resolução de hora a hora são gerados e, em seguida, para uma semana de inverno, o perfil de vento horário é selecionado aleatoriamente entre os 33 anos para cada simulação. Esses perfis de vento foram gerados em diferentes locais dentro de cada região e, em

seguida, o perfil do vento com a velocidade máxima (que causaria o maior dano ao corredor de transmissão) foi escolhido como representativo para cada região para modelar o “piores caso”. De acordo com o escritório de meteorologia do Reino Unido (disponível em <http://www.metoffice.gov.uk/public/weather/climate-extremes>), a maior velocidade de vento de baixo nível já registrada é de, aproximadamente, 63,5 m/s. Esses valores altos nos dados de vento oriundos do MERRA são muito raros. Para obter velocidades de ventos que possam ameaçar a resiliência do sistema, os perfis horários de vento obtidos pela reanálise MERRA são escalonados. Isso é, usa-se um fator de multiplicação para todo o perfil do vento para gerar perfis de vento horários velocidades máximas próximas à histórica. Essa mesma técnica pode ser empregada para avaliar os efeitos das mudanças climáticas, bastando avaliar qual será a maior rajada de vento. A Figura 14 mostra a função de densidade de probabilidade dos perfis de vento regionais com  $w_{max} = 40\text{m/s}$  e a Figura 15 representa um exemplo dos perfis de vento regionais horários com o mesmo  $w_{max}$ .



**Figura 14 - Função de densidade de probabilidade dos perfis de vento regionais com  $w_{max} = 40\text{m/s}$**

**Fonte: Panteli et al. (2016).**



**Figura 15 - Exemplo dos perfis de vento regionais horários com  $w_{max} = 40\text{m/s}$**   
**Fonte: Panteli et al. (2016).**

Assim, pode-se, então, simular a tempestade, os efeitos sobre o sistema e as consequências, sejam elas o número de linhas que saem de serviço por queda de torres, a potência interrompida ou a energia não suprida, para ventos máximos de 40, 50 e 50 m/s. Os resultados estão sintetizados na Figura 16 e na Figura 17. A primeira mostra, primordialmente, a energia não suprida no período da tempestade, o que representa a vulnerabilidade do sistema incluindo os aspectos físicos e operacionais. A segunda representa a vulnerabilidade da infraestrutura física, destacando uma parcela relevante da resiliência que demanda investimentos significativos.

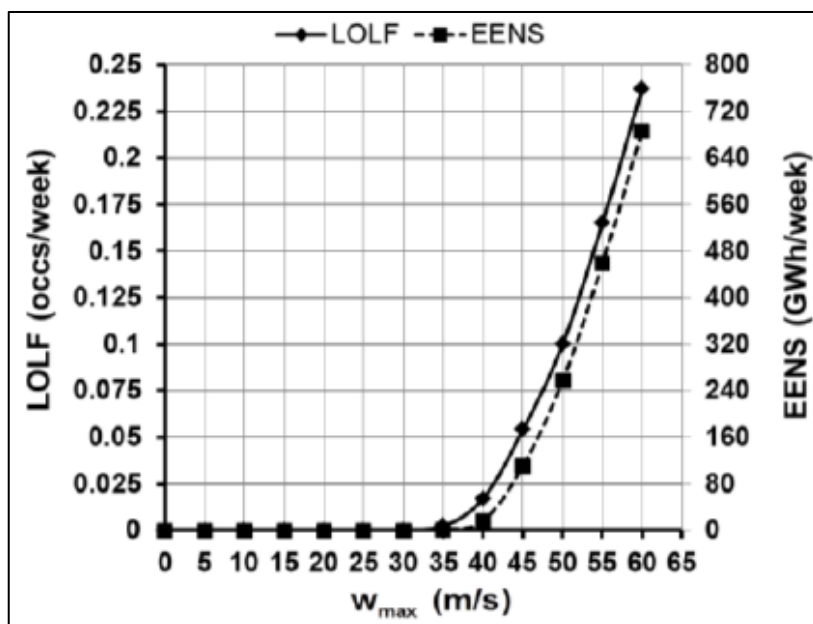


Figura 16 - Influência do vento no LOLF e EENS em função do  $w_{max}$  de cada perfil de vento para o caso base  
Fonte: Panteli et al. (2016).

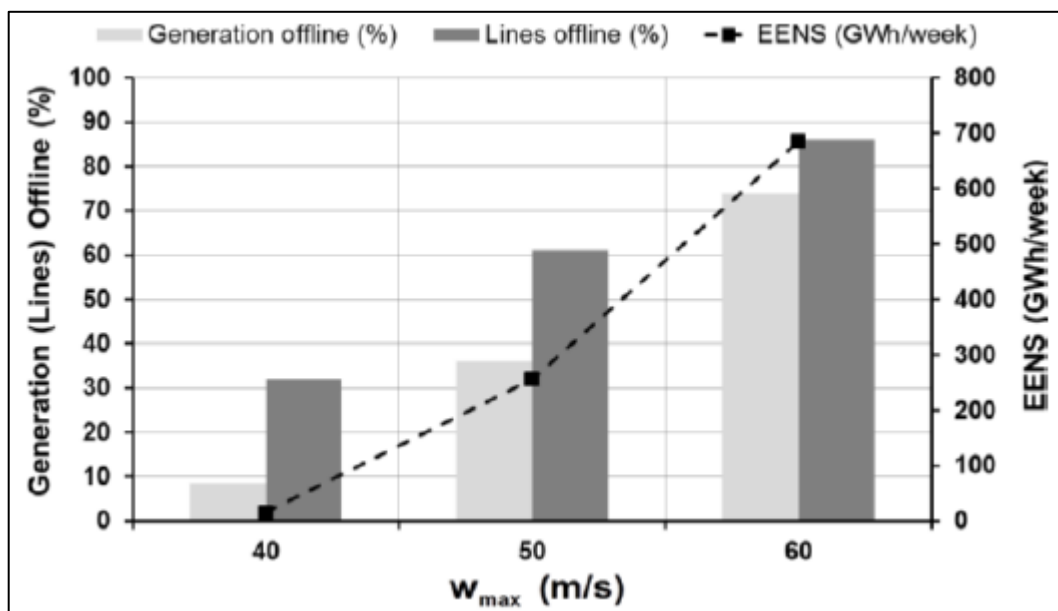
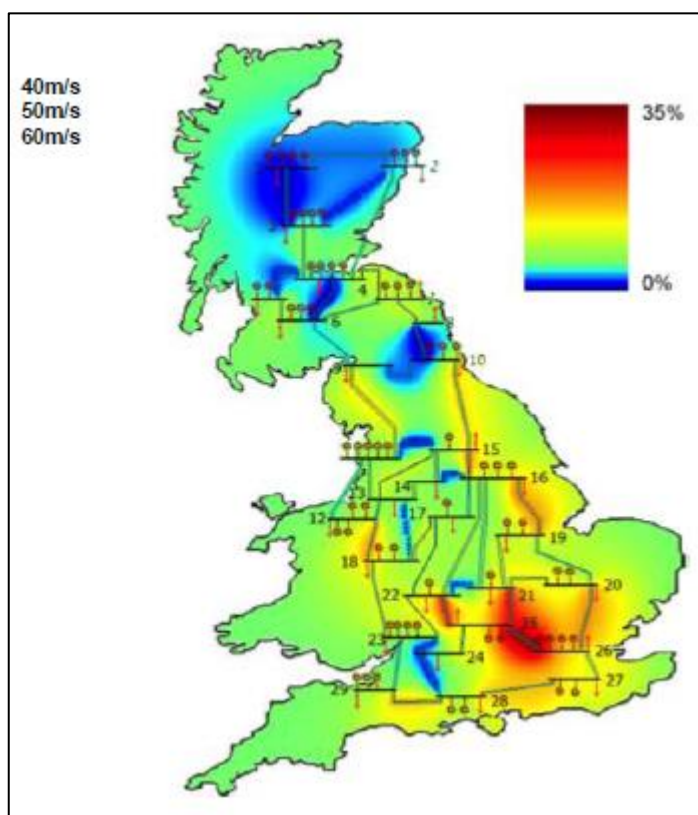


Figura 17 - Geração e linhas de transmissão que foram desligadas durante tempestades com velocidades máximas de vento de 40, 50 e 60m/s, respectivamente  
Fonte: Panteli et al. (2016).

Nesse contexto, a energia não suprida pode ser uma boa métrica para cálculo do RAW e que poderá ser usado para apoiar as estratégias de aprimoramento de resiliência do sistema como um todo. A Figura 18 mostra uma visão geográfica, destacando os corredores mais sensíveis (maiores RAW). O artigo destaca ainda que há uma mudança significativa de RAW entre os corredores, dependendo do vento máximo adotado. Quanto maior a rajada, mais ficam destacados os pontos onde se necessitam investimentos, enquanto, para rajadas menores, o tempo de reparo é o item mais sensível.



**Figura 18 - Mapeamento de RAW para  $w_{max} = 40m/s$**

**Fonte: Panteli et al. (2016).**

#### 5.2.4. Distribuição

De acordo com Maliszewski e Perrings (2012), a resiliência em um sistema de distribuição pode ser medida pela velocidade com que o sistema retorna às suas condições normais após uma falha, aproximada pela duração da interrupção. Na

abordagem utilizada por eles, foi considerado que a resiliência da infraestrutura de distribuição depende tanto das características físicas da rede quanto da eficácia de seu gerenciamento. Nas características físicas foram consideradas: (i) A natureza das ameaças externas: o tipo e a intensidade do clima ou outras ameaças estão positivamente correlacionadas com a extensão dos danos e, portanto, com os tempos de reparo; (ii) Condições ambientais predominantes: locais com linhas aéreas mais expostas a condições de vegetação maiores, mais pesadas e mais abundantes serão mais vulneráveis a interrupções devido a eventos climáticos; (iii) Uso do solo: áreas densas podem sofrer mais interrupções ou exigir mais tempo de restauração devido ao congestionamento; (iv) Características infraestruturais: o tipo de alimentador (aéreo ou subterrâneo), sua idade e se um sistema de distribuição está em loop (interconectado) ou é radial afeta sua fragilidade a ameaças climáticas. Já o gerenciamento da rede foi avaliado segundo características de triagem: (i) O número de clientes afetados: as concessionárias darão prioridade de restauração a interrupções que afetem um grande número de clientes; (ii) Tipo de clientes afetados: as concessionárias darão prioridade de restauração a ativos críticos, como hospitais; (iii) Acesso dos caminhões de reparo da concessionária ao local da interrupção: locais próximos a pátios de reparos possibilitam menores períodos de restauração. O trabalho demonstra ainda a importância da consideração do componente espacial na avaliação da duração das interrupções, utilizado de forma integrada com atributos ambientais, de infraestrutura e condições sociais na avaliação da resiliência da rede de distribuição. O teste do método proposto foi aplicado para o histórico de interrupções no sistema residencial de parte da cidade de Phoenix, Arizona, entre 2002 e 2005 (Figura 19). As condições de infraestrutura incluíram o tipo de rede (aérea ou subterrânea), idade e localização. As condições ambientais incluíram temperatura, vegetação, abundância de aves e proximidade com o deserto. As características da triagem incluíram o número de interrupções não agendadas, o número de clientes afetados e os tipos de clientes afetados.



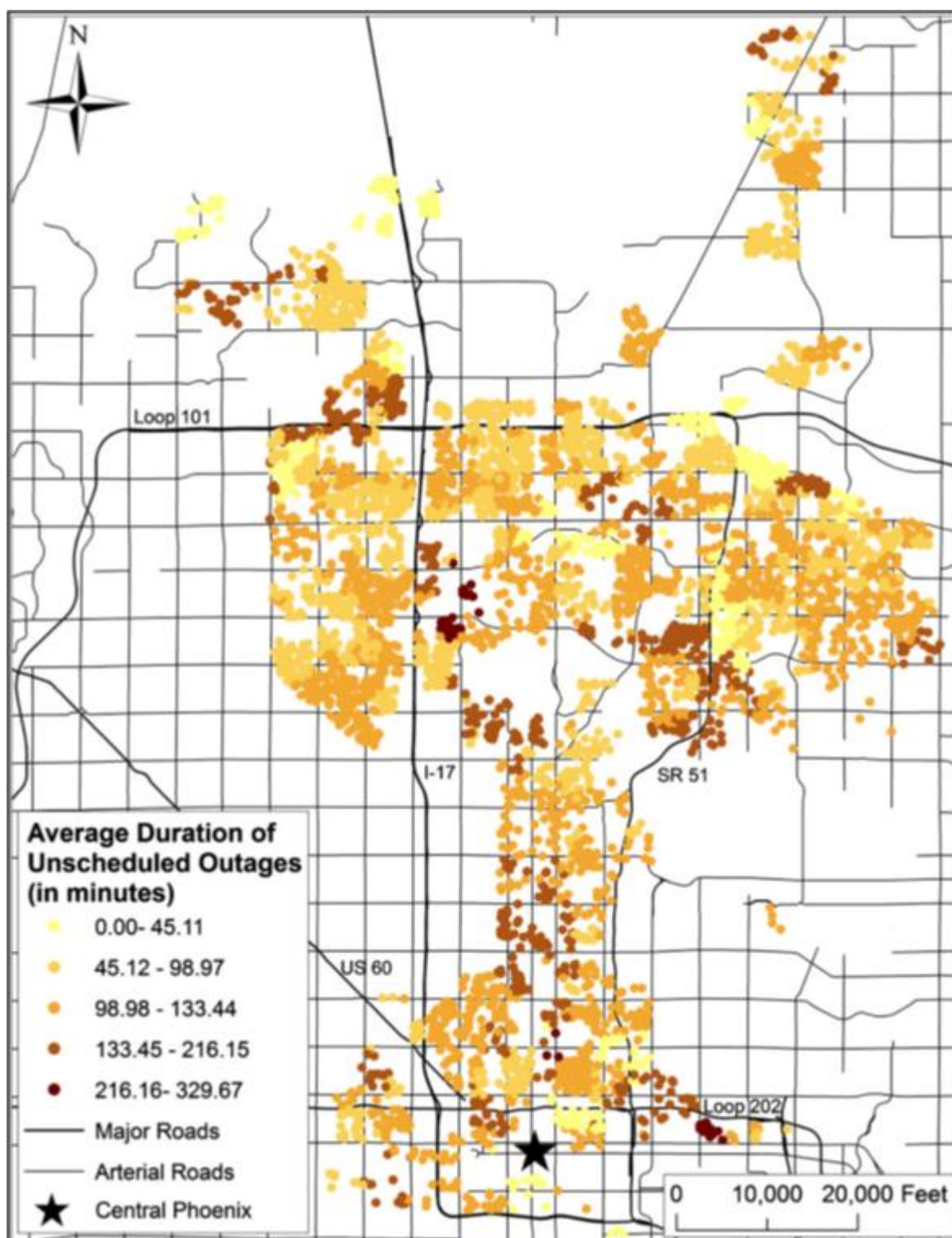


Figura 19 - Mapa dos tempos médios de duração da interrupção em minutos (2002 a 2005)

Fonte: Maliszewski e Perrings (2012).

