



# DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA RECURSOS SOLAR E EÓLICO PARA DIVERSAS ESCALAS E PÓSSIVEIS IMPACTOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

## Relatório 1/5 - Plano do Trabalho

---

Graziela Luzia

---

Elaborado por: **Graziela Luzia**

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Participaram desse processo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Eletrosul/ Eletrobrás e a Defesa Civil de Santa Catarina.

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

#### **EQUIPE TÉCNICA - MMA**

Hugo do Valle Mendes (coordenação)  
Adriana Brito da Silva  
Jaqueline Leal Madruga

#### **EQUIPE TÉCNICA - GIZ**

Ana Carolina Câmara (coordenação)  
Eduarda Silva Rodrigues de Freitas  
Pablo Borges de Amorim

#### **EQUIPE TÉCNICA - EPE**

Angela Livino  
Jeferson Soares  
Gustavo Brandão  
Haydt de Souza

#### **INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

André Rodrigues Gonçalves  
Rodrigo Costa

#### **Ministério do Meio Ambiente**

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP  
70068-901  
Telefone: + 55  
61 2028-1206

#### **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn  
GIZ Agência Brasília  
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501  
Ed. Brasília Trade Center - 70.711-902 Brasília/DF  
T + 55-61-2101-2170  
E [giz-brasilien@giz.de](mailto:giz-brasilien@giz.de)  
[www.giz.de/brasil](http://www.giz.de/brasil)

A encargo de:

**Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha**

BMU Bonn:

Robert-Schuman-Platz 3  
53175 Bonn, Alemanha  
T +49 (0) 228 99 305-0

Diretora de Projeto:

**Ana Carolina Câmara**

T +55 61 9 99 89 71 71

T +55 61 2101 2098

E [ana-carolina.camara@giz.de](mailto:ana-carolina.camara@giz.de)



## Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	2
LISTA DE TABELAS .....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
I. Ampliação dos Serviços Climáticos (WP 1).....	4
II. Introdução dos Serviços Climáticos aos processos de planejamento (WP 2).....	4
III. Avaliação dos riscos climáticos de infraestruturas (WP 3) .....	5
IV. Intercâmbio de Experiências entre os países e as instituições participantes (WP 4).....	5
1.1 Os desafios do setor energético no Brasil .....	5
1.2 Objetivo .....	7
1.3 Atividades.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
3. METODOLOGIA.....	13
3.1 Base de dados observacionais consolidada .....	14
3.2 Modelo climático regional Eta/CPTEC .....	17
3.3 Modelo climático regional HadRM3P/MOHC .....	18
3.4 Ajuste dos modelos climáticos.....	19
4. CRONOGRAMA .....	21
Continuação .....	22
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	24

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Variação do consumo de energia versus Produto Interno Bruto Brasileiro entre 1995 e 2015. Adaptado de Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017)..... 11

**Figura 2.** Matriz elétrica brasileira em maio de 2017 de acordo com dados disponíveis no Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica.....10

**Figura 3.** Cobertura nacional da rede de dados: A) Rede SONDA; B) METAR e C) INMET. Adaptado de [www.sonda.ccst.inpe.br](http://www.sonda.ccst.inpe.br), [www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br) e [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br), respectivamente.....17

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Resumo dos dados a serem utilizados. .... 17

## 1. INTRODUÇÃO

Adaptação, como está definida na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) instituída pela Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009, é o conjunto de “iniciativas e medidas para reduzir a vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos frente aos efeitos atuais e esperados da mudança do clima”. Atualmente, admite-se que, mesmo com os esforços de mitigação dos gases de efeito estufa (GEE) adotados pelo Brasil e por outros países, as alterações no planeta em decorrência da mudança do clima são inevitáveis, com efeitos relevantes sobre os ecossistemas, a sociedade e a economia.

Tendo em conta que os efeitos da mudança do clima afetarão a população de modo distinto e com intensidades variáveis, tanto o diagnóstico dos impactos observados e esperados das vulnerabilidades nacionais quanto a resposta do país à mudança do clima devem ser abrangentes, integrados, coordenados e, ao mesmo tempo, sensíveis às particularidades de cada sistema, setor e região.

