1

# Avaliação da Complementaridade das Usinas Hidráulicas e Eólicas frente às Mudanças Climáticas

N. Scherner, J. W. Marangon Lima, L. M. Marangon Lima, A.R. de Queiroz

Abstract- Wind and hydro power plants are classified into renewable energy because they contribute to decrease the greenhouse effect. However, the power production by these sources depends on the climate variables like precipitation and wind which can be affected by climate changes. Most of expansion and operation studies carried out by the National Interconnected System (SIN) in Brazil use historical data of these variables and do not take into consideration the dynamics associated with climate changes. Thus, it is recommended to analyze such changes into the current operational planning, mainly because almost 90% of the power generation in Brazil comes from hydro and wind sources.

Some studies prove the existence of the complementarity between wind and water sources in several regions of Brazil, through the analysis of historical wind and precipitation series. This paper analyses the wind and precipitation time series behavior and their correlation using both the historical and future data. The future data are the results from the Global Climate Models (GCM), based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) with the current update of the last meeting in 2014. These are further transformed by downscaling to obtain a better resolution using the ETA regional model. The regional model ETA has been the main tool to produce weather and climate forecasts over South America since 1996 by the National Institute for Spatial Research (INPE).

Index Terms-- Climate Change, Hydroelectric power generation, Hydro-Wind Complementary, Wind power generation

#### I. Nomenclatura

ACF	Função de Autocorrelação	
EOL	Usina Eólica	
EPE	Empresa Brasileira de Pesquisa Energética	
GCMs	Global Climate Models	
INPE	Instituto Brasileiro de Pesquisa Espacial	
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	
ONS	Operador do Sistema Elétrico Brasileiro	
ONU	Organização das Nações Unidas	

N. Scherner está na Brasil Comercializadora (e-mail: nayanascherner @hotmail.com)

PROINFA Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de

Energia Elétrica

RCP Representative Concentration Pathway

RCMs Regional Climate Models SIN Sistema Interligado do Brasil

UHE Usina Hidrelétrica

## II. INTRODUÇÃO

As usinas eólica e hidrelétrica são consideradas fontes renováveis de energia, ou seja, sua produção energética é

suportada por combustíveis renováveis, bem como as plantas solar, biomassa, geotérmica e maré motriz. Além disso, são consideradas fontes limpas de energia pois durante a sua produção não há emissão de gases que contribuem para o aquecimento global. Apesar destas fontes não contribuírem para o aquecimento global, o seu "combustível" depende das variáveis climáticas que são afetadas por este aquecimento. A avaliação do comportamento destas variáveis, bem como sua previsão, é importante para o planejamento e operação do SIN

Fontes de energia relacionadas com o clima, como fontes de energia eólica, solar e hídrica são variáveis no tempo e no espaço. Com a crescente penetração de tais fontes de energia, é necessário conhecer o comportamento das variáveis climáticas visto que são fontes intermitentes e com pouca margem de armazenamento mesmo para as usinas hidrelétricas atuais que tem pouco volume de água nos reservatórios. Com a diversidade das fontes primárias que são utilizadas para compor o parque gerador e o seu pouco grau de regulação, é importante conhecer não só o comportamento individual destas fontes mas também as complementaridades existentes. Isto é importante para compor o balanço energético de curto prazo, e também o de longo prazo que afeta o planejamento da expansão.

O risco de déficit de energia vem crescendo nos últimos anos no Brasil, em consequência da redução dos investimentos no setor elétrico aliado com as mudanças climáticas [1]. Diante disto, cresceram os incentivos em micro e mini geração de energia por meio de recursos energéticos renováveis nos últimos anos, através de programas governamentais como PROINFA e Resolução Normativa 482/2012 [2] [3].