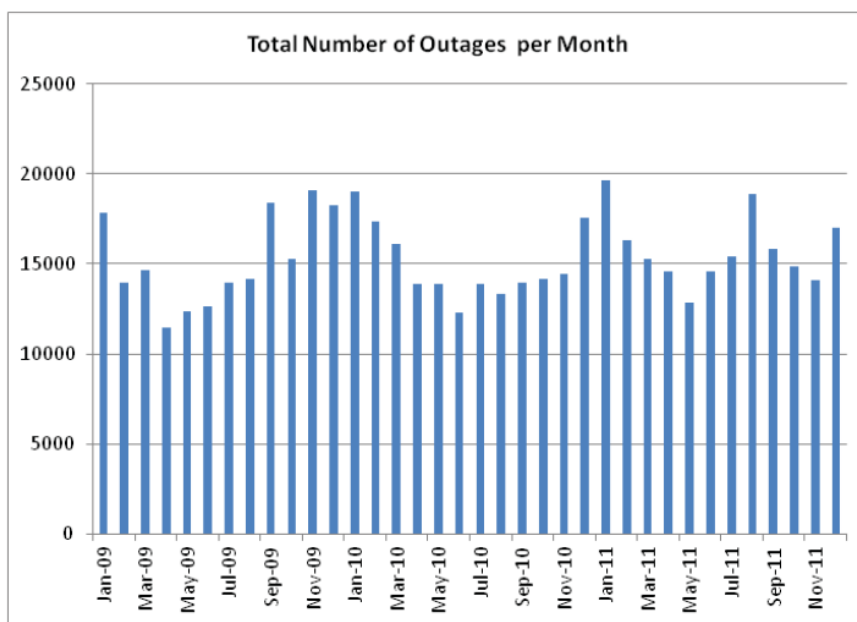


O método aplicado considerou um modelo de regressão da duração das interrupções conforme a Equação 10. Nessa equação,  $y$  corresponde ao vetor de observações sobre a variável dependente,  $X$  é uma matriz de observações sobre as variáveis independentes,  $\beta$  é o vetor de coeficientes de regressão a serem estimados,  $u$  é o vetor de termos de erro espacialmente autocorrelacionados,  $\lambda$  é o coeficiente para ser estimado e  $e$  é o vetor de termos de erro. A matriz de ponderações espaciais  $W$  contém elementos binários que caracterizam a vizinhança dos pontos de consumo modelados.

$$y = X\beta + \lambda Wu + e \quad \text{Equação 10}$$

Além das variáveis independentes citadas anteriormente, o modelo de duração de interrupções considerou interações entre as mesmas, como a relação verificada em falhas em locais com linhas de distribuição aéreas e a presença de vegetação densa. Foram verificados melhores resultados com a utilização do modelo espacial na análise da resiliência da rede, fornecendo informações adicionais sobre o grau em que as residências vizinhas sofrem interrupções similares.

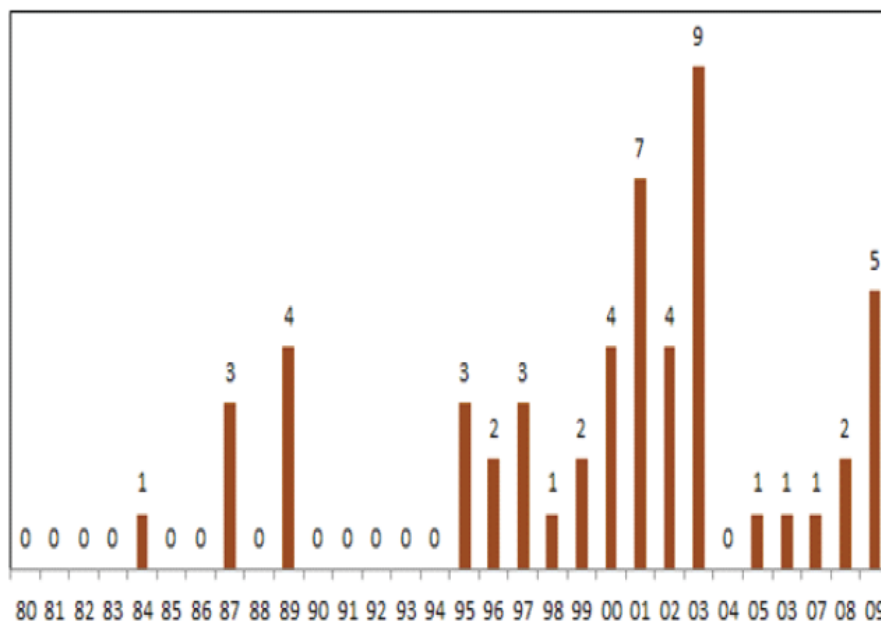
Eventos climáticos extremos causam sérios danos às concessionárias de energia elétrica e seus clientes, com alto número de ocorrências simultâneas e maior tempo de recuperação do sistema elétrico. Neste contexto, Molina et al. (2013) avalia a evolução histórica de ocorrências nas redes aéreas de distribuição das Centrais Elétricas de Santa Catarina (Celesc) face ao aumento de eventos climáticos extremos no estado de Santa Catarina. Foram identificados os seguintes fenômenos climáticos: (i) ocorrência frequente de ciclones (2-3 eventos por mês, nos meses de abril a setembro); (ii) tempestades associadas a frentes frias (3-4 eventos por mês, com maior intensidade nos meses de abril a setembro); (iii) tempestades associadas a baixa pressão originada do Paraguai (maior intensidade e maior nível ceráunico nos meses de setembro a março); e (iv) tempestades associadas ao efeito orográfico. A evolução das interrupções no sistema de distribuição da concessionária pode ser observada na Figura 20.



**Figura 20 - Número total de interrupções na Celesc por mês (2009 - 2011)**

**Fonte: Molina et al. (2013).**

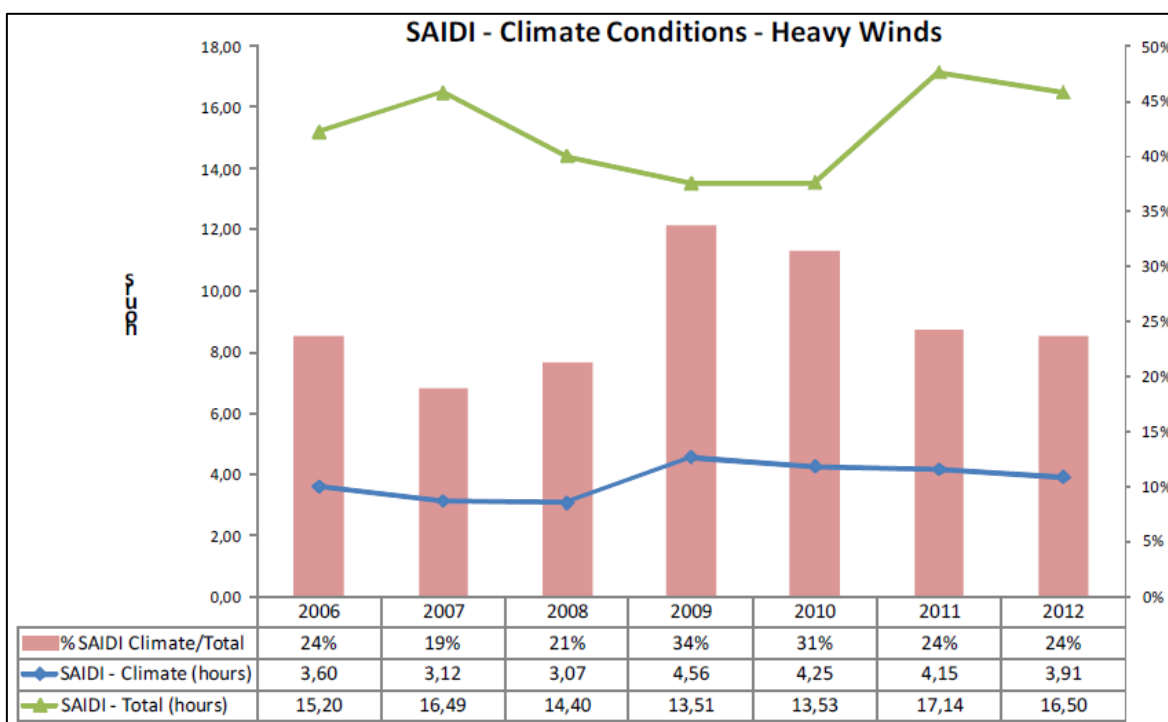
A Figura 21 mostra a frequência anual de tornados registrados em Santa Catarina, com destaque para o aumento ao longo do período e registros do fenômeno em quase todos os anos a partir do final da década de 90.



**Figura 21 - Frequência anual de tornados em Santa Catarina (1980 - 2009)**

**Fonte: Molina et al. (2013).**

O trabalho mostra, ainda, o aumento das interrupções na rede da concessionária relacionados a fenômenos climáticos, com uma média anual de mais de 30.000 eventos nos anos de 2009 a 2012. A maioria desses eventos está relacionada à vegetação ou a objetos lançados na rede de distribuição. No conjunto de fatores relacionados ao tempo de recomposição do sistema, as atividades de substituição de postes demandam maior consumo de tempo, podendo envolver o trabalho de equipes especiais. A complexidade dessas atividades pode ser agravada quando a falha em um poste causa danos nas estruturas adjacentes. Além do tempo de execução dos reparos, a duração da interrupção depende do tempo de deslocamento das equipes, que também pode ser influenciado pelos fatores climáticos relacionados às interrupções. A ocorrência de muitos eventos simultâneos também pode exceder a capacidade das equipes de trabalho disponíveis. A Figura 22 mostra a relação entre o indicador<sup>3</sup> de duração da interrupção total e aquele causado por eventos climáticos.



**Figura 22 - Causas de interrupções em tempestades críticas na Celesc (2006 - 2012)**

**Fonte: Molina et al. (2013).**

<sup>3</sup> SAIDI: System Average Interruption Duration Index.

A avaliação dos fatores que contribuem para o quadro de interrupções apresentado apontou os seguintes aspectos: (i) Dimensionamento mecânico das linhas de distribuição com base em dados históricos, de temperatura e vento, que não refletem as condições atuais; (ii) As normas de projeto e construção das redes não refletem a variabilidade de requisitos de projeto de cada região do estado de Santa Catarina; e (iii) Baixa confiabilidade das linhas de distribuições existentes instaladas em locais críticos, com tempo de reparo elevado.

Por fim, visando encontrar soluções para a redução dos impactos de eventos climáticos para a concessionária e seus clientes, Molina et al. (2013) define os seguintes pontos para desenvolvimento de estudos: (i) Redefinição dos parâmetros meteorológicos para dimensionamento mecânico de componentes, adequados para atender demandas críticas projetadas para a vida útil esperada das linhas de distribuição; (ii) Desenvolvimento de normas para projeto de redes em áreas sujeitas a rajadas de vento de alta intensidade, que devem ter coordenação mecânica com foco na minimização da ocorrência e impacto; (iii) Mapeamento da área de concessão da Celesc visando a identificação das regiões críticas sujeitas a fenômenos climáticos mais severos; (iv) Desenvolvimento de critérios de projeto e metodologias de cálculo que considerem essas novas solicitações adversas nas estruturas; (v) Padronização e uso de novos componentes na construção de linhas de distribuição que atendam melhor aos requisitos do clima.