Nos últimos anos, o Brasil vem integrando a adaptação na agenda nacional de mudança do clima com iniciativas concentradas na identificação dos impactos, no mapeamento de vulnerabilidades, na estruturação de um sistema de monitoramento e alerta de desastres naturais e o tema vem ganhando relevância com a instituição do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) e sua inclusão na Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil (NDC – do inglês *Brazilian Nationally Determined Contribution*) junto à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC – do inglês *United Nations Convention on Climate Changes*).

Para a implementação da Agenda Nacional de Adaptação, o Brasil tem como um dos principais parceiros a Alemanha, que oferta projetos de cooperação através da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI – do inglês *International Climate Initiative*) do Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear da Alemanha. No âmbito dessa iniciativa, destaca-se o projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura – CSI, que vem sendo implementado por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) e tem como objetivo principal aumentar a utilização dos serviços climáticos nacionais no planejamento e na avaliação dos riscos climáticos nos investimentos em infraestrutura, no âmbito da implementação dos processos da Política Nacional sobre Mudança do Clima.

O projeto encontra-se estruturado em quatro componentes, ou pacotes de trabalho, que definem melhor o seu escopo, sendo eles:

### **I. Ampliação dos Serviços Climáticos (WP 1)**

Nessa fase, será feito um estudo da linha de base nacional da atual utilização dos Serviços Climáticos (SC) e um inventário deverá ser elaborado. Também serão propostas medidas para inclusão do uso desses SC na avaliação de risco climático nos processos de planejamento dos investimentos de infraestruturas.

### **II. Introdução dos Serviços Climáticos aos processos de planejamento (WP 2)**

No segundo pacote de trabalho, as atividades encontram-se focadas na introdução dos Serviços Climáticos aos processos de planejamento, ou seja, na aquisição de experiência em análise de risco climático para a integração sistemática de riscos climáticos no planejamento de investimentos de infraestrutura.

### **III. Avaliação dos riscos climáticos de infraestruturas (WP 3)**

O terceiro componente tem como objetivo discutir os resultados dos itens 1 e 2 com os tomadores de decisão e atores-chave nas políticas de clima, assim como definir qual será a infraestrutura a ser utilizada para o desenvolvimento de um estudo de caso visando a análise de risco de acordo com a vulnerabilidade à qual a mesma encontra-se exposta.

### **IV. Intercâmbio de Experiências entre os países e as instituições participantes (WP 4)**

O quarto e último pacote de trabalho está relacionado à troca de experiências entre os *stakeholders* do projeto, inclusive dos países parceiros. Essa fase de intercâmbio de conhecimentos acontecerá durante todo o andamento do projeto, porém um dos objetivos é que, ao final do projeto, todo o conhecimento adquirido seja exposto em forma de “produtos de conhecimento” por meio de eventos internacionais, *webinários*, etc.

#### **1.1 Os desafios do setor energético no Brasil**

A segurança energética e as mudanças climáticas são os dois grandes eixos em torno dos quais se estruturam atualmente as políticas energéticas mundiais. Portanto, num contexto de expansão das fontes renováveis, como a eólica, solar e até mesmo a fonte hídrica, passa a ser imprescindível conhecer os recursos e suas variações ao longo do tempo para atribuir algum tipo de crédito de capacidade de geração para ser usado no planejamento energético de longo prazo.

O aperfeiçoamento do conhecimento do recurso eólico pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é um processo permanente. Destacam-se os estudos baseados no Sistema de Acompanhamento das Medições Anemométricas (AMA). Este sistema recebe, analisa e armazena dados anemométricos das estações de medições dos empreendimentos eólicos vencedores dos leilões de energia. Por meio deste sistema foi possível conhecer de forma mais detalhada o comportamento eólico das regiões Nordeste e Sul, especificamente onde se encontram os empreendimentos eólicos vencedores dos leilões de energia. Além disso, os estudos de planejamento da expansão da matriz elétrica são baseados nos comportamentos dos recursos identificados pela base AMA com auxílio de dados de reanálise.

Como a fonte eólica vem ganhando participação na matriz energética nacional, faz-se necessário conhecer melhor o seu comportamento no que se refere a disponibilidade no tempo e espaço, e se seu comportamento continuará condizente com o histórico ou se haverá alteração proveniente das alterações climáticas. Desta forma, a elaboração de um estudo que verifique o comportamento da fonte eólica em função dos aspectos climáticos, nas escalas globais, mesoescala e microescala, seria de grande relevância.