Atualmente o parque gerador brasileiro é composto por usinas hidrelétricas, termoelétricas, eólicas, solares, nuclear e biomassa. Mais especificamente, cerca de 62% da geração

J. W. Marangon Lima é consultor da MC&E (e-mail: jose.marangon @marangonenergia.com.br)

L. M. Marangon está Duke University (email: luana @marangonenergia.com.br

A. R. de Queiroz está no Civil Construction and Environmental Engineering Department of the North Carolina State University, NCSU (e-mail: ardequei@nscu.edu

das usinas hidrelétricas, 27% das provém usinas termoelétricas e 6,88% de usinas eólicas. Entre os futuros empreendimentos de geração renováveis que irão compor o parque gerador brasileiro, as usinas eólicas possuem maior representatividade, compreendem cerca empreendimentos (em construção e em construção ainda não iniciada), totalizando 7599 MW a mais de capacidade de geração por fontes eólicas, destacando-se a sua importância para composição da matriz energética brasileira [4]. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2023 [5] esta capacidade pode chegar a representar cerca de 11,7% (22,4 GW) em 2023.

Muitos trabalhos comprovam a existência complementaridade entre fonte eólicas e hídricas em diversas regiões do Brasil, através da análise de séries históricas de vento e precipitação [6] [7]. A região nordeste do país destaca-se das demais, pois é a região com maior produção de energia por fontes eólicas e, quando se analisa as séries históricas de precipitação e de velocidade de vento, nota-se que nos períodos hidrológicos secos a intensidade do vento aumenta. Já a região Sul, segunda maior produtora de energia por plantas eólicas, apresenta comportamento diferenciado, ou seja, nos períodos de hidrologia úmida o vento apresenta maior velocidade, não subsistindo complementaridade energética hidro-eólica internamente à região, porém quando verificado no contexto nacional, a maior intensidade do vento da região sul é complementar à baixa precipitação das demais regiões do país, podendo vir a assumir papel relevante no suprimento da demanda do SIN.

é objetivo deste trabalho verificar se complementaridade hidro-eólica observadas nas séries históricas, até o momento, permanecem válidas para o futuro em decorrência do aquecimento global, para as regiões Nordeste e Sul do Brasil. Para este estudo foram utilizadas as séries de vento e precipitação do modelo ETA, modelo que tem sido utilizado operacionalmente para produzir previsões de tempo sobre a América do Sul desde 1996 pelo INPE, para diferentes cenários climáticos. Os dados de precipitação foram transformados em vazão através do modelo chuvavazão, MGB-IPH, enquanto que os dados de velocidade de vento foram tratados para melhor corresponder com a realidade.

No capítulo III será apresentando a preocupação global com as mudanças climáticas, causadas pelo efeito estufa, e modelos climáticos que já abordam o aquecimento global nas suas previsões para o futuro. O Capítulo IV mostra como foram estabelecidas as séries futuras de velocidade de vento e vazão d'água, bem como, as localidades que serão estudadas. O Capítulo V aborta a metodologia estatística que será utilizada para avaliação das séries de velocidade de vento e vazão d'água projetadas, bem como a análise de correlação e tendência. No Capítulo VI será apresentado o estudo de caso, ou seja, avaliação da complementaridade hidro-eólica no longo prazo. O Capítulo VII traz as principais conclusões obtidas no estudo de caso realizado e, por fim, o Capítulo VIII apresenta as referências utilizadas neste artigo.

# III. MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas são causadas pela emissão excessiva de gases que provocam o efeito estufa (gás carbono, metano, óxido nitroso, entre outros), em atividades como a queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral), para geração de energia elétrica e locomoção.

As alterações no clima já são perceptíveis aos sereshumanos nas diversas partes do mundo devido aos diversos acontecimentos, tais como os desastres ambientais (aumento da incidência de grandes tempestades, furações ou tufões e tornados), redução das afluências dos rios, onde áreas úmidas passam por períodos de estiagem, aumento do nível do mar (devido ao descongelamento das geleiras) e diminuição da produtividade das lavouras.

Para evitar o colapso mundial e limitar o aquecimento global, em 12 de dezembro de 2015 todos os países assinaram o Acordo de Paris, onde comprometeram-se em preparar e comunicar à ONU suas respectivas "Contribuições Nacionalmente Determinadas", ou NDCs (Nationally Determined Contributions). As NDCs são um conjunto de metas e/ou políticas e ações domésticas a serem adotadas individualmente por todos os países, como parte dos esforços globais de combate à mudança do clima.