De forma análoga ao sistema de transmissão, medidas de resiliência na distribuição de energia incluem especificação de redundâncias em sistemas de controle, múltiplas rotas, realocação e/ou distribuição subterrânea para proteção contra altas temperaturas, vento, corrosão e inundação, entre outras. A Tabela 10 exemplifica um conjunto de medidas para cada tipo de impacto climático que podem ser consideradas, tanto em sistemas de transmissão quanto na distribuição de energia (T&D).

**Tabela 10 - Exemplos de Medidas de Resiliência para T&D**

**Fonte: APEC (2017).**

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

A Figura 23 ilustra um exemplo de adoção de padrões mais elevados para projetos de infraestrutura que estão sendo implementados. No rastro do furacão Sandy que atingiu a Costa Leste dos EUA e paralisou o sistema de energia de várias cidades, foi adotada a elevação de subestações acima dos níveis de inundação realizados.

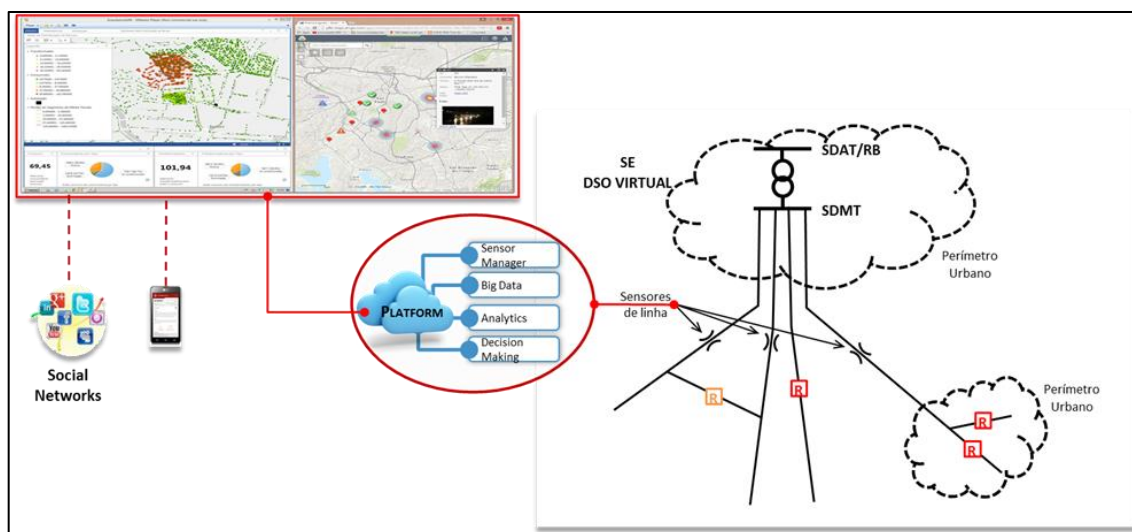


**Figura 23 - Adoção de padrões mais elevados para projetos de infraestrutura para mitigar impactos climáticos**

**Fonte: APEC (2017).**

A rápida introdução da geração distribuída associada à disponibilidade de novas tecnologias de acesso à informação e análise de dados tem mudado o conceito tradicional da atividade de distribuição, surgindo novos conceitos como *Distribution System Operator* (DSO). Esse conceito pode ser visto na Figura 24, em que uma Subestação de Distribuição (SED) e alimentadores a ela conectados são operados de forma independente, mas integrada, incorporando uma série de novos equipamentos dotados de sensores e comunicação para monitorar e atuar de forma remota. Esses dados seriam tratados e analisados através de uma plataforma computacional inteligente para aprimorar a operação e planejamento da rede, melhorando índices de qualidade da rede elétrica como os de adequação e conformidade.





**Figura 24 - Esquema conceitual de um operador descentralizado de distribuição.**

Em um futuro próximo, seriam adicionados novos agentes aos consumidores existentes, tais como, pequenos geradores, consumidores produtores, armazenadores, etc. Nesses agentes seriam incorporados medidores inteligentes e equipamentos para controle a fim de interagir com a rede proporcionando um uso otimizado dos recursos.

A evolução dos recursos energéticos distribuídos (DER), dos sistemas de armazenamento em pequena e média escala, das cargas flexíveis e dos sistemas inteligentes, integrando a operação destes sistemas descentralizados em harmonia com os sistemas integrados, deu origem a novos sistemas (ou subsistemas) que têm sido denominados “*smart grid*” ou “*intelligent grid*”. Esses sistemas geralmente têm uma característica regional, podendo ser operados descentralizadamente, como as microrredes (“*microgrids*”) contidas em áreas privadas (por exemplo, os existentes em campi universitários), ou ter uma integração com a rede de distribuição local, com impactos significativos que não vão além das subestações de distribuição.

#### 5.2.5. Demanda

Os efeitos das mudanças climáticas também afetam o comportamento da demanda de eletricidade, principalmente aquela demanda que é utilizada para os sistemas de controle térmico em ar condicionado (conforto) e em ambientes industriais, e na



demanda usada pelos sistemas frigoríficos para o resfriamento e armazenamento dos mais variados produtos. O aumento na demanda por resfriamento aumenta a demanda máxima do sistema exigem capacidades de geração adicionais.

As cargas térmicas totais desses sistemas podem ser consideradas, com boa aproximação, como sendo diretamente proporcionais à diferença de temperatura entre o local condicionado, ou do produto armazenado, e a temperatura do ambiente. Considerando as condições usuais brasileiras e adotando um cenário com um acréscimo de 1,5°C na temperatura do ambiente, estima-se um aumento na demanda de aproximadamente 14% para os equipamentos de ar condicionado e em torno de 3% para os sistemas frigoríficos.

Além disso, os sistemas de ar condicionado e frigoríficos normalmente empregam ciclos termodinâmicos, em que a rejeição do calor para o ambiente dá-se durante a condensação de um fluido frigorífico. Quando há um acréscimo na temperatura do ambiente, verifica-se também um aumento da temperatura de condensação e, conseqüentemente, uma redução na eficiência desse ciclo térmico. Como exemplo, um equipamento industrial que usa R717 (amônia) como fluido frigorífico, operando com temperaturas de evaporação de -20°C e temperatura condensação igual a 30°C apresenta um COP (coeficiente de performance) termodinâmico igual 4,91. Para essas mesmas condições e com um aumento de 1,5°C na temperatura do ambiente, o valor do COP passa para 4,53. Ou seja, verifica-se uma redução na eficiência em torno de 8%.

Pesquisas realizadas no estado de New South Wales, na Austrália, sugerem que apenas o aumento de temperatura projetado para 2100 será responsável por um incremento de 6,14% e 11,3% na demanda de energia elétrica durante o verão e primavera, respectivamente (AHMED et al., 2012).

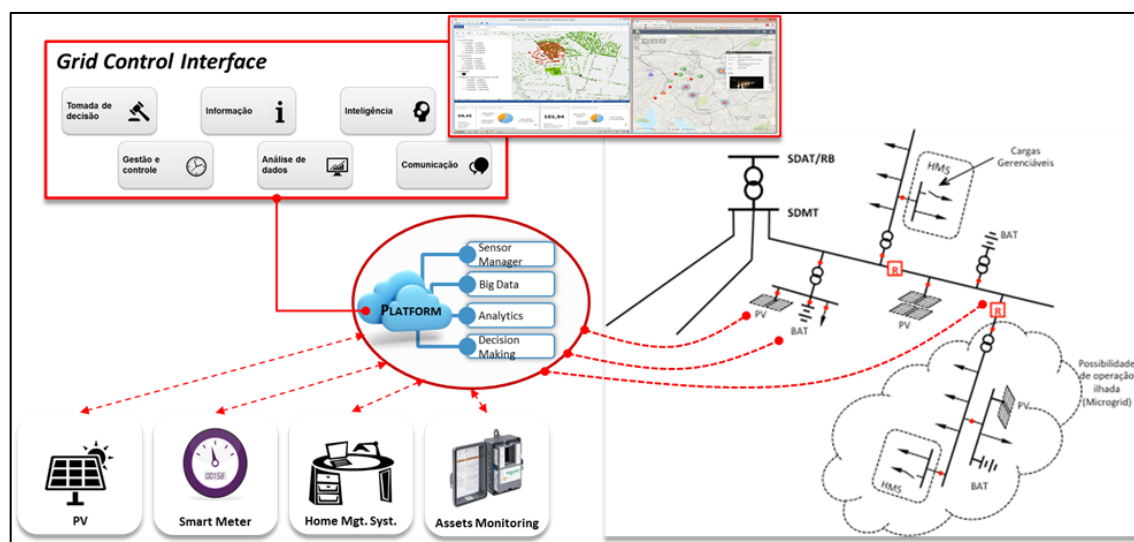
Quando se considera as demandas de pico, o efeito do aumento de temperatura sobre a demanda de energia elétrica pode ser ainda maior. De acordo com Auffhammer et al. (2017), projeções dos efeitos das mudanças climáticas na demanda de energia nos Estados Unidos, não apenas indicam um aumento da demanda em médias, mas

também aumento da intensidade e frequência dos picos de consumo. Como a rede elétrica é dimensionada para suportar a carga máxima, esse aumento nos picos tem implicações significativas nos investimentos futuros em infraestrutura de transmissão e distribuição, sugerindo demanda de investimentos de até 180 bilhões de dólares até o final do século.

Além do impacto do aumento de temperatura sobre a demanda, é importante considerar o efeito combinado de dinâmicas populacionais (crescimento e migrações). Para países onde é maior a frequência de eventos extremos, como furacões e enchentes, o efeito de migrações de pessoas pode ser maior. De acordo com Allen et al. (2016), mudanças climáticas e mudanças na população deverão trazer desafios a infraestrutura em função de mudanças na demanda de energia elétrica. Segundo os autores, sem uma representação espacial da demanda e de como ela pode mudar em uma escala de vizinhança, será difícil determinar quais regiões são mais vulneráveis e quais serão as mais afetadas por mudanças na demanda. Utilizando uma abordagem que considera dinâmicas populacionais e dados geográficos de alta resolução espacial, Allen et al. (2016) sugere que nos próximos 40 anos, a infraestrutura elétrica de áreas com pequenas populações nos Estados Unidos sofrerá maiores impactos com aumento na demanda por energia elétrica causados por aumento de temperatura. Além disso, influxos populacionais podem afetar qualquer região, principalmente nos horários de pico.

Conforme exemplificado em APEC (2017), após o grande terremoto ocorrido em março de 2011 no Japão e o consequente acidente na Usina Nuclear de Fukushima, muitos japoneses começaram a pensar sobre a origem de sua eletricidade. Antes do acidente, todas as casas estavam totalmente energizadas por eletricidade oriunda de grandes usinas elétricas, entretanto durante o apagão causado pelo terremoto, muitas pessoas reconheceram a importância da autossuficiência e da diversidade de energia e começaram a se interessar por sistemas que podem gerar eletricidade localmente, como a energia solar.

Como já apresentado nesse texto, a evolução tecnológica permitirá, no curto para médio prazos, a melhoria da resiliência do consumidor, dada a capacidade de modular seu consumo, produção e armazenamento de forma inteligente. Além do mais, o sistema elétrico como um todo poderá se beneficiar se houver uma interação inteligente entre a distribuidora e os PROSUMERS. (produtor/consumidor). A Figura 25 apresenta uma síntese de uma nova situação vislumbrada para o setor elétrico, em que existe uma interação entre o DSO e os agentes (consumidores, geradores, armazenadores, *prosumers*), incluindo as percepções destes em relação aos serviços prestados pela distribuidora. Ou seja: estaria mais focado na implementação de inteligência mais próxima aos usuários (*end-to-end*).



**Figura 25 - Esquema conceitual da interação entre a distribuição de energia e os usuários/consumidores.**

Na interação DSO/PROSUMERS, seriam explorados amplos meios de comunicação entre as partes, direta ou indireta, como no caso das mídias sociais. Essa é uma forma de se medir a satisfação do usuário em relação ao serviço prestado, bem como pode ajudar na detecção e localização de falhas do serviço prestado.

Uma evolução vislumbrada para a interação entre a rede e os consumidores/usuários, que daria maior resiliência ao sistema elétrico, é os sistemas transativos de energia, citados em Barrager e Cazalet (2014).

O termo “transativo (em inglês, *transactive*)” parece ter sido cunhado por Daniel Wegner em 1985, quando propõe o conceito de “memória transativa”, para descrever o processo social cognitivo distribuído. Ele se aplica a um processo onde indivíduos de um grupo, com distintas habilidades, repartem informações e outros membros do grupo se envolvem nas transações para recuperar estes conhecimentos armazenados. Wegner também definiu o processo transativo associado à construção desta memória, constituído por três estágios: codificação, armazenamento e recuperação.

A codificação é o estágio onde os colegas de grupo adquirem informações mútuas nas respectivas áreas de conhecimento do outrem, classificando-as. Esse conhecimento dá-se normalmente através de conversas, onde cada um diz o que faz e sabe.

O armazenamento é o estágio onde informações relevantes são guardadas com o membro do grupo que detém o conhecimento naquela respectiva área, melhorando o processo de aprendizado do grupo e reduzindo a possibilidade de perda de informação.