A variabilidade climática possui influência em diversos setores e atividades econômicas e podem acarretar impactos significativos tanto na produtividade quanto na segurança de cada setor. Essa influência é bastante evidente no setor energético, na medida em que a segurança energética vem tornando-se mais dependente do clima devido a penetração de fontes renováveis na matriz energética, confirmada especialmente com a expansão do parque eólico e solar no Brasil. Quantificar o risco futuro sobre o setor energético, passa por compreender melhor as relações entre as projeções climáticas e a disponibilidade do recurso sobre nosso território, conforme discutido em diversos trabalhos (Martins, 2008; Martins, 2011; Pereira, 2011).

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste projeto é realizar um estudo multiescala (global, mesoescala e microescala) que analise a influência dos diversos sistemas meteorológicos sobre o recurso solar e eólico no território brasileiro, permitindo uma melhor compreensão dos eventos climáticos de maior impacto sobre o setor de energia. Adicionalmente, o estudo deverá identificar as possíveis alterações na disponibilidade futura dos recursos solar e eólico frente as projeções climáticas oriundas de modelos regionalizados disponibilizados pelo INPE.

## 1.3 Atividades

As principais atividades a serem desenvolvidas no âmbito deste trabalho são:

- Revisão de literatura sobre os sistemas meteorológicos atuantes no Brasil, a sua variabilidade em diversas escalas de tempo e espaço, assim como os seus impactos sobre a disponibilidade dos recursos solar e eólico;
- Levantamento e qualificação de dados observados de vento e de irradiação solar disponíveis em diferentes bases, como a Rede SONDA, dados de aeroportos (METAR), bases públicas do INMET e INPE. Estas bases de dados serão importantes para avaliar e compreender as incertezas associadas às estimativas produzidas pelos modelos numéricos de clima e de transferência radiativa utilizados na geração dos dados e produtos. Dados de reanálise de clima disponíveis para o território brasileiro também serão utilizados com o mesmo intuito e serão essenciais para a produção de mapas de ameaça associada à ocorrência de eventos extremos

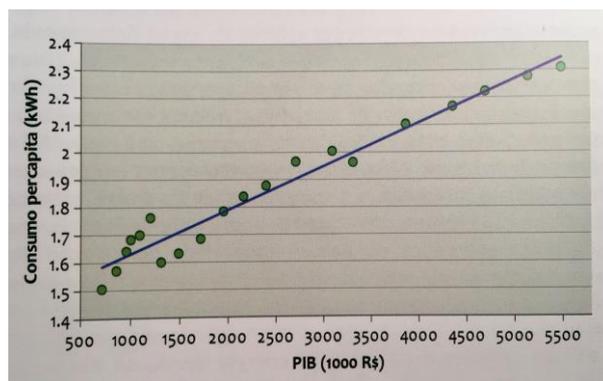
de vento, de irradiação solar e temperatura descritos nos objetivos desta contratação;

- Organização de uma base de dados observacionais consolidada em escala mensal a partir da combinação de conjuntos de reanálises e medições de superfície. Nesta base constará a distribuição de frequência das variáveis de velocidade do vento e irradiação solar geradas a partir dos dados em resolução original (horária se possível) em resolução espacial compatível com as saídas dos modelos climáticos refinados.
- Análise estatística descritiva utilizando: (i) as saídas dos modelos climáticos; (ii) a base observacional consolidada para velocidade de vento a 10 m acima da superfície (e a 50 m quando disponível); e (iii) dados de irradiação solar incidente na superfície. Além disso pretende-se investigar a similaridade entre as distribuições para o cenário climático atual em escala mensal (Período baseline Eta-CPTEC e HadRM3P). Avaliar a habilidade dos modelos climáticos em produzir estimativas com distribuição de probabilidades similares às observadas em dados de reanálise. Serão avaliados os modelos Eta-20km (forçado pelos modelos globais HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM) disponibilizado pelo CPTEC/INPE e HadRM3P-25km do *Met Office Hadley Centre* disponibilizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE).
- Desenvolvimento da metodologia de refinamento estatístico para a remoção de erros sistemáticos das estimativas de irradiação solar e vento produzidas nos modelos climáticos em escala mensal (Themeßl et al. 2012). Esta correção se faz necessária pois os modelos climáticos embora forneçam simulações consistentes para fenômenos de grande escala, necessitam de refinamento local para dar maior representatividade em relação às observações.