Além da meta de redução de gases que provocam o efeito estufa, as NDCs podem conter medidas adicionais, que condizem a meta do Acordo de Paris em que aumento máximo da temperatura seja de 2°C.

A NDC do Brasil comprometeu-se em reduzir em 37% a emissão de gases que provocam o efeito estufa (considerando o ano 2005 como base) até 2025, e as medidas adicionais, estabelecidas pelo Acordo de Paris, integram mudanças nos setores agrícola, industrial, transportes e energético. No que diz a respeito ao setor energético, a NDC do Brasil tem como principais desafios a expansão da geração elétrica por fontes renováveis (além da hídrica), aumentar os ganhos em eficiência energética, garantir o atendimento aos critérios de segurança do fornecimento no médio e longo prazo, e manter o baixo nível de emissão de gases do efeito estufa pela produção de energia elétrica [8].

Nesse contexto, impulsionados pelas variações climáticas e na tentativa de avaliar e mitigar os impactos das mesmas no período de longo prazo no Brasil, considerou-se os Modelos Climáticos Globais ou GCMs (Global Climate Models), como a principal ferramenta de representação de processos e fenômenos críticos para o estudo das variações climáticas globais. Estes modelos possuem resolução de cerca de 200 a 100 km, e, portanto, são incapazes de capturar informações como topografía, bacias hidrográficas e linhas costeiras em suas simulações. Assim, os Modelos Climáticos Regionais ou RCMs (Regional Climate Models) desempenham um papel importante na redução da escala de simulação dos GCMs, pois, por trabalharem com escalas de grade reduzida, são capazes de captar melhor as informações da área que se deseja avaliar o impacto das mudanças climáticas, bem como a amplitude de um fenômeno [9] [10].

## A. Modelos Climáticos

Neste artigo, foram utilizados dois GCMs, HadGEMs-ES e MIROC5, e a eles aplicou-se a redução de escala através do Modelo ETA, utilizado pelo INPE. Estes modelos deram origem a dois modelos RCMs: ETA HadGEMs-ES e ETA MIROC5. O Modelo HadGEMs-ES é um modelo britânico que avalia as mudanças climáticas, criado pelo Hadley Center, observando os efeitos das químicas e do aerossol na atmosfera para representação do gás carbono e poluição, possuindo resolução de 1,3° latitude e 1,9° de longitude. O MIROC5, também conhecido como Modelo Interdisciplinar sobre Clima, é um modelo japonês que simula os efeitos climáticos devido as condições de poluição atmosférica por aerossóis em escala global, cuja resolução é de 1,4° de latitude e 1,4° de longitude.

Aos dois modelos foram aplicadas trajetórias de concentração de gases de efeito, publicados no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC, denominados de RCPs (Representative Concentration Pathway), sendo estes RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5 [11].

O RCP 2.6 pressupõe que as emissões anuais globais atingem um pico entre 2010-2020, com as emissões diminuindo substancialmente posteriormente, esta trajetória representa a baixa emissão de gases e como consequência a baixa forçante radiativa. O RCP 4.5 apresenta o pico de emissões gases do efeito estufa em torno de 2040 e depois declinam. No RCP 6.0 as emissões atingem o pico em torno de 2080 decrescendo para os próximos anos. Os RCPs 4.5 e 6.0 representam emissões de gases moderada, ou seja, são trajetórias de forçantes radiativas médias. No RCP 8.5, as emissões de CO<sub>2</sub> aumentam ao longo do século XXI, apresenta forçante radiativa elevada, com maior emissão de gases poluente. Enquanto RCP 2.6 projeta o aquecimento global entorno de 1°C até o final do século XXI, o RCP 8.5 apresenta aquecimento de 4°C. A Fig. 1 apresenta o comportamento de cada RCP com relação a de emissões de gases até 2100 [12].