A recuperação é o estágio onde um membro do grupo usa a memória transativa desenvolvida para identificar um outro membro que domina o tema requerido, objetivando conseguir este conhecimento. A verificação da qualidade deste conhecimento (utilidade e acurácia) reforçará ou não a informação do membro detentor da mesma. Caso seja inadequada ou imprecisa, o membro especialista será informado e terá que reprocessar seus conhecimentos e rearmazená-los, neste denominado sistema de memória transativa.

Os elementos desses sistemas, pelas características geográficas, podem e devem trabalhar de forma cooperativa, visando melhorar o produto e o serviço que recebem, além de terem proveitos financeiros, se comparada à situação de suprimento hierárquico convencional. É sabido que condições climáticas, de tráfego, da rede elétrica, etc., impactam de maneira similar todos os usuários de uma mesma região. Logo, formas trocas/cooperações entre estes usuários seguramente os beneficiarão.

Estas transações têm caráter ativo, pois requerem um conhecimento das características e capacidades dos participantes. Assim, por exemplo olhando o produto

energia, um usuário que tenha um painel solar pode fornecer esta energia a outros elementos pactuados, se houver insolação suficiente. Em caso de excesso, poderia armazenar esta energia em algum participante que tivesse armazenamento, ou suprir à rede e se creditar depois. Com relação, à qualidade do produto, um conversor estático de uma fonte descentralizada poderia corrigir adequadamente o fluxo de reativo, com impactos na tensão da rede. Isso beneficiaria todo o grupo e deveria ser compensado. A própria distribuidora poderia contratar este serviço de terceiros.

Tem-se, pois, um grande número de produtos e serviços que poderiam ser transacionados entre usuários de energia elétrica de uma região elétrica definida. Essas transações serão mais eficientes quanto melhor os participantes pactuados se conhecerem e entenderem as potencialidades dos outros, além de informar suas próprias necessidades. Isto tem um caráter dinâmico, seja pelos custos da energia e uso da rede, seja pelo equilíbrio deste pequeno mercado.

O processo de um sistema energético transativo assemelha-se ao processo de memória transativa, exigindo também os estágios de codificação, quando se estabelecem padrões de troca, armazenamento das potencialidades/ofertas e a recuperação da informação, que se constitui, neste caso, no pedido por um (ou vários) membros de um produto ou serviço disponível em dado membro deste mercado. A característica ativa deste mercado regional passa pelo contínuo conhecimento das características dos usuários (sejam ofertantes ou demandantes) e da confiança que suas ofertas fazem jus.

De fato, esse processo assemelha-se ao comércio praticado nos varejos mundo afora, com clientes satisfeitos ou não, realimentando os fornecedores, moldando suas demandas e ofertas, criando relações fiduciárias, sem a centralização em algum ente (por exemplo, bolsa), que se encarrega de contabilizar, garantir, armazenar as informações e liquidar as transações.

Finalmente, os sistemas transativos de energia podem ultrapassar as funções prioritárias comerciais, atuando também em condições emergenciais, como em

desastres naturais, agindo de forma preventiva e cooperativa para reduzir os danos dos envolvidos.

## **6. VULNERABILIDADE INCORPORANDO O LADO DA DEMANDA (DA SOCIEDADE)**

Como já foi afirmado anteriormente, o setor elétrico, notadamente em seus estudos de confiabilidade, avalia o dano de uma interrupção de serviço medindo o número de usuários afetados, a potência interrompida ou a energia não suprida. Entretanto, não se preocupa de estender a fronteira e avaliar qual o impacto desta interrupção, não só pela produção interrompida, mas pela perda de satisfação do usuário. Alguns trabalhos preocupam-se em avaliar as perdas econômicas de curto prazo, mas há perdas não monetizáveis para o usuário, como conforto e segurança, que o induzem a tomadas de decisão que vão além das análises da engenharia econômica.

A cada dia fica mais evidente a importância do comportamento do consumidor no equilíbrio de mercado e, como consequência, a sua influência na formação de preços, definição de produtos e determinação de quantidades. Notável foi o trabalho de Von Neumann e Morgenstern (Varian, 1992; Picard, 1990) na definição da função utilidade em condições de incerteza, criando o conceito de aversão a risco e subsidiando tudo que vem em decorrência disso na economia moderna. Mesmo tardio, isso se deu no setor de energia elétrica (Jorion, 1997; Eydeland e Wolyniec, 2003), através das criações de mercados competitivos. Entretanto, esses mercados ainda são incipientes para precificação de longo prazo. Os estudos de vulnerabilidade devem evoluir para incorporar essa “aversão a risco” de um dano severo, o que, diferentemente da energia, não pode ser feito com base em mercado. O mais correto é criar cenários de aversão, dentro de uma lógica econômica e social.

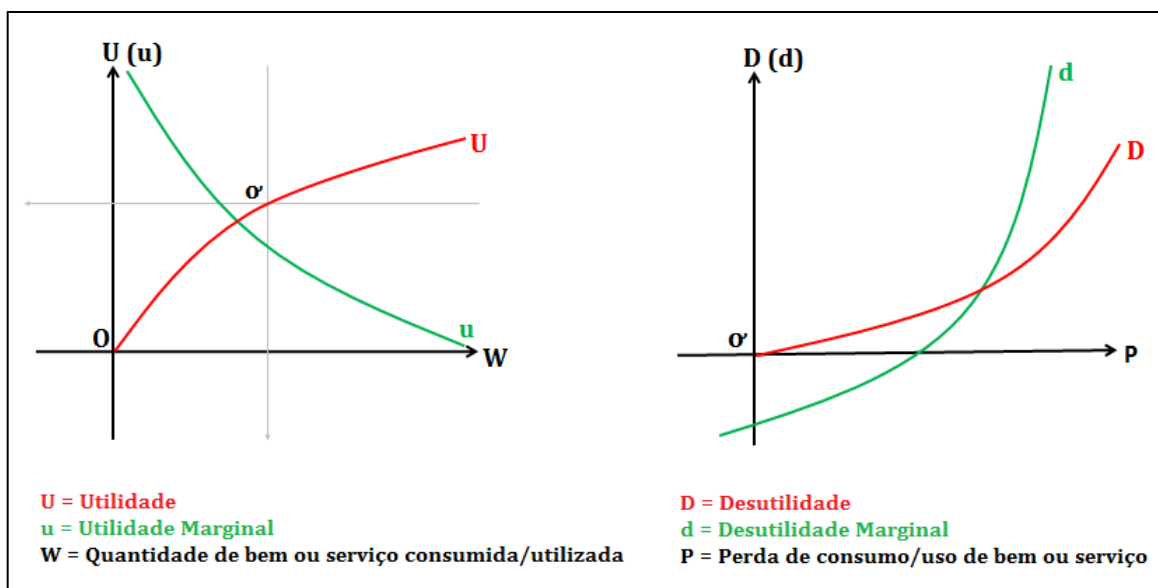
### **6.1. Fragilidades e resiliências da sociedade**

Embora em economia entenda-se como sociedade o conjunto de ofertantes e consumidores, para fins deste trabalho, denomina-se sociedade o conjunto de consumidores e usuários de energia elétrica, sejam eles famílias ou unidades de

produção, que reflitam o caráter de satisfação e de preferência nas curvas de utilidade e de indiferença conceituadas na microeconomia. Objetivamente falando, é o conjunto de consumidores/usuários dos serviços de eletricidade. Estes consumidores/usuários respondem a preços e qualidades dos produtos e serviços de energia elétrica, variando seus consumos. Isso pode ocorrer de uma maneira elástica ou plástica, como já comentado em item anterior. Na primeira, associada normalmente a razoáveis variações de preço e pequenas interrupções, o consumidor/usuário adapta seu consumo para mais ou para menos, voltando ao estado anterior quando a motivação cessa. Esse comportamento leva à definição de *elasticidade do consumo de curto prazo*. Entretanto, se a motivação tem caráter duradouro, a sociedade se transforma, trocando seu parque tecnológico de consumo. Como consequência, mesmo passada a motivação, o consumo não retorna a seu nível inicial, estabelecendo um novo equilíbrio. Essa transformação leva à definição de *elasticidade do consumo de longo prazo*, que mede a capacidade de se transformar de uma sociedade. Esses parâmetros não são fáceis de serem medidos, mas a evolução tecnológica tem contribuído sobremaneira para torna-los mais elevados, como se vê com equipamentos eficientes e, agora, com a geração distribuída embebida. A evolução das baterias dará ainda mais sentido para esta afirmação.

Voltando à questão da função utilidade em condições de incerteza, e do conceito oriundo de aversão a risco, Santos et al. (2014) apresenta uma proposta para incluir esta aversão da sociedade (que pode ser entendida como uma avaliação da fragilidade da sociedade), nos estudos elétricos, que utiliza um conceito relativamente novo e de uso mais comum na economia ambiental, que é a Desutilidade. Observando a Figura 26, a função Utilidade ( $U$ ) de uso ou consumo de um bem ou serviço  $w$  tem um caráter monotonamente crescente e, marginalmente, decresce também monotonamente. A Desutilidade ( $D$ ) tem um caráter complementar à Utilidade, crescendo à medida que reduz o consumo ou uso de um bem ou serviço.





**Figura 26 - Curvas das funções Utilidade e Desutilidade**

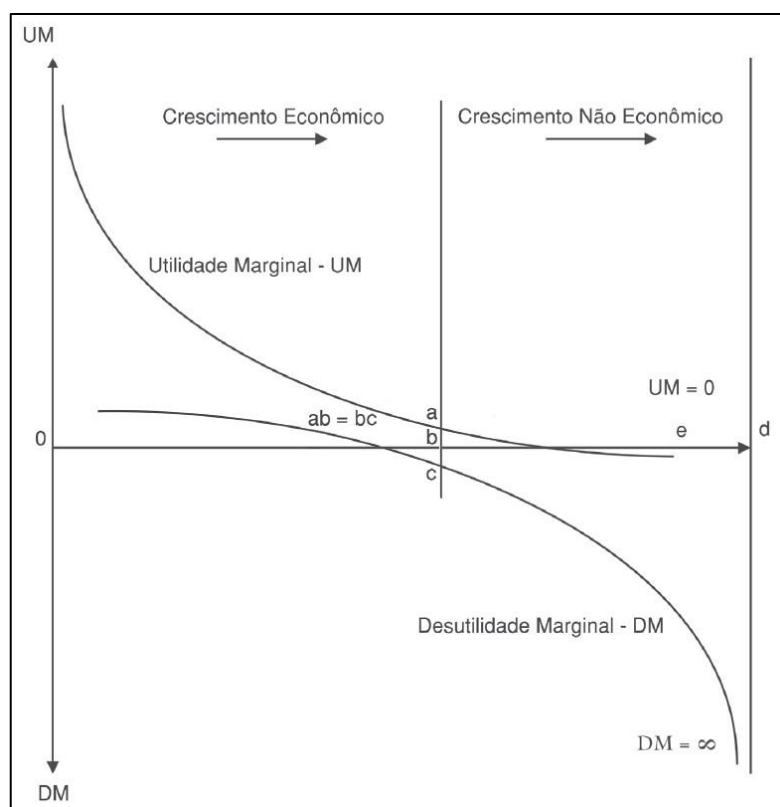
**Fonte: Adaptado de Santos et al. (2014).**

Mas não é só pela falta de um serviço ou bem técnico que a sociedade fica vulnerável. A questão ambiental tem se mostrado relevante, seja nos impactos globais, seja nos locais. A Desutilidade se faz presente à medida que se tem uma perda de um valor social ou ambiental, como uma área de floresta ou a condição saudável de um corpo hídrico. As novas gerações passaram a valorizar o ambiente, preterindo outros consumos a seu favor. E isso passou a ser determinante para o planejamento de longo prazo de qualquer setor. As políticas de introdução de energias renováveis são um excelente exemplo disso. Logo, os modelos têm que passar a introduzir esses conceitos e preferências. Romeiro (2012) afirma *“Para ser sustentável, o desenvolvimento deve ser economicamente sustentado (ou eficiente), socialmente desejável (ou incluyente) e ecologicamente prudente (ou equilibrado)”*. Oportunamente, comenta sobre a mudança de hábitos da sociedade, colocando em destaque a opção de crescimento zero, como segue: *“A aceitação, por parte da população, de restrições ambientais que envolvam algum tipo de sacrifício em benefício de populações de outros países e/ou de um futuro longínquo implica, forçosamente, uma certa dose de altruísmo, em especial se essas restrições visam parar o crescimento econômico (Romeiro, 2000). Entretanto, esse necessário altruísmo legitimador de*

*políticas de crescimento zero poderá ser reforçado pela percepção crescente de que o nível de conforto material atual é mais do que suficiente e que continuar o esforço de crescimento produzirá mais malefícios que benefícios. Uma sensação de que se poderia estar entrando no que Daly & Farley (2004) chamaram de crescimento não econômico (Figura 27), onde o aumento da satisfação (utilidade) trazido pelo crescimento econômico é menor do que o aumento da insatisfação (desutilidade)”.*

Ao comentar sobre a desutilidade marginal Romeiro afirma que “esta é crescente porque reflete os efeitos negativos do crescimento econômico sobre o bem-estar, entre eles o causado pela degradação ambiental e outros fatores de risco, bem como pelo aumento da entropia social.”, adicionando, em relação à curva de utilidade marginal, que “ela é decrescente na medida em que a satisfação inicial de necessidades mais básicas gera uma utilidade maior do que o consumo subsequente de bens menos imprescindíveis.”.