- Aplicação de um ou mais métodos de remoção de viés às projeções climáticas, quantificando impactos sobre o valor médio e possivelmente sobre a variabilidade (distribuição de frequências) do vento e irradiação solar em cenários futuros;
- Participação em reuniões presenciais ou virtuais com os atores-chave para manter o bom andamento do projeto, sempre que requisitado; e
- Participação em oficinas e outros eventos nacionais visando a disseminação das informações adquiridas ao longo do projeto, quando requisitado;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

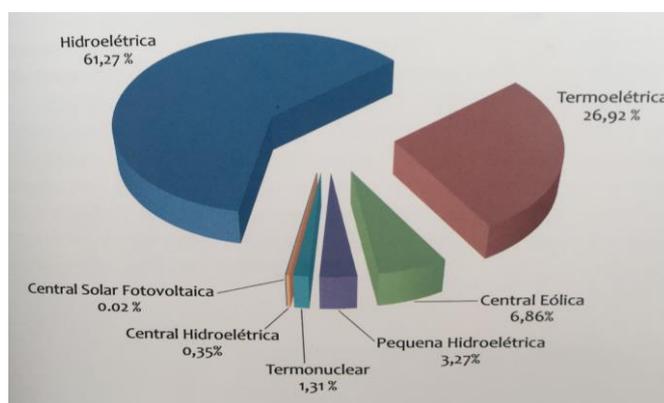
Uma das questões fundamentais para o desenvolvimento sustentável de uma nação está na inovação e aproveitamento de recursos energéticos renováveis. O crescimento econômico brasileiro demanda um consumo cada vez maior de energia, que vem crescendo proporcionalmente ao Produto Interno Bruto - PIB (Figura 1), em torno de 2% ao ano.



**Figura 1.** Variação do consumo de energia versus Produto Interno Bruto Brasileiro entre 1995 e 2015. Adaptado de Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017).

O sistema elétrico brasileiro é essencialmente hidrotérmico de grande porte e a capacidade de geração de energia elétrica atingiu, em 2017, a marca aproximada de 152 GW com participação das diversas fontes de energia conforme Figura 2 (ANEEL, 2017). Enquanto as fontes hidrotérmicas são consideradas fontes firmes capazes de garantir o atendimento da demanda de carga típica do sistema, as fontes renováveis como a eólica e a solar são consideradas fontes intermitentes de energia devido à variabilidade temporal elevada associada às condições meteorológicas (PEREIRA et al., 2017).

A expansão futura da participação das fontes de energias renováveis demanda um aprimoramento de métodos científicos para a produção de informações meteorológicas específicas para o planejamento e controle de sistemas de energia, tomando em consideração as condições ambientais características do território brasileiro. A disponibilidade e a variabilidade dos recursos solar e eólico estão fortemente relacionadas às condições de tempo e clima da região, uma vez que sistemas meteorológicos provocam alterações na nebulosidade, nos regimes dos ventos, nas concentrações dos gases e aerossóis, entre outros fatores.



**Figura 2.** Matriz elétrica brasileira em maio de 2017 de acordo com dados disponíveis no Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica.

## Vento

A densidade de energia no vento é determinada pelo balanço de energia global e pela movimentação da atmosfera como resultado deste balanço (HUBBERT, 1971). Os principais mecanismos pelos quais mudanças no clima global impactam o recurso eólico são alterações na distribuição geográfica e na variabilidade da velocidade do vento (PRYOR & BARTHELMIE, 2010). O primeiro mecanismo implica em diferentes impactos no recurso vento distribuído em diferentes regiões, enquanto o segundo, velocidade do vento (e sua variabilidade), define a viabilidade econômica e a capacidade de produção (SCHAEFFER et al., 2012).