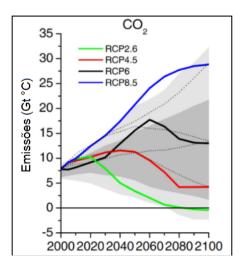


Fig. 1. Representação dos RCPs utilizados no AR5 do IPCC

Para avaliação das variáveis precipitação e velocidade do vento, no longo prazo, que são a base deste trabalho, foi

adotada a trajetória de emissão RCP 8.5, pois sua performance é melhor que as demais trajetórias quando comparado com o que vem ocorrendo atualmente no clima da América do Sul.

Assim, cada modelo regional, ETA-HadGEMs-ES e ETA-MIROC5, foi submetido à trajetória de emissão de gases RCP 8.5 para o período futuro, dando origem a dois modelos: ETA-HadGEMs-ES 8.5 e ETA-MIROC5 8.5. Para fins didáticos, estes modelos foram separados em dois períodos, um sendo o período histórico (1961-1990) e outro o futuro (2011 - 2100).

A Fig. 2, traz o comparativo da temperatura para o modelo ETA-HadGEMs-ES 8.5 e ETA MIROC5 8.5 em três regiões do Brasil: Norte, Nordeste e Centro-Sul. Verifica-se o aquecimento da atmosfera com o passar dos anos, e o modelo ETA-HadGEMs-ES 8.5 apresenta temperaturas elevadas em relação ao ETA-MIROC5 8.5 em todos os períodos [10].

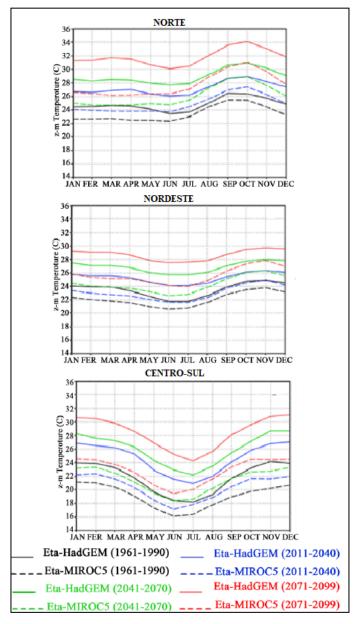


Fig. 2. Média de temperatura no ciclo anual, para os modelos ETA-HadGEMs-ES 8.5 e ETA-MIROC5 8.5, em três regiões do Brasil

# IV. CONSTRUÇÕES DAS SÉRIES FUTURAS DE VELOCIDADE DE VENTO E VAZÃO D'ÁGUA

Para construção das séries futuras de velocidade de vento e vazão d'água primeiramente determinou-se as localidades que serão estudadas a complementaridade hidro-eólica. Tais localidades são as mesmas adotadas por Witzler (2015) [6], cujo trabalho avaliou a complementaridade hidro-eólica através das séries históricas de vento para sites localizados em quatro estados brasileiros: Rio Grande do Norte, Bahia, Ceará e Rio Grande do Sul. A escolha destas regiões foi feita através da listagem dos empreendimentos de geração eólica vencedores do leilão de energia reserva (LER), leilões de energia nova (LEN), leilões de fontes alternativas (LFA), PROINFA e parques eólicos cuja a energia é comercializada no Ambiente de Contratação Livre (ACL).

TABELA I REGIÕES DE ESTUDO

Código	Cidade	Estado
1	Amontada	Ceará
2	Aracati	Ceará
3	Caetité	Bahia
4	Morro do Chapéu	Bahia
5	Currais Novos	Rio Grande do Norte
6	João Câmara	Rio Grande do Norte
7	Coxilha Negra	Rio Grande do Sul
8	Estrada Senandes	Rio Grande do Sul

Além disso, um estudo realizado pela EPE (2013) [13], cujo objetivo era avaliar o potencial eólico da região Sul e Nordeste do Brasil, apontou que os futuros parques eólicos nestas regiões podem agregar valor no planejamento de expansão do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). A Tabela I atraz as localidades que serão estudadas.