Romeiro comenta ainda sobre o efeito intergeracional: “Como a geração atual parte de um nível de conforto material já elevado, o aumento da renda e o consequente aumento do consumo deveriam resultar num ganho de utilidade menor do que aquele obtido pela geração anterior. Na verdade, foi constatado que esse ganho tendeu a ser nulo. ... (pesquisas) mostram que o crescimento da renda não fora acompanhado de um aumento da felicidade das pessoas tal como elas percebiam isso. Havia uma correlação positiva, no mesmo período de tempo, entre nível de renda e grau de felicidade declarada – ou seja, uma maior proporção de pessoas se declarava feliz nos extratos superiores de renda; entretanto, em séries temporais, essa correlação desaparecia: a proporção de pessoas se declarando felizes permanecia constante.”.



**Figura 27 - Curvas de utilidade marginal e desutilidade marginal**

**Fonte: Romeiro (2012).**

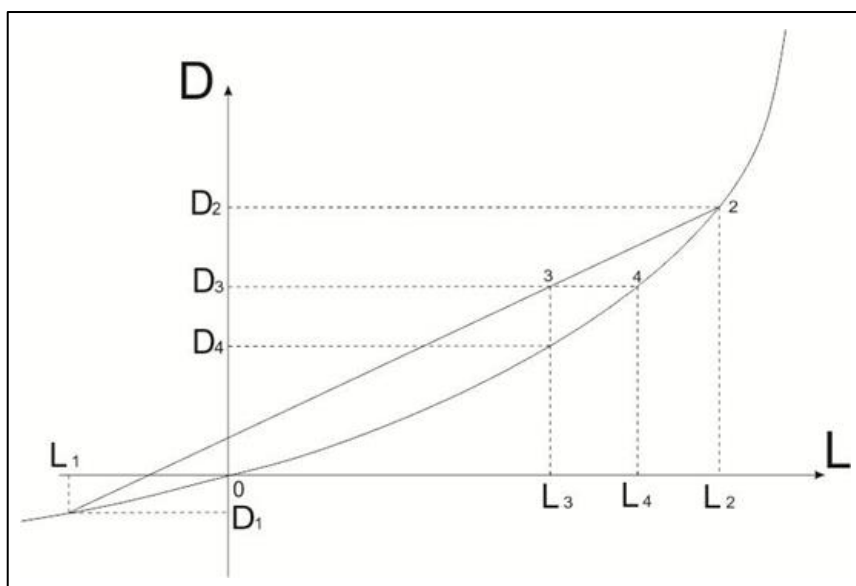
Há uma clara conjugação de fatores ocorrendo na economia: primeiramente, os jovens não estão tão motivados a aumentar seus consumos, pois as utilidades marginais apresentam-se reduzidas; segundo, esta geração se mostra muito insatisfeita com perdas de patrimônios ambientais e valores, refletido na crescente desutilidade marginal; terceiro, a tecnologia tem permitido aumentar a produção a custos marginais zero (sem necessidade de expansão da capacidade), através do compartilhamento, da cooperação e do uso de sistemas inteligentes para a devida alocação de recursos.

Em relação ao clima (foco deste trabalho), Romeiro comenta: “A emergência da problemática do aquecimento global nos anos 1990 teve um impacto importante no debate sobre desenvolvimento sustentável em dois aspectos fundamentais: o problema do tratamento do risco ambiental e, novamente, a questão do “trade-off” entre crescimento econômico e meio ambiente. Em relação ao primeiro aspecto, a noção de

*prudência cede lugar ao conceito mais adequado e preciso de Precaução, elevado à condição de princípio adotado formalmente na Conferência Rio 92".* Esse princípio da precaução aplicado ao clima significa dizer que as opções energéticas devem incorporar pesos distintos, face ao seu efeito poluidor, mesmo que isso ainda não esteja plenamente incorporado nas preferências da sociedade. Entretanto, mais uma vez a nova geração tem valorizado este risco, por ser ela própria a que sofrerá as consequências do aumento global de temperatura.

Voltando ao setor elétrico, a redução de consumo pode se dar por efeito do preço ou por interrupção no serviço. Empregando o mesmo raciocínio proposto por Von Neumann e Morgenstern para calcular a aversão a risco (prêmio associado), Santos et al. (2014) propôs uma medida de resiliência do usuário/consumidor face a reduções de consumo em condições de incerteza, utilizando também o conceito de desutilidade.

Sendo  $L$  a perda do serviço e  $P$  a probabilidade associada a essa perda, tem-se a função desutilidade de um usuário/consumidor ou sociedade refletida na Figura 28. Nesta figura,  $L_1$  representa o pleno atendimento, associado a uma probabilidade  $P_1$ , e  $L_2$  é a redução da carga face ao aumento de preço ou a uma interrupção, e  $P_2$  a probabilidade associada a essa redução.



**Figura 28 - Função desutilidade de um usuário/consumidor ou sociedade**

Fonte: Santos et al. (2014).

Pode-se dizer que a perda esperada do serviço é dada por  $E(L)$ , conforme a Equação 11, sendo:  $P_1 + P_2 = 1$ .

$$E(L) = P_1 \cdot L_1 + P_2 \cdot L_2 = L_3 \quad \text{Equação 11}$$

Por sua vez, a desutilidade esperada  $D_3$ , que é a desutilidade associada a cada condição de atendimento  $L$  multiplicada pela probabilidade associada, é dada por  $E(D)$ , conforme a Equação 12.

$$E(D) = P_1 \cdot D_1 + P_2 \cdot D_2 = D_3 \quad \text{Equação 12}$$

Observe-se, da Figura 28, que  $D_3$  está associada a uma perda de serviço  $L_4$ , maior que  $L_3$ , que é a perda de serviço esperada (Equação 13).

$$D_3 = D(L_4) = E(D) \quad \text{Equação 13}$$

Pode-se, então, dizer que a sociedade sente de forma mais intensa a interrupção dos serviços do que os cálculos técnicos indicam ( $L_4$  maior que  $L_3$ ). A diferença desses valores pode ser utilizada como uma medida da fragilidade da sociedade, face a uma probabilidade  $P_1$  de se manter o pleno serviço (Equação 14).

$$\Delta L = L_4 - L_3 \quad \text{Equação 14}$$

Assim, uma avaliação de vulnerabilidade de um serviço de eletricidade com base na potência interrompida ou energia não suprida deveria incorporar um valor adicional  $\Delta L$  que reflita a desutilidade daquela sociedade atingida pelo dano.

Uma outra forma de se avaliar essa fragilidade é calcular qual é a probabilidade de perda de pleno serviço ( $P_4$ ) que daria o mesmo nível de satisfação (ou insatisfação) da condição vigente. Em outras palavras: qual deveria ser a melhoria do serviço (redução da probabilidade de interrupção)? Para esse cálculo, tem-se:

- $P_3$  é a probabilidade desejada para se ter pleno o serviço  $L_1$  (maior que  $P_1$ ).

- $P_4$  é a nova probabilidade de perda de serviço (menor que  $P_2$ ), sendo  $P_4 = 1 - P_3$ .

Daí, observando a Figura 28, tem-se a Equação 15:

$$D_4 = P_3 \cdot L_1 + P_4 \cdot L_2 = E(D) \quad \text{Equação 15}$$

Assim, pode-se calcular  $P_4$ , por meio da Equação 16:

$$P_4 = \frac{D(L_3) - D(L_1)}{D(L_2) - D(L_1)} \quad \text{Equação 16}$$

A diferença  $\Delta P$  entre  $P_2$  e  $P_4$  é a medida da melhoria desejada pelos usuários do sistema elétrico em análise, de forma a ficarem igualmente satisfeitos como se não fossem sujeitos à função de desutilidade. Em outras palavras, seria uma medida da melhoria da resiliência procurada (Equação 17):

$$\Delta P = P_2 - P_4 \quad \text{Equação 17}$$

Em síntese, há duas maneiras predominantes de se avaliar a resiliência de um sistema: a primeira é avaliar a variação de dano entre duas condições e a segunda é avaliar a variação de risco associado a essas duas condições. Foi o que se fez aqui, só que considerando a percepção de perda de utilidade da sociedade.

A grande dificuldade de se estabelecer métricas com base nas funções de utilidade ou de desutilidade é a impossibilidade em obtê-las diretamente. O que se tem são medidas de parâmetros secundários, embasados nos seus fundamentos, como é o caso da elasticidade ou da disposição a pagar. Entretanto, tem-se bem conhecido o formato destas funções. Assim, Santos et al. (2014) propõe adotar uma função exponencial, com expoente maior que um para a desutilidade, tendo como variável independente um parâmetro que represente bem a fragilidade. Assim, poderia ser, por exemplo, a condição densidade populacional, pois isso está associada a uma grande dependência da energia elétrica em funções como trânsito, segurança,

serviços hospitalares, etc. O fato de se ter maior densidade populacional indica uma maior verticalização, dependendo aquela sociedade de suprimento mais confiável, pois é mais frágil a falta de serviços como elevação, bombeamento e iluminação. De outra forma, pode ser considerada como variável independente a própria densidade de consumo energético (quilowatt-hora por metro quadrado), que representa essa dependência.

## 6.2. Análise espacial das vulnerabilidades sociais

Os parâmetros utilizados para caracterizar as fragilidades da sociedade e que são considerados como variáveis para cálculo da vulnerabilidade, como densidade populacional, características de consumo (comercial, industrial, hospitalar), trânsito, segurança, possuem forte dependência espacial. Dessa forma, é importante conhecer como a sociedade se organiza no espaço geográfico e quais são as relações e as dependências espaciais entre os parâmetros que caracterizam sua vulnerabilidade, o que será discutido neste tópico.

Entre 60 a 80% do consumo global de energia é consumida em áreas urbanas e esse número tende a ser ainda maior considerando as projeções de aumento da população urbana (SHARIFI e YAMAGATA, 2016). Portanto, a análise geográfica das fragilidades da sociedade será direcionada à população urbana.

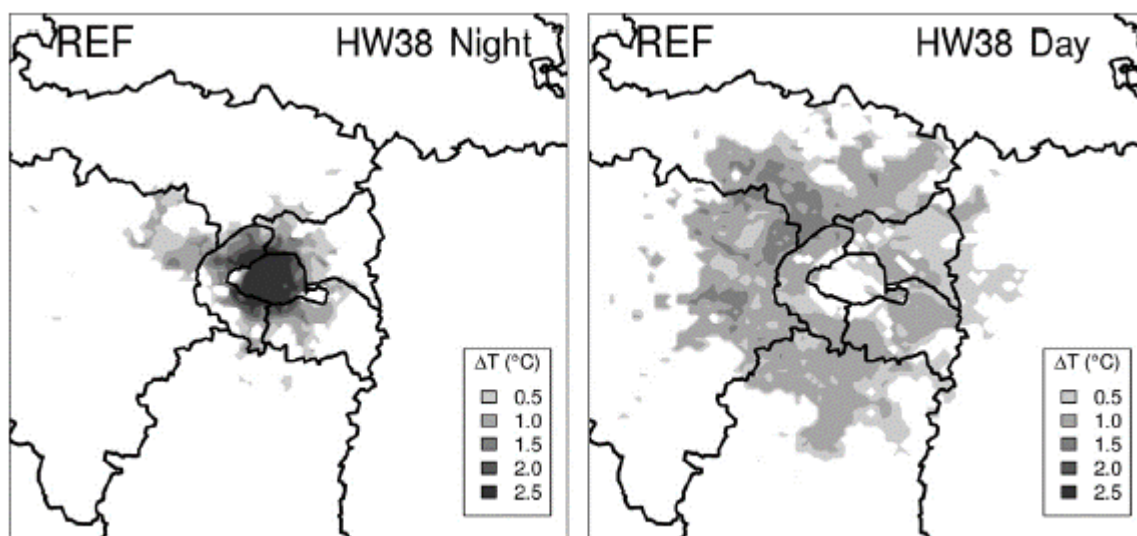
A morfologia e geometria urbana refletem diretamente na resiliência energética (SHARIFI e YAMAGATA, 2016), o que pode também indicar a distribuição das fragilidades no espaço urbano. A morfologia diz respeito aos tipos de ocupação, densidade de ocupação e configuração das redes viárias. Já a geometria está relacionada ao tamanho e aos arranjos dos prédios.

Um baixo nível de verticalização, o que implica em maior número de residências unifamiliares e maior área ocupada, implica em uma menor resiliência energética (SHARIFI e YAMAGATA, 2016). A maior área ocupada pode retardar a restauração do sistema de distribuição após uma queda de energia devido ao maior tempo necessário para a equipe de manutenção acessar o local da falha (MALISZEWSKI e PERRINGS, 2012). Por outro lado, uma morfologia urbana com alto índice de



verticalização implica em redução em consumo de energia para transporte (menores distâncias percorridas) e rede de distribuição mais compacta (SHARIFI e YAMAGATA, 2016).