Pereira et al. (2011) apresentou como potencial de capacidade de energia eólica no Brasil em 2001 como sendo de 143 GW (a 50 m de altura), o dobro da capacidade hídrica instalada na ocasião (ZACHIDOV, 2008) e afirmou que novos mapas, para alturas de 80 a 100 m, deveriam mostrar uma capacidade consideravelmente maior. Resultados deste tipo devem ser investigados no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro – Simulações 2013 (NEIVA et al., 2017). Em termos de projeções, Lucena et al. (2010) sugere um aumento de até 20% no recurso eólico para as regiões costeiras em geral, e para as regiões Norte e Nordeste em particular, considerando o cenário B2 (otimista) do IPCC e para o final do século 21. Resultados semelhantes são apresentados em Pereira et al. (2013), indicando um aumento entre 15% e 30% na densidade de potência de energia eólica para a maior parte da região Nordeste e de aproximadamente 10% para a região Sul.

## Radiação Solar

A tecnologia de geração heliotérmica é fortemente dependente de altos níveis de incidência de radiação direta, que por sua vez sofre impacto da nebulosidade e de quantidades elevadas de aerossóis na atmosfera. Além de impactos causados por eventos extremos, o recurso energético também pode ser afetado pelo aumento na temperatura do ar, o qual modifica a eficiência da célula fotovoltaica e reduz a geração elétrica fotovoltaica (HAMLET et al., 2009). A eficiência da energia solar concentrada, ou CSP (do inglês *Concentrating Solar Power*) também pode ser afetada pelas mudanças climáticas, pois consiste em uma máquina térmica e, como tal, sua eficiência é alterada pelas mudanças de temperatura ambiente (SCHAEFFER et al., 2012).

Martins et al. (2008) apresentou um estudo da disponibilidade do recurso solar no território brasileiro no âmbito do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*). Os maiores valores de irradiação foram encontrados para a região do semiárido no nordeste brasileiro devido a combinação de um ambiente extremamente seco com um alto número de horas de sol ao longo de todo o ano. O valor encontrado foi em torno de 6,5 kWh/m<sup>2</sup> por dia. Os autores encontraram valores levemente menores de irradiação para a região sudeste durante a primavera e verão, entretanto, a irradiação solar ao longo do ano possui alta variabilidade devido as incursões de frentes frias que atingem a região, principalmente no outono e inverno. A segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017) apresenta a região Nordeste como tendo o maior potencial solar, com valor médio do total diário da componente direta da irradiação horizontal como sendo de 5,05kWh/m<sup>2</sup>. A respeito do rendimento energético fotovoltaico anual, o trabalho aponta as regiões Sul e Sudeste como de maior potencial de geração para os meses de verão, coincidindo com os picos de demanda registrados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Utilizando projeções climáticas, Oscar et al (2015) chegaram a valores que indicam leve aumento na disponibilidade do recurso solar em todas as regiões do

Brasil até 2100. Adicionalmente, os autores apontam redução na capacidade de conversão de energia, que é sensível a variações na temperatura ambiente, devido ao aumento da temperatura especialmente nas regiões norte e centro-oeste. Bierhals et al (2017), utilizando dados dos modelos do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5, mostrou uma queda no recurso solar na região sul do Brasil, chegando a 12% no leste do Rio Grande do Sul entre 2026 e 2100.

Todos os trabalhos explicitam as limitações dos resultados em relação às incertezas das projeções e, principalmente, a escassez de dados analisados e a necessidade de se incluir séries mais robustas de dados observados e outros modelos e/ou cenários climáticos. Neste trabalho, propõe-se utilizar modelos climáticos regionais, cuja resolução espacial é maior em relação aos modelos globais utilizados nos trabalhos anteriores. Além disto, propõe-se a criação de um banco de dados observados consolidado e em resolução compatível com os modelos regionais para que estes possam ser ajustados através de métodos de correção de viés. No que se refere a cenários climáticos, o trabalho proposto neste plano irá utilizar a abordagem de níveis específicos de aquecimento, que está de acordo com os trabalhos mais recentes que tratam do tema mudanças climáticas.