Para os dados de vazões d'água utilizou-se as vazões das UHEs mais próximas das regiões onde foram extraídos os dados de velocidade do vento, sendo estas: duas UHEs localizadas na bacia do Rio São Francisco, região nordeste do Brasil, as UHEs Complexo Paulo Afonso e Sobradinho, e duas na região sul Brasil, as UHEs Dona Francisca (bacia do Rio Jacuí) e Castro Alves (bacia do Rio Taquari-Antas).

# A. Séries Futuras de Velocidade de Vento

Para a construção das séries futuras de velocidade vento com a integração das mudanças climáticas, foram extraídos os dados de velocidade vento dos modelos ETA-HadGEMs-ES 8.5 e ETA-MIROC5 8.5. Os dados de velocidade de vento destes modelos são especificados em médias diárias e medidos para 10 metros de altura em relação ao solo. Portanto, necessitou-se fazer ajustes nestes dados para adequá-los aos modelos a serem utilizados e comparados. Sendo assim, primeiramente foi necessário padronizar os dados de vento à altura das turbinas dos aerogeradores, através da extrapolação vertical do vento, visto que, as mesmas estão geralmente instaladas acima de 100 metros de altura em relação ao solo. Nesta altura a influência da

rugosidade do terreno é minimizada além da diminuição na existência de obstáculos e na estabilidade térmica que podem influenciar na redução da velocidade do vento e no desempenho do aerogerador.

Adotou-se o método logarítmico [14] para realizar a extrapolação dos dados dos modelos climáticos, através de (1).

$$v = \frac{v^*}{K} \left( ln \left( \frac{h}{z_0} \right) - \Psi \right) \qquad (1)$$

Onde,  $\mathbf{v}$  é a velocidade na altura  $\mathbf{h}$  em m/s,  $\mathbf{v}$  é a velocidade de atrito em m/s,  $\mathbf{z_0}$  é o comprimento de rugosidade em relação ao solo medido em m,  $\mathbf{K}$  é a constante adimensional de Von Karman (k=0,4),  $\mathbf{\Psi}$  é o fator de correção do perfil atmosférico devido à influência do fluxo de calor do solo.

Na Eq. (1) a velocidade é determinada para 120 metros de altura; **z**<sub>0</sub> foi considerado igual a 0,03m pois representa o valor típico para terrenos do tipo *campo* [14].

A velocidade de atrito v é dada pela Eq. (2).

$$v^* = \frac{v \cdot K}{\ln\left(\frac{h}{z_n}\right)} \tag{2}$$

Em (2), vo corresponde a velocidade extraída dos modelos climáticos e h a sua respectiva altura de medição, no caso 10 metros.

O cálculo de  $\Psi$  é determinado para três condições, estável, instável e neutra.

Para a condição estável:

$$\Psi = -4.7 \frac{h}{I} \tag{3}$$

Para a condição instável:

$$\Psi = \left(1 - 16\frac{h}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{4}$$

Para a condição neutra, <sup>Ψ</sup> é nulo.

Onde, L é o comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov (m²/kg). Neste trabalho foi adotado o valor de 1000 m²/kg para a condição estável, -1000 m²/kg para a condição instável [15].

Assim, foi determinada a velocidade do vento na altura de 120 metros, para as três condições atmosféricas: estável, instável e neutra. Contudo necessitou-se avaliar a porcentagem do dia em que cada uma destas condições está ativa, para tal utilizou-se o critério de estabilidade de Richardson [16], que determina para cada hora do dia a condição atmosférica através da avaliação da temperatura e velocidade do vento em níveis diferentes em relação ao solo, conforme (5).

$$RI = \frac{g}{\left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right) + K} \times \frac{(T_2 - T_1) \times (h_2 - h_1)}{(v_2 - v_1)^2}$$
(5)

Onde,  $\mathcal{G}$  é gravidade,  $\mathcal{K}$  a constante de Kelvin,  $\mathcal{T}_1$  e  $\mathcal{T}_2$ , as temperaturas no nível 1 e nível 2,  $\mathcal{h}_1$  e  $\mathcal{h}_2$  as alturas no nível

1 e nível 2, e \*\*1 e \*\*2 as velocidades do vento no nível 1 e nível 2.