Os padrões de ocupação urbana e extensão da área ocupada de uma cidade também possuem influência direta na temperatura do ar. De acordo com Stone et al. (2010), padrões de ocupação mais esparsos, com menor densidade, podem contribuir para eventos extremos de ondas de calor. Lemonsu et al. (2015) avalia o impacto da expansão urbana em eventos de ondas de calor e ilhas de calor na cidade de Paris (França). De uma forma geral, o efeito de ilhas de calor noturnas é limitado à área de maior densidade de ocupação (maior verticalização). Inversamente, durante o dia as áreas residenciais, menos protegidas pelo efeito de sombra, são os lugares mais quentes. Como resultado, a proporção da cidade afetada por ilhas de calor é maior durante o dia do que durante a noite (Figura 29).



**Figura 29 - Representação espacial de anomalia de temperatura em um evento de onda de calor sobre cenário atual de ocupação urbana da cidade de Paris**

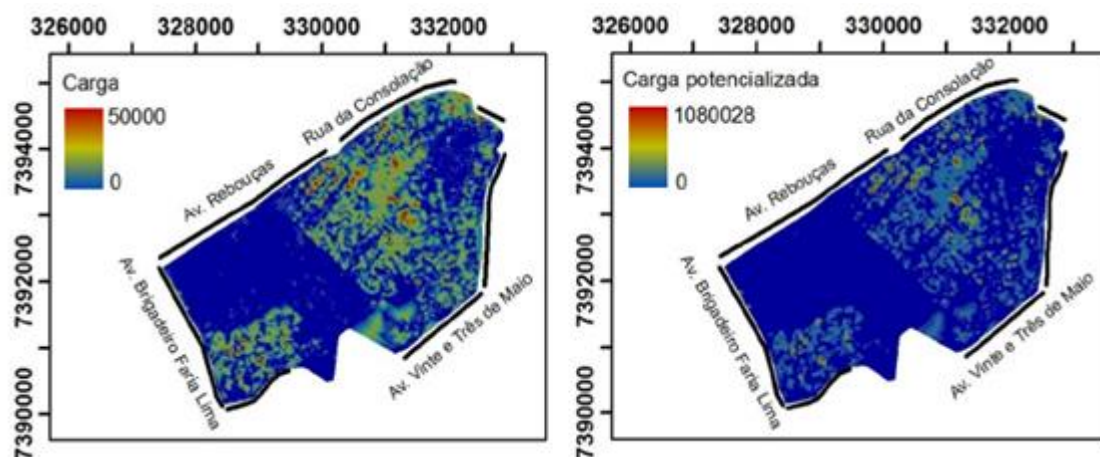
Fonte: (LEMONSU et al., 2015).

A modelagem do comportamento térmico urbano, incluindo modelagem de ondas de calor e ilhas de calor urbano, é particularmente importante para a avaliação da demanda de energia elétrica para resfriamento (ar condicionado) para curto e longo

prazos. Essas informações podem, então, ser utilizadas para o planejamento de medidas para aumentar a resiliência energética das cidades e com isso reduzir a vulnerabilidade da sociedade. Por exemplo, o dimensionamento de sistemas de cogeração/climatização pode ser feito considerando não apenas a demanda de energia elétrica, mas também as áreas mais críticas em relação ao conforto térmico urbano.

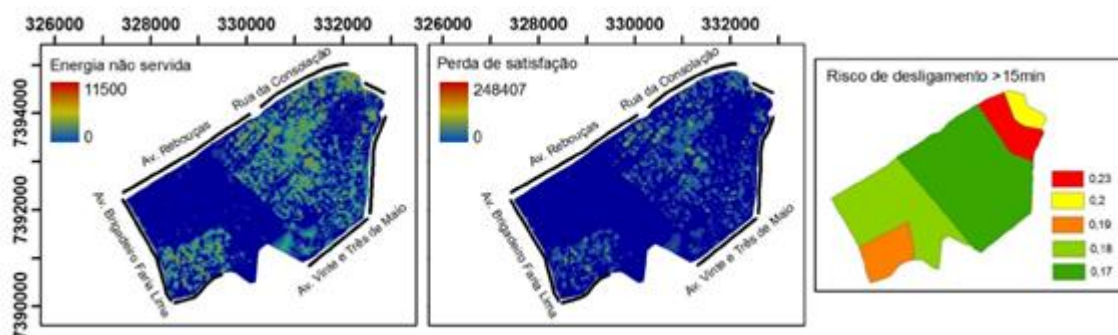
Além dos padrões de ocupação e geometria urbana, a distribuição geográfica de serviços essenciais como hospitais, escolas, bancos, redes e estruturas de *utilities* (água, energia e drenagem urbana) também são essenciais para a avaliação da vulnerabilidade da sociedade. Cada um desses componentes também é dependente de energia elétrica em algum grau e faltas de energia deverão afetar os serviços prestados à sociedade. O nível de insatisfação da sociedade à falta de cada um desses serviços essenciais, pode ser interpretada como fragilidade da própria sociedade à falta de energia.

Nesse sentido, como destacado no item anterior, a fragilidade a esses serviços pode ser inferida por uma potência da densidade populacional ou densidade de consumo, pois áreas mais densamente ocupadas (maior verticalização) refletem maior fragilidade à falta de serviços como elevação, bombeamento, ar condicionado/aquecimento e iluminação. Na Figura 30, é apresentado um exemplo de mapeamento de consumo para a região central de São Paulo, em que a fragilidade é representada pela carga potencializada.



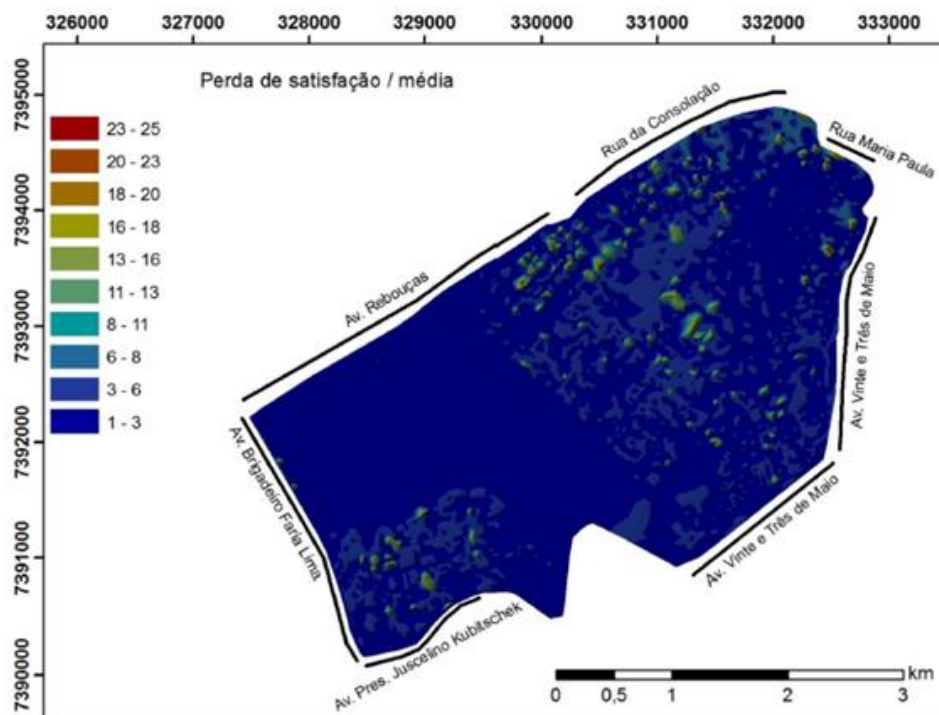
**Figura 30 - Exemplo de mapeamento de consumo para a região central de São Paulo, em que a fragilidade é representada pela carga potencializada.**

Considerando uma distribuição espacial hipotética para o risco de desligamento nessa região, é possível avaliar a energia não servida e a perda de satisfação (Figura 31).



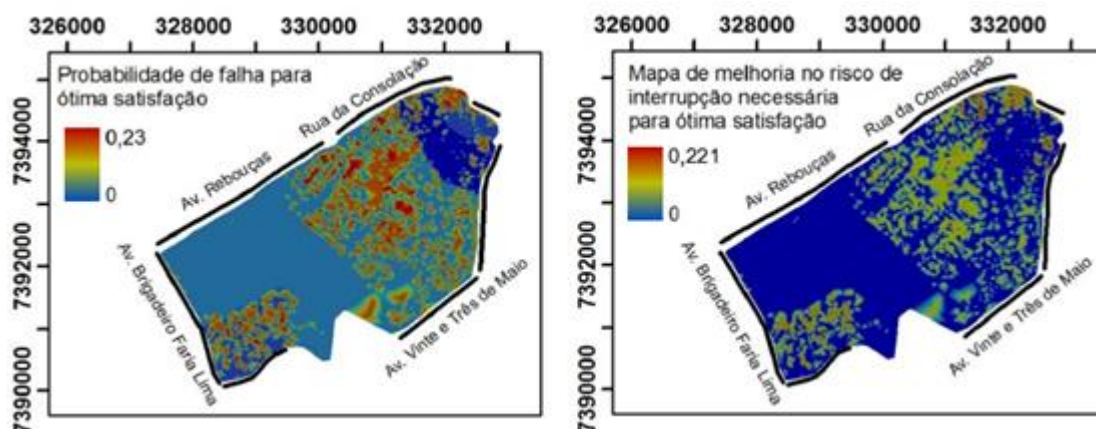
**Figura 31 - Distribuição espacial da energia não servida e perda de satisfação para região central de São Paulo.**

A partir da perda de satisfação, a vulnerabilidade média foi calculada como sendo a divisão da perda de satisfação pelo consumo médio da região (Figura 32).



**Figura 32 - Distribuição espacial da vulnerabilidade a faltas de energia elétrica para região central de São Paulo.**

A partir da análise das perdas de satisfação, ainda é possível encontrar os valores para a probabilidade de falha que resultem em uma satisfação ótima, bem como a distribuição espacial das melhorias necessárias em relação ao risco de interrupção do fornecimento de energia para essa satisfação ótima (Figura 33).



**Figura 33 - Distribuição espacial de melhorias no risco de interrupção para atingir a satisfação ótima.**

## 7. PROPOSIÇÕES E OBSERVAÇÕES FINAIS

Inicialmente, deixou-se clara a diferença entre os estudos correntes de confiabilidade do setor elétrico e os de vulnerabilidade, ainda raros neste setor. Enquanto o primeiro grupo tem um contexto operacional, restringindo-se a dados estatísticos e não incluindo as consequências de suas interrupções, o segundo grupo ocupa-se de avaliações de casos extremos, de alto impacto e baixa probabilidade de ocorrência, incorporando a causa da interrupção e as consequências sociais da interrupção.

Com base no que se levantou, emanou uma proposição clara em relação a algumas definições, a saber:

- Primariamente, vulnerabilidade é a operação binária entre uma ameaça e a fragilidade estrutural;
- A ameaça é um evento de grande impacto, possível, mas de rara ocorrência;
- A fragilidade é uma característica física, associada à resistência de uma infraestrutura;
- Dano é a consequência da ocorrência de uma ameaça sobre uma infraestrutura, visto na ótica do usuário;
- Resiliência sistêmica é a capacidade de o sistema suportar ou se recuperar de uma ameaça, considerando a fragilidade da infraestrutura, os procedimentos de predição, adaptação, absorção e de recuperação, incluindo as próprias ações dos usuários;
- Assim, a vulnerabilidade pode ser considerada como uma medida do impacto de um evento extremo sobre uma infraestrutura, considerando a capacidade intrínseca da infraestrutura de suportar esse impacto ou de se recompor e a percepção da sociedade frente a falha associada.

Em função disso, direcionou-se todo o trabalho para a compreensão das ameaças climáticas sobre o setor elétrico, bem como a conceituação e a modelagem das fragilidades, estendendo este conceito para a resiliência.



O trabalho realizado indica a necessidade de se evoluir o planejamento do setor elétrico, de forma a incorporar os estudos de vulnerabilidade, notadamente aqueles ligados às mudanças climáticas. Os efeitos consequentes dessas mudanças impactam o setor elétrico em todas as suas infraestruturas de geração, transmissão e distribuição, além de afetar o consumidor/usuário. Isso se dá pelas mudanças da temperatura, ventos, chuvas, insolação, etc., impactando valores médios (as séries não são mais estacionárias) e extremos (mínimos e máximos). Como consequências, tem-se que repensar os sistemas existentes e os futuros, de forma a deixá-los mais resilientes, seja a partir de melhorias estruturais que diminuam suas fragilidades, ou com procedimentos operacionais que prevejam e previnam falhas e/ou as corrijam o mais cedo possível.

Apresentou-se dois índices bastantes úteis para o planejamento incorporando a vulnerabilidade. O primeiro é o índice Shanon-Weaver, que, dentre outros interesses, pode servir para os estudos de longo prazo, notadamente os de matriz energética. O segundo é o RAW (denominado aqui como índice de valoração da resiliência), que pode ser utilizado para avaliações do sistema elétrico e para seu planejamento.

Pelo fato da evolução tecnológica estar permitindo avançar na melhoria da resiliência sistêmica, torna-se cada dia mais factível e recomendável a introdução de uma camada cibernética associada à infraestrutura física. Associe-se a isso um procedimento de aprendizado (cognitivo) e uma mobilização social para aumentar a eficácia das ações setoriais. Do lado do usuário/consumidor, essa evolução tem trazido grandes mudanças, com a entrada da geração distribuída, armazenamento, sistemas inteligentes de gerenciamento predial/doméstico, etc. Novas tecnologias, como o *blockchain*, permitirão o funcionamento de sistemas descentralizados (isolados ou interligados), que darão maior resiliência ao sistema elétrico, seja tecnicamente ou comercialmente. Por isso, os Planos Nacionais de Adaptação (PNAs) têm sugerido (notadamente para países desenvolvidos) a melhoria das redes elétricas no sentido da descentralização e da implementação de redes inteligentes.