### **3. METODOLOGIA**

A proposta deste trabalho está dividida em quatro etapas distintas. A primeira será a organização de uma base de dados observacionais consolidada em escala mensal, a partir da combinação de conjuntos de reanálises e medições em superfícies das variáveis velocidade do vento e irradiação solar. Esta base deverá conter resolução espacial

compatível com as saídas dos modelos climáticos. A segunda etapa, será a análise estatística das saídas dos modelos climáticos (período baseline) a partir desta base observacional consolidada para as duas variáveis mencionadas. A terceira etapa consiste em desenvolver metodologia para refinamento estatístico e aplicar métodos de remoção de viés às projeções climáticas, ao mesmo tempo, quantificando os impactos dessas correções sobre o valor médio e possivelmente sobre a variabilidade das duas variáveis em cenários futuros. A quarta e última etapa consiste em apresentar os resultados das projeções destes modelos climáticos corrigidos para níveis específicos de aquecimento em relação ao período pré-industrial, de acordo com o usualmente adotado em trabalhos recentes (1,5°C, 2°C e possivelmente 3°C), e os impactos sobre os recursos solar e eólico no território brasileiro.

### **3.1 Base de dados observacionais consolidada**

Neste projeto consta a organização de uma base de dados observacionais em escala mensal que incluirá a distribuição da frequência das variáveis velocidade do vento e irradiação solar geradas a partir dos dados em resolução temporal original (horária, se possível) e em resolução espacial compatível com as saídas dos modelos climáticos utilizados neste trabalho. As informações que irão compor esta base de dados serão provenientes da combinação de conjuntos de dados observados, disponíveis em diferentes bases públicas, e de reanálises, conforme descrito a seguir e resumido na Tabela 1. A cobertura das redes de dados observados é apresentada na Figura 4. Todos os dados devem passar por um controle de qualidade.

#### **a) Rede SONDA**

A Rede SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (<http://sonda.ccst.inpe.br/>) nasceu de um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para implementação de infraestrutura física

e de recursos humanos destinada a levantar e melhorar a base de dados dos recursos de energia solar e eólica no Brasil, e atualmente conta com a colaboração de vários institutos de pesquisa e universidades brasileiras. A rede conta com estações de medição distribuídas estrategicamente pelo território brasileiro para representar as diferentes características climáticas do país.

#### b) METAR

A informação meteorológica é vital para a segurança das operações aéreas. O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) exerce o papel de fornecer estas informações através de uma complexa estrutura de radares, estações meteorológicas, centros de coordenação e outros recursos instalados no país. A REDEMET - Rede de Meteorologia (<https://www.redemet.aer.mil.br/>) do Comando da Aeronáutica tem como objetivo integrar os produtos meteorológicos voltados à aviação civil e militar, visando tornar o acesso a estas informações mais rápido, eficiente e seguro.

#### c) Estações Meteorológicas Automáticas (EMA's) do INMET

A missão do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (<http://www.inmet.gov.br>) é prover informações meteorológicas à sociedade brasileira e influir construtivamente no processo de tomada de decisão, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país. As EMA's, operadas pelo INMET e empregadas para fins de estudos meteorológicos e de monitoramento ambiental, operam de forma automática e desatendida, com dados enviados via satélite a partir de todo o território nacional. A rede compreende cerca de 900 estações meteorológicas e trata-se da rede com maior densidade de estações no país.

#### d) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)

Considerando que as redes de dados observados não são homogeneamente distribuídas pelo território nacional, faz-se necessário a utilização de dados de reanálises onde as estações são escassas. Uma alternativa é se utilizar dados CFSR (SAHA et al., 2014). Estes dados são provenientes de modelo global acoplado de altíssima resolução espacial com assimilação de radiâncias de satélite e podem ser obtidos na página da NCAR - National Center for Atmospheric Research (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr/>).

### e) ERA-Interim

Uma segunda alternativa são os dados de reanálise ERA-Interim (DEE et al., 2011) disponibilizados pelo ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecast (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim/>). Assim como CFSR, estes dados também são distribuídos em alta resolução espacial e temporal, de modo que deve ser feita uma avaliação para os dois conjuntos de reanálises (CFSR e ERA-Interim) e o melhor conjunto de dados será utilizado neste trabalho.