Para o critério de estabilidade foram adotadas das seguintes condições: se RI for menor que -0,03 considera-se instável, se for maior que 0,01 é estável e se estiver entre -0,03 e 0,01 é considerado neutro. E assim, determina-se para cada dia do ano o percentual das condições atmosféricas [16].

Porém para calcular o critério de estabilidade de Richardson foram utilizados os dados de medição histórica doados pela Vestas do Brasil [6], por estes possuírem medições horárias de velocidade de vento e temperatura, e em diferentes alturas. Assim, determinou-se as porcentagens de cada condição atmosférica para cada mês do ano nos quatro estados brasileiros em estudo.

Com os dados históricos e futuros dos modelos climáticos já extrapolados, foi necessário fazer o ajuste nas projeções climáticas através da metodologia "Delta Change", pois os dados históricos dos modelos climáticos não conseguem representar perfeitamente o clima atual e seus resultados apresentam alguns erros [9]. Portanto, utilizou-se o histórico do modelo VORTEX, modelo atmosférico de Mesoescala online que fornece velocidades de vento estimadas para locais onde não existem medições de longo período, para ajuste nos dados dos modelos climáticos.

O "Delta Change" é fundamentado no cálculo das anomalias existentes entre os valores estimados pelos modelos climáticos entre o período histórico e futuro. Esta taxa ou anomalia é aplicada ao histórico real e construída a série futura.

A Fig. 3 traz como exemplo uma série de vento antes e depois da aplicação da Taxa de Câmbio. A linha em azul representa os dados não ajustados e a linha vermelha os dados após o ajuste de viés. Nota-se, um delta positivo após ajuste, mostrando a sua relevância para que os dados dos modelos climáticos se assemelhem com a realidade.

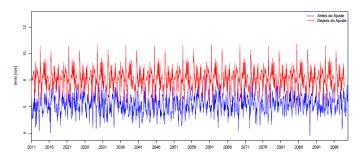


Fig. 3. Aplicação da Taxa de Câmbio nos dados dos modelos climáticos

Com as séries de vento dos modelos climáticos ajustados, o último passo é transformar as séries diárias em mensais, para analisar a correlação com as séries de vazões d'água que estão em base mensal.

# B. Séries Futuras da Vazão D'água

Para a simulação hidrológica das bacias, bem como das vazões que passam pelas usinas de interesse, utilizou-se o modelo hidrológico MGB-IPH [9] em Queiroz et al (2016) [17], para reconstrução das vazões das bacias hidrológicas

brasileiras através dos dados dos modelos climatológico.

O MGB-IPH foi desenvolvido para representar os processos de transformação da chuva em vazão nas bacias de grande escala [18]. Desta maneira, as UHEs são detalhadas com configurações de localização, curso d'água, bacia e área da bacia de drenagem [19].

O modelo hidrológico MGB-IPH proporciona a simulação hidrológica em bacias as quais a área é superior a 10.000 km². Este modelo já foi também aplicado com sucesso em outros estudos relacionados aos impactos das mudanças climáticas nas bacias hidrográficas, tais como Nóbrega et al (2011) [20] e Bravo et al (2014) [21].

Neste trabalho para as séries de vazões históricas das UHEs adotou-se as vazões registradas pelo ONS [21] e as vazões futuras os resultados obtidos pelo modelo MGB-IPH.

# V. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, fez-se necessário o uso de ferramentas estatísticas, como funções de distribuições de probabilidade, análise de tendência e análise de correlação.

# A. Distribuição de Probabilidade

A distribuição de probabilidade consiste em numerar qual é a probabilidade de ocorrência de uma determinada variável em uma série de dados.