Face a essas mudanças, o setor elétrico precisa incorporar, também, uma visão espacial, em que as ameaças ambientais e as fragilidades das infraestruturas estejam bem representadas. Além disso, há de se incorporar conceitos microeconômicos de utilidade do consumidor, dada a sua importância na resposta a sinais de preço e qualidade do produto/serviço, fazendo-o se adaptar nas quantidades e formas de consumo, ou mesmo se transformar, adquirindo equipamentos e sistemas que o tornam menos dependentes do sistema interligado. Em outras palavras: o setor elétrico não pode limitar seu estudo a parâmetros exclusivamente técnicos, como potência interrompida e energia não suprida, necessitando estendê-lo às consequências de tais falhas de suprimento na sociedade.

O desafio está, então, em propor modelos e processos de planejamento do setor elétrico que sejam capazes de levar em conta tais fatores.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, T.; MUTTAQI, K.M.; AGALGAONKAR, A.P. Climate change impacts on electricity demand in the State of New South Wales, Australia. *Applied Energy*, v. 98, p. 376-383. 2012.
- ALLEN, M.; FERNANDEZ, S.J.; FU, J.S.; OLAMA, M.M. Impacts of climate change on sub-regional electricity demand and distribution in the southern United States. *Nature Energy*, 2016. DOI: 10.1038/NENERGY.2016.103.
- ALVEHAG, K.; SODER, L.; A Reliability Model for Distribution Systems Incorporating Seasonal Variations in Severe Weather. *IEEE Trans. Power Del.*, v. 26, n. 2, p. 910-919, 2011.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso: 20 jun. 2018.
- APEC PROJECT – ASIA PACIFIC ECONOMIC COORPORATION - Guidelines to Develop Energy Resiliency in APEC Off-Grid Areas -Energy Working Group – February 2017.



- AQUINO, A. R.; PALETTA, F. R.; ALMEIDA, J. R. de. Vulnerabilidade ambiental. Blucher, São Paulo, p. 15-28, 2017.
- AUFFHAMMER, M.; BAYLIS, P.; HAUSMAN, C.H. Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States. PNAS, v. 114, n. 8, p. 1886-1891. 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613193114>.
- AVEN, T.; RENN, O. On risk defined as an event where the outcome is uncertain. Journal of Risk Research, v., 12, n. 1, p. 1–11, jan. 2009.
- ÁVILA, A; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in Southern Brazil. Environmental Research Letters. 11. 2016. doi:10.1088/1748-9326/11/11/114029.
- BARRAGER, S. M.; CAZALET, E.G. Transactive Energy: A Sustainable Business and Regulatory Model for Electricity, Baker Street Publishing, 2014.
- BHUIYAN, M. R.; ALLAN, R. N.; Inclusion of weather effects in composite system reliability evaluation using sequential simulation. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, v. 141, n. 6, p. 575-584, 1994.
- BILLINTON, R.; LI, W. Reliability Cost/Worth Assessment, In: Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Springer US, p. 255-297, 1994.
- BILLINTON, R.; BOLLINGER, K. E.; Transmission System Reliability Evaluation Using Markov Processes. IEEE Trans. Power App. and Syst., vol. PAS-87, n. 2, p. 538-547, 1968.
- BLACKSHEAR, B.; CROCKER, T.; DRUCKER, E.; FILOON, J.; KNELMAN, J.; SKILES, M. Hydropower Vulnerability and Climate Change: A Framework for Modeling the Future of Global Hydroelectric. Middlebury College Environmental Studies Senior Seminar, 2011.

- BOURSCHEIDT, V.; PINTO JR, O.; NACCARATO, K. P. The effects of Sao Paulo urban heat island on lightning activity. Decadal analysis (1999–2009). Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 121, n. 9, p. 4429-4442, 2016.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas. Rio de Janeiro: E-papers, 684 p. 2007.
- BRANDÃO, J. M.; MAHFOUND, M.; GIANORDOLI-NASCIMENTO, I. F. A construção do conceito de resiliência em psicologia: discutindo as origens. Paidéia, Ribeirão Preto, v. 21, n.49, maio/ago. 2011.
- BRIGUGLIO, L.; CORDINA, G.; FARRUGIA, N.; VELLA, S. Economic Vulnerability and Resilience: Concepts and Measurements. UNU-WIDER Research Paper N°. 2008/55, Maio 2008. 23 p.
- CALTABIANO, P. C. R. O. Fractografia quantitativa: relações entre tenacidade e o comportamento fractal em ligas metálicas. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. American Journal of Climate Change, v. 3, n. 05, p. 438, 2014. doi: 10.4236/ajcc.2014.35039.
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. American Journal of Climate Change, v. 3, n. 5, p. 512-525, 2014.
- CIRELLA, G. T.; IYALOMHE, F. O.; RUSSO, A. Vulnerability and risks related to climatic changes in urban coastal environments. UPLanD – Journal of Urban Planning, Landscape & environmental Design, v. 1, n. 1, p. 67-76, 2016.

- Climate Change Secretariat, Ministry of Mahaweli Development and Environment. National Adaptation Plan for Climate Change Impacts in Sri Lanka: 2016 - 2025. Ethul Kotte. 2016. 178 p. Disponível em: <<http://www4.unfccc.int/nap/Documents%20NAP/National%20Reports/National%20Adaptation%20Plan%20of%20Sri%20Lanka.pdf>>. Acesso: 30 jul. 2018.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B.C.; Tucci, C.E.M. The MGB-IPH Model for Large-Scale Rainfall-Runoff Modelling. Hydrological Sciences Journal, 52, 878-895. 2007. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.
- DALY, H.; FARLEY, J. Ecological economics. Principles and applications. Washington: Island Press, 2004.
- Departamento de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Santiago de Chile. Ago. 2015. 280 p. Disponível em: <<http://www4.unfccc.int/nap/Documents/Parties/Chile%20NAP%20including%20sectoral%20plans%20Spanish.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2018.
- DIAS, M. A. F. S. An increase in the number of tornado reports in Brazil. Weather, Climate, and Society, v. 3, n. 3, p. 209-217, 2011.
- DIAS, M. A. F. da. S.; SILVA, M.G.A.J. da. Para entender tempo e clima. In: CAVALCANTI, I. D. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J. da., SILVA DIAS, M. A. F. (Orgs.). Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, p. 15-21.
- DUNN, S.; GALASSO, C.; WILKINSON, S.; MANNING, L.; ALDERSON, D.; Development of Empirical Fragility Curves for Electrical Supply Systems Subjected to Wind Hazard. In 12th Intern. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, 2015.
- ESPINOZA, S.; PANTELI, M.; MANCARELLA, P.; RUDNICK, H.; Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards. Electr. Power Syst. Research, v. 136, p. 352-361, 2016.

- EYDELAND, A.; WOLYNIEC, K.; Energy and Power Risk Management: New Developments in Modeling, Pricing and Hedging. John Wiley and Sons, 2003.
- FAO. Direito à Alimentação e Segurança Alimentar e Nutricional nos Países da CPLP- Diagnóstico de Base. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. Roma, Jun, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i3348o.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2018.
- FEMA - Federal Emergency Management Agency. "Hazardus". Available: <https://www.fema.gov/hazardus>, Last Accessed: October 2016.
- FERRAZ, S. E. T.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Eventos extremos de tempo e clima e desastres naturais. In: JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E.; COUTINHO, S. M. V.; MAIS, R. de. A.; TOLEDO, R. F. de. Temas atuais em mudanças climáticas para os ensinos fundamentais e médios. São Paulo: IEE-USP. 2015, p. 71,79.
- FRANCIS, R.; BEKERA, B.; A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. Reliability Engineering & System Safety, v. 121, p. 90-103, 2014.
- GAO (U.S. Government Accountability Office). 2014. "Climate Change: Energy Infrastructure Risks and Adaptation Efforts." Washington, DC: U.S. Government Accountability Office. January. Disponível em: <<http://www.gao.gov/assets/670/660558.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2018.
- GEIRINHAS, J. L.; TRIGO, R. M.; LIBONATI, R.; COELHO, C. A. S.; A. C. PALMEIRA. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. International Journal of Climatology, v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 2018.
- GENGFENG, L; PENG, Z.; LUH, P. B.; WENYUAN, L. et al., "Risk Analysis for Distribution Systems in the Northeast U.S. Under Wind Storms," IEEE Trans. Power Syst., v. 29, n. 2, p. 889-898, 2014.
- German Federal Government. German Strategy for Adaptation to Climate Change. Adopted by the German federal cabinet on 17th December 2008. dez. 2008.

- GILLILAND, J. M.; KEIM, B. D. Surface wind speed: trend and climatology of Brazil from 1980–2014. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 2, p. 1060-1073, 2018.
- GOSLING, S.N.; DUNN, R.; CARROL, F. et al. *Climate: Observations, projections and impacts: Brazil*. Met Office FitzRoy Road, Exeter Devon, EX1 3PB United Kingdom. 2011.
- GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N.; Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.* v. 18, p. 1326– 1350, 2005.
- GUHA-SAPIR, D.; HOYOIS, P.; BELOW, R. *Annual disaster statistical review 2012: The numbers and trends*. Université Catholique de Louvain, Brussels: CRED, 2013. 50 p.
- HM GOVERNMENT. *The National Adaptation Programme Making the country resilient to a changing climate*. 2013. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/adapting-to-climate-change-national-adaptation-programme>> >. Acesso em: 11 jul. 2018.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa de Informações Básicas Municipais. Perfil dos Municípios Brasileiros: Meio Ambiente 2002*. Rio de Janeiro, RJ, 2005. Disponível em: <<http://livrozilla.com/doc/1111061/meio-ambiente-2002---perfil-dos-munic%C3%ADpios-brasileiros>>. Acesso em 11 jun. 2018.
- IEA (2015) - *Making the Energy Sector More Resilient to Climate Change* – International Energy Agency – IEA/OECD – COP 21 - 2015
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 1535 p.

- IPCC- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Glossary of synthesis report. 2007. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_appendix.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_appendix.pdf)>. Acesso em: 08 jun. 2018.
- IPCC. Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, p. 555-564, 2012.
- IPCC. Alterações Climáticas 2014: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quinto Relatório de Avaliação do painel intergovernamental sobre Mudança do Clima. IPCC, Genebra, Suíça, 2014.
- JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E.; TOLEDO, R. F. de. Aprendizagem social, mudanças climáticas e sustentabilidade. In: JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E.; COUTINHO, S. M. V.; MAIS, R. de. A.; TOLEDO, R. F. de. Temas atuais em mudanças climáticas para os ensinos fundamentais e médios. São Paulo: IEE-USP. 2015, p. 12 -16.
- JORION, P; Value at Risk: The New Benchmark for Controlling Market Risk. McGraw-Hill, 1997.
- KAISER, G. Coastal Vulnerability to Climate Change and Natural Hazards. In Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in Climate Change. Anais... Karlsruhe, Germany: Karlstuhe University, out. 2007.
- KHARRAZI, A.; SATO, M.; YARIME, M.; NAKAYAMA, H.; YU, Y.; KRAINES, S. 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, v. 87, p. 455-464, 2015.

- KORBATOV, A.; PRICE-MADISON, J.; WANG, Y.; XU, Y. The risks of climate and natural disaster related disruption to the electric grid. Zurich, Switzerland. Swiss Reinsurance Company Ltd. 1ª Edição. 2017.
- LEMONSU, A.; VIGUIÉ, V.; DANIEL, M.; MASSON, V. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). Urban Climate, v. 14, p. 586-605, 2015.
- LIEBER, R. R.; ROMANO-LIEBER, N. S. Risco e Prevenção no Desastre Tecnológico. Cadernos Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 67-84, jan./mar. 2005.
- LIN, J.; SUN, Y.; CHENG, L.; GAO, W. Assessment of the power reduction of wind farms under extreme wind condition by a high resolution simulation model, Applied Energy, v. 96, p. 21-32, 2012.
- LIU, Y.; SINGH, C.; Reliability Evaluation of Composite Power Systems Using Markov Cut-Set Method. IEEE Trans. Power Syst., v. 25, n. 2, p. 777-785, 2010.
- LUCENA, A. F. P.; et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. Energy Policy, v. 37, n. 3, p. 879-889, 2009.
- MALISZEWSKI, P. J.; PERRINGS, C. Factors in the resilience of electrical power distribution infrastructures, Applied Geography, v. 32, n. 2, p. 668-679, 2012.
- MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. Parcerias Estratégicas, Brasília, DF, v. 27, p. 149-175, dez. 2008.
- MARENGO, J. A. Future Change of Climate in South America in the Late 21st Century: the CREAS Project. AGU AS Newsletter - v. 3. n. 2, p. 5, May 2009.
- MCNALLY, A.; MAGEE, D.; WOLF, A. T. Hydropower and sustainability: Resilience and vulnerability in China's powersheds. Journal of Environmental Management, v. 90, p. S286-S293. 2009.