**Figura 3.** Cobertura nacional da rede de dados: A) Rede SONDA; B) METAR e C) INMET. Adaptado de [www.sonda.ccst.inpe.br/](http://www.sonda.ccst.inpe.br/), [www.redemet.aer.mil.br/](http://www.redemet.aer.mil.br/) e [www.inmet.gov.br/](http://www.inmet.gov.br/) respectivamente.

**Tabela 1.** Resumo dos dados a serem utilizados.

Fonte	Variáveis	Resolução temporal	Resolução espacial
Rede Sonda	velocidade e direção do vento (10 m), velocidade e direção do vento (50 m), radiação global horizontal, radiação direta	10 minutos 1 minuto	-
METAR	velocidade e direção do vento	1 a 3 horas	-
INMET	Radiação solar, direção e velocidade do vento	1 hora	-
CFSR	Fluxo descendente de radiação de onda curta, componentes U e V do vento	1 hora	0,5°
ERA-Interim	Componente U e V do vento (10 m),	3 horas	0,75°

### 3. 2 Modelo climático regional Eta/CPTEC

O modelo Eta foi desenvolvido nos anos 70, pela Universidade de Belgrado em parceria com o Federal Hydrometeorological Institute, da Iugoslávia para previsão numérica de tempo. O modelo tornou-se operacional na Iugoslávia em 1978 e posteriormente a coordenada eta foi criada por (MESSINGER et al. 1988) para reduzir os erros cometidos pela coordenada *sigma*. O modelo de área limitada Eta (BLACK, 1994; MESSINGER et al. 1988) tem sido utilizado operacionalmente no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 1996 (CHOU et al., 2012).

O modelo regional se propõe a prever com maiores detalhes sistemas organizados em mesoscala, tais como fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima e tempestades severas. A resolução horizontal atual utilizada na América do Sul é de 20 km, a vertical é de 38 níveis, e as variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar,

componente zonal e meridional do vento, umidade específica, hidrometeoros de nuvens, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

Os dados de modelo a serem utilizados neste trabalho são provenientes do modelo regional Eta 20 km, rodado com as condições de contorno de três diferentes modelos globais do CMIP5 (CHOU et al., 2014a, 2014b), a saber: HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM, no Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos – CPTEC. As integrações do clima futuro realizadas com este modelo são baseadas nos caminhos representativos de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, nomeados de *Representative concentration Pathway* (RCP) (MOSS et al., 2010). Será utilizado apenas o cenário RCP8.5 e, para este conjunto de dados, serão analisados níveis específicos de aquecimento global em relação ao período pré-industrial. O cálculo do ano referente a cada nível de aquecimento específico é feito utilizando-se os dados de temperatura média global do modelo que forneceu as condições de contorno para o respectivo modelo regional. A partir dos valores médios globais de temperatura anual, é feita uma média móvel de 30 anos para suavizar a variabilidade interanual. Com o cálculo da tendência, o nível específico de aquecimento é definido como o ano em que um determinado valor de aquecimento (em relação ao período pré-industrial) é atingido pela primeira vez.

### **3.3 Modelo climático regional HadRM3P/MOHC**

A terceira geração de modelo regional do MetOffice Hadley Centre, HadRM3P (JONES et al., 2004), é uma versão melhorada da componente atmosférica do modelo acoplado AOGCM, HadCM3 (GORDON et al. 2000). Possui resolução espacial horizontal de 25 km com 19 níveis na atmosfera (desde a superfície até 30 km na estratosfera) e quatro níveis no solo. As variáveis prognósticas são pressão em superfície,

componentes zonal e meridional do vento, temperatura potencial, vapor de água e conteúdo de água líquida e gelo na nuvem, e mais cinco espécies químicas que são usadas para simular a distribuição dos aerossóis de sulfato. Os dados a serem utilizados serão disponibilizados pelo CCST/INPE para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e são provenientes das rodadas do HadRM3P aninhado ao HadGEM2-ES. O período *baseline* é de 1979 a 2005 e as projeções se estendem até 2050.