Neste artigo, analisaremos qual a função de densidade de probabilidade dos dados de velocidade do vento, ou seja, a probabilidade de a velocidade do vento estar entre dois valores.

$$p(v_{\alpha} \le v \le v_b) = \sum_{i=\sigma}^b p(v_i) \tag{6}$$

Sendo a área total sobre a curva da função distribuição de probabilidade é dada por:

$$\sum_{i=0}^{\infty} p(v_i) = 1 \tag{7}$$

Existem várias funções densidade de probabilidade que podem representar o comportamento do vento, dependendo do padrão eólico da localidade. As principais distribuições de probabilidade utilizadas na medição dos dados de velocidade de vento são:

- Distribuição Normal ou Gaussiana;
- Distribuição Normal bi-variável;
- Distribuição de Weibull;
- Distribuição Exponencial;
- Distribuição de Rayleigh.

Porém, na busca de uma única distribuição que melhor retratasse a velocidade dos ventos, foi constatado que a distribuição de Weibull melhor representa o comportamento do vento, visto que, a Weibull incorpora a distribuição exponencial (k=1), a distribuição de Rayleigh (k=2) e tem uma boa aproximação da Gaussina com k =3,5. Onde a distribuição de probabilidade de Weibull é dada por (8):

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right]$$
(8)

Os parâmetros forma (k) e de escala (c) são determinados por (9) e (10), respectivamente.

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \tag{9}$$

$$c = \bar{v} \left( 0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{\frac{-1}{k}} \tag{10}$$

Onde,  $\overline{v}$  é a velocidade média da série de vento e  $\sigma_{v}$  o desvio padrão da velocidade do vento.

# B. Análise de Tendência

Ao se analisar uma série de dados, além de gráficos, tabelas e cálculo de medidas de posição e dispersão, é importante verificar o movimento ao longo do tempo, ou seja, a tendência das observações.

A tendência pode ser determinada pelo método das variações percentuais, ou seja, a divisão de um valor observado no período atual (n) pelo seu valor no período anterior (n-1). Assim, verifica-se a ocorrência da taxa de crescimento ou decrescimento do valor observado, sendo esta a sua tendência que poderá ser aplicada para estimar o período futuro (n+1).

Neste artigo será analisado a tendência dos dados de velocidade de vento no período futuro para as diferentes localidades em estudo.

# C. Método de Correlação

Métodos de correlação são empregados quando deseja-se avaliar a relação entre medidas quantitativas. Neste artigo, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson para avaliar a complementaridade das séries de velocidade de vento vazão d'água.

O coeficiente de Pearson (ρ) mede o grau da direção entre duas variáveis, ou seja:

- $\rho = 1$ , correlação é perfeitamente positiva entre as duas variáveis;
- $\rho$  = -1, correlação é perfeitamente negativa entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui;
- ρ = 0, significa que as duas variáveis não dependem uma da outra, ou seja, não existe associação linear.

O coeficiente de Pearson é determinado por (11):

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$
(11)

Ou seja,

$$\rho = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X).var(Y)}}$$
(12)

Onde,  $\overline{*}$  i e  $\overline{*}$  são os valores medidos de ambas as variáveis, e  $\overline{*}$  e  $\overline{*}$  as médias aritméticas para ambas as variáveis.

A Tabela II abaixo apresenta a interpretação do coeficiente de Pearson [23].

TABELA II Interpretação do Coeficiente de Correlação de Pearson

Valor de ρ (+ ou - ) Interpretação

Correlação bem fraca
Correlação fraca
Correlação moderada
Correlação forte
Correlação muito forte

# VI. ESTUDO DE CASO

Em virtude da sazonalidade dos regimes pluviométricos e a localização geográfica do Brasil, acredita-se na existência de um reforço sazonal de geração por parte das usinas eólica no país.

Em estudos realizados por Amarante et. al. (2001) [7] e Witzler (2015) [6], foi avaliada a complementaridade sazonal hidro-eólica das regiões Nordeste e Sul do Brasil, através de séries históricas de vento e precipitação. Ambos comprovaram que a região Nordeste apresenta correlação negativa entre vento e precipitação, ou seja, nos períodos de baixa intensidade pluviométrica aumenta a velocidade dos ventos. Já na região Sul, a complementaridade é positiva, ou seja, no período chuvoso a velocidade dos ventos se intensifica, mas isto não deixa de ser vantajoso, pois o período de máximo pluviométrico