- MMA, Ministério do Meio Ambiente. Convenção da Diversidade Biológica. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/convenção-da-diversidade-biológica>>. Acesso em: 04 jun. 2018.
- MOLINA, F. H.; DADAM, A. P.; PINHEIRO, W.; HIRAKAWA, W. Climate change in Brazil and its reflections in the reliability of Celesc distribution overhead lines, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, p. 1-4, 2013.
- MOSER, C. O. N. The Asset Vulnerability Framework: Reassessing Urban Poverty Reduction Strategies. World Development, v. 26, n. 1, p. 1-19, 1998.
- MOURA, R.; SILVA, L. A. D. A. E. Desastres naturais ou negligência humana? Revista Geografar, v. 3, n. 1, p. 58-72, 2008.
- NACCARATO, K. P.; ALBRECHT, R. I.; PINTO JR, O. Cloud-to-ground lightning density over Brazil based on high-resolution lightning imaging sensor (LIS) data. Proceedings of the 14th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), Rio de Janeiro, CD-ROM. 2011.
- NAP GLOBAL NETWORK. United States In-Country NAP Support Program. maio 2016a. Disponível em: <<http://napglobalnetwork.org/2016/05/united-states-country-nap-support-program/>>. Acesso em: 25 jul. 2018.
- NAP GLOBAL NETWORK. Caribbean countries share plans to adapt to climate change. Out. 2016b. Disponível em: <<http://napglobalnetwork.org/2016/10/caribbean-countries-share-plans-adapt-climate-change/>>. Acesso em: 27 jul. 2018.
- NAP GLOBAL NETWORK. About the Network. 2018a. Disponível em: <<http://napglobalnetwork.org/about/>>. Acesso em: 25 jul. 2018.
- NETO, A. R.; PAZ, A. R.; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C. Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. Journal of Water Resource and Protection, v. 8, n. 12, p. 1103, 2016.

- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) 2015. Disponível em: <[www.oecd.org/environment/cc/Adapting-to-theimpacts-of-climate-change-2015-Policy-Perspectives-27.10.15%20WEB.pdf](http://www.oecd.org/environment/cc/Adapting-to-theimpacts-of-climate-change-2015-Policy-Perspectives-27.10.15%20WEB.pdf)>. Acesso em: 29 maio 2018.
- OUYANG, M.; DUEÑAS-OSORIO, L; Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems. *Structural Safety*, v. 48, p. 15-24, 2014.
- PANTELI, M.; PICKERING, C.; WILKINSON, S.; DAWSON, R.; MANCARELLA, P.; Power System Resilience to Extreme Weather: Fragility Modelling, Probabilistic Impact Assessment, and Adaptation Measures, *IEEE Trans. Power Syst.*, Early Access, Dec. 2016.
- PANTELI, M.; TRAKAS, D. N.; MANCARELLA, P.; HATZIARGYRIOU, N. D.; Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding, *IEEE Trans. Smart Grid*, v. 7, n. 6, p 2913-2922, 2016.
- PANTELI, M.; MANCARELLA, P.; Modeling and Evaluating the Resilience of Critical Electrical Power Infrastructure to Extreme Weather Events. *IEEE Systems Journal*, Early access article, p. 1-10, 2015.
- PANTELI, M.; MANCARELLA, P.; Influence of Extreme Weather and Climate Change on the Resilience of Power Systems: Impacts and Possible Mitigation Strategies. *Electric Power Systems Research*, vol. 127, pp. 259-270, 2015.
- PBMC. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Assad, E.D., Magalhães, A.R. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014, 414 p.
- PEIXOTO, M.do. R.G.; RAMOS, K.; MARTINS, K. A.; SCHINCAGLIA, R. M.; BRAUDES-SILVA, L. A. Insegurança alimentar na área de abrangência do Núcleo de Apoio à Saúde da Família em Itumbiara, Goiás. *Revista Epidemiologia e Serviços de Saúde*, Brasília, v. 23, n. 2, p. 327-336, abr./jun. 2014.

- PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; PES, M.P.; DA CRUZ SEGUNDO, E.I.; LYRA, A.A.; The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. *Renewble Energy*, v. 49, p. 107-110, 2013.
- PICARD, P.; *Eléments de microéconomie: Théorie et applications*; 2<sup>e</sup> edition. Montchrestien, 1990.
- PINTO, O. Thunderstorm climatology of Brazil: ENSO and Tropical Atlantic connections. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 6, p. 871-878, 2015.
- PINTO, O.; PINTO, I. R. C. A.; FERRO, M. A. S. A study of the long-term variability of thunderstorm days in southeast Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, n. 11, p. 5231-5246, 2013.
- PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; JUNIOR, J .Z.; EVANGELISTA, S. R. M.; OTAVIAN, A. F.; ÁVILA, A. M. H.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. R.; JUNIOR, C. M.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. Embrapa/Unicamp, 2008, 81 p.
- PNA. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Sumário executivo. Ministério do meio ambiente. Brasília: Governo Federal do Brasil. 2016. 444 p. Disponível em: <  
<http://www4.unfccc.int/nap/Documents/Parties/Brazil%20PNA%20Portuguese.pdf>>. Acesso em: 27. Jul. 2018.
- PNMC. Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC – Brasil. Brasília. Dez. 2008. 132 p. Disponível em: <  
[http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq\\_climaticas/\\_arquivos/plano\\_nacional\\_mudanca\\_clima.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_nacional_mudanca_clima.pdf)>. Acesso em: 27 jun 2018.
- PRADO JR, F. A.; et al. How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 1132-1136, 2016.

- PRICE-KELLY, H.; HAMMILL, A. Panorama dos PNA: iniciando a integração setorial das considerações de adaptação Visão geral. Rede Global de PNA. nov. 2015. 4 p. Disponível em: <<http://napglobalnetwork.org/wp-content/uploads/2016/07/PT-Web-sNAPshot-initiating-sector-integration-adaptation-overview-brief5printer-marks.pdf>>. Acesso em 25 jul. 2018.
- QUEIROZ, A. R. de.; MARANGON LIMA, L. M.; MARANGON LIMA, J. W.; DA SILVA, B. C.; SCIANNI, L. A. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. *Renewable Energy*, v. 99, p. 379-389, 2016.
- QUADRENNIAL ENERGY REVIEW - Transforming the Nation's Electricity System: The Second Installment of the QER, White House, 2017.
- RIBEIRO JUNIOR, L. U. ; SILVA, B. C.; ZUFFO, A. C. Development of a tool for hydroelectric reservoir operation with multiple uses considering effects of climate changes. Case study of Furnas HPP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, p. 300-313, 2016.
- RIBEIRO, J.; VIEIRA, R.; TÔMIO, D. Análise da percepção do risco de desastres naturais por meio da expressão gráfica de estudantes do Projeto Defesa Civil na Escola. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 42, p. 202-223, dez. 2017.
- ROEGE, P. E.; COLLIER, Z. A.; MANCILLAS, J.; MCDONAGH, J. A.; LINKOV, I. Metrics for energy resilience, *Energy Policy*, v. 72, p. 249-256, 2014.
- ROMERO, M. Z.; RIVERA, H. J.; FRANKEN, V. Estrategia para Responsables de Políticas del sector de Energía en apoyo a la implementación de las Contribuciones Nacionales Determinadas. OLADE. Quito, Ecuador. 2016. 86 p. Disponível em: <<http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0377.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2018.
- ROMEIRO, A. R.; Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. *Estudos avançados*, v. 26, n. 74, 2012. Disponível em:

- <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142012000100006>>. Acesso em: 11 jun. 2018.
- ROMEIRO, A. R. Sustainable development and institutional change: the role of altruistic behavior. Texto para Discussão, IE/Unicamp, n.97, 2000.
  - SANTILLÁN, V. A Climate-Responsible Peru: A force for recovery and growth. Maio 2017. Disponível em: <<http://napglobalnetwork.org/2017/05/climate-responsible-peru-force-recovery-growth/>>. Acesso em 25 jul. 2018.
  - SANTOS, A. H. M.; DZEDZEJ, M.; SANTOS, E. M.; LIMA, R. M.; GEODIS - Geographic Dispersed and Integrated Energetical Systems. Sustainable Energy Policy and Strategies for Europe. 14th IAEE European Energy Conference. 2014.
  - SHARIFI, A.; YAMAGATA, Y. Principles and Criteria for Assessing Urban Energy Resilience: A Literature Review. Renewable and Sustainable energy Reviews. v. 60, p. 1654 – 1677. 2016.
  - SILVA, I. A. e. Correlações entre zona de estiramento e tenacidade à fratura para aço 15-5PH. 2016. 51 f. Trabalho final de graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2016.
  - SILVA, P.; BASTOS, A.; DA CAMARA, C. C.; LIBONATI, R. Future projections of fire occurrence in Brazil using EC-Earth climate model. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 3, p. 288-297, 2016.
  - SOITO, J. L. S.; FREITAS, M. A. V. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 3165–3177, 2011.
  - STONE, B.; HESS, J. J.; FRUMKIN, H. Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities? Environ Health Perspect. v. 118, n.10, p. 1425 – 1428, out. 2010.

- TEDIM, F.; CARVALHO, S. Vulnerabilidade aos incêndios florestais: reflexões em torno de aspectos conceituais e metodológicos. *Territorium*, n. 20, p. 85-99, 2013.
- TULLOS, D. D.; FOSTER-MOORE, E.; MAGEE, D.; TILT, B.; WOLF, A. T.; SCHMITT, E. GASSERT, F.; KIBLER, K. Biophysical, socioeconomic, and geopolitical vulnerabilities to hydropower development on the Nu River, China. *Ecology and Society*, v. 18, n. 3, p. 16, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5751/ES-05465-180316>>. Acesso em: 11 jun. 2018.
- UNDHA. Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management. DHA/93/36, United Nations Department of Humanitarian Affairs, Geneva, Switzerland. 1992. Disponível em: <<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/004DFD3E15B69A67C1256C4C006225C2-dha-glossary-1992.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2018.
- UNDP. Readiness for Climate Finance. A framework for understanding what it means to be ready to use climate finance. New York: United Nations Development Programme. Abr. 2012. 32 p. Disponível em: <[http://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Climate%20Strategies/Readiness%20for%20Climate%20Finance\\_12April2012.pdf](http://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Climate%20Strategies/Readiness%20for%20Climate%20Finance_12April2012.pdf)>. Acesso em: 27 jul. 2018.
- UNDP. Human Development Report 2014. Sustaining Human Progress: Reducing Vulnerabilities and Building Resilience. Plaza, New York, USA, 2014.
- UNDP. Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13. Brasil. 2017. Disponível em: <<http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/ods/glossario-do-ods-13.html>>. Acesso em 27 jun 2018.
- UNEP. Assessing Human Vulnerability due to Environmental Change: Concepts, Issues, Methods and Case Studies. UNEP/DEWA/RS.03-5, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. 2002. 68 p.

- UNFCCC. Planos nacionais de adaptação- Diretrizes técnicas para o processo do plano nacional de adaptação. Países menos desenvolvidos. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. United Nations Framework Convention on Climate Change. Dez. 2012. 152 p. Disponível em: <[http://unfccc.int/files/adaptation/cancun\\_adaptation\\_framework/national\\_adaptation\\_plans/application/pdf/naptechguidelines\\_port.pdf](http://unfccc.int/files/adaptation/cancun_adaptation_framework/national_adaptation_plans/application/pdf/naptechguidelines_port.pdf)>. Acesso em: 27 jul. 2018.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). Climate Change and the Electricity Sector: DOE Guide for Climate Change Resilience Planning. 2016.
- VAIMAN, M. BELL, K.; CHEN, Y.; CHOWDHURY, B. et al., Risk Assessment of Cascading Outages: Methodologies and Challenges. IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 2, pp. 631-641, 2012.
- VARIAN, H. R.; Microeconomic Analysis, Third Edition. W. W. Norton & Company, 1992.
- WALKER, B.; HOLLING, C. S.; CARPENTER, S. R.; KINZIG. A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. Ecology and Society, v. 9, n. 2, 2004. 5 p. Disponível em: <<http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>>. Acesso em: 11 jun. 2018.
- WANG, Y.; CHEN, C.; WANG, J.; BALDICK, R.; Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters-A Review. IEEE Trans. Power Syst., Early access, 2015.
- YANG, W.; XU, K; LIAN, J., MA, C. Multiple flood vulnerability assessment approach based on fuzzy comprehensive evaluation method and coordinated development degree model. Journal of Environmental Management, v. 213, p. 440-450, 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.085>>. Acesso em: 11 jun. 2018.



- YUAN, W.; WANG, J.; QIU, F. CHEN, C. et al. Robust Optimization-Based Resilient Distribution Network Planning Against Natural Disasters. IEEE Trans. Smart Grid, Early Access, p. 1-10, 2016.
- ZAMUDA, C.; MIGNONE, B.; BILELLO, D.; et al. U.S. Energy Sector Vulnerabilities to Climate Change and Extreme Weather. U.S. Department of Energy, DOE/PI-0013. 2013.
- ZHOURI, A.; OLIVEIRA, R. Desenvolvimento, conflitos sociais e violência no Brasil rural: o caso das usinas hidrelétricas. Ambiente & Sociedade, Campinas, v. X, n. 2, p. 119-135, jul./dez. 2007.