### 3.4 Ajuste dos modelos climáticos

As simulações dos modelos numéricos possuem erros sistemáticos que ocorrem devido a falhas nos processos físicos ou nas condições iniciais e de contorno representados no modelo. Em geral, para que se possa utilizar os resultados de projeções de mudanças climáticas em estudos de impactos, um modelo climático precisa simular razoavelmente o clima recente. A segunda e terceira etapa deste trabalho consistem em, utilizando a base de dados consolidada da primeira etapa, analisar e ajustar os resultados das projeções dos modelos climáticos. Para isso se faz, inicialmente, uma avaliação estatística do período histórico dos modelos, comparando os resultados das saídas dos modelos com os dados observados para o mesmo período. Essa avaliação deve ser feita para as variáveis de interesse (vento e irradiação solar). A partir disto, faz-se um trabalho de correção dos erros sistemáticos desses modelos, ou remoção de viés. Existem inúmeros métodos de remoção de viés, com diferentes graus de complexidade e a escolha depende fortemente do contexto. Uma revisão do estado da arte dos métodos de correção é feita por Maraun et al. (2010). Um método simples a ser testado é o que utiliza um fator multiplicativo de correção (HEMPEL et al., 2013), pois este método preserva a tendência da série. Outros métodos podem vir a ser investigados e testados e, posteriormente, comparados. O método que se mostrar mais adequado será o escolhido.

A quarta etapa consiste em analisar os resultados das projeções dos modelos ajustados e quantificar os impactos das mudanças do clima nos recursos eólico e solar.





## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a penetração das fontes renováveis na matriz energética brasileira, a segurança energética torna-se cada vez mais dependente do clima e de sua variabilidade. Quantificar o risco futuro sobre o setor energético envolve compreender as relações entre as projeções climáticas e a disponibilidade dos recursos sobre nosso território para atribuir algum tipo de crédito de capacidade de geração que possa ser utilizado no planejamento energético de longo prazo. O foco deste trabalho envolve desde o estudo das relações entre os sistemas meteorológicos atuantes no território brasileiro e seus impactos sobre o recurso solar e eólico em diversas escalas até o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade futura destes recursos, a partir de cenários regionalizados produzidos com uso de modelos climáticos globais.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, 1994.
- CHOU, S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, 2012.
- CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 2014a.
- CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 2014b.
- DEE, D. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, 137: 553-597, 2011.
- GORDON, C. et al. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. **Clim. Dyn.**, v. 16, p. 147-168, 2000.
- HAMLET, A. F., et al. Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State. The Washington climate change impacts assessment: evaluating Washington's future in a changing climate. Chapter 4: energy. **JISAO climate impacts Group**, p. 165-190. 2009.
- HEMPEL, S. et al. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. **Earth Syst. Dynam.**, v. 4, p. 219–236, 2013.
- HUBBERT, MK. Energy resources of the Earth. **Scientific American**, 224: p. 60-70, 1971.
- JONES, R. et al. Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using Precis. **The National Communication Support Unit**. 2014.
- LUCENA, A. F. P. et al. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**; v. 35, p. 904-912, 2010.
- MARAUN, D. et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user, **Rev. Geophys.**, v. 48, RG003, 2010.

MARTINS, F. R. et al. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. **Energy Policy**, v.36, p.2853-2864. 2008.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4378–4390, 2011.

MESINGER, F. et al. The Step-Mountain Coordinate: Model Description and Performance for Cases of Alpine Lee Cyclogenesis and for a Case of an Appalachian Redevelopment. **Monthly Weather Review**, 1988.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, 2010.

OSCAR, A. J, et al. Evaluation of Renewable Energy Vulnerability to Climate Change in Brazil: A Case Study of Biofuels and Solar Energy. **Smart Grid and Renewable Energy**, n. 6, p. 221-232, 2015.

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

PEREIRA, E. B., et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São Jose dos Campos: INPE, v. 1, segunda edição, p. 84. 2017.

PRYOR, S. C. & BARTHELMIE, R. J. Climate change impacts on wind energy: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**; 14:43p07, 2010.

SAHA, S. et al. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Monthly Products. **Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research**, Computational and Information Systems Laboratory, 2014. Acessado em 10 de outubro de 2018.

SCHAEFFER, R. et al. Energy sector vulnerability to climate change: A review. **Energy** 38 p. 1-12. 2012.

THEMESSL, M. J.; GOBIET, A.; HEINRICH, G. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. **Climatic Change**, v. 112, n. 2, p. 449–468, 2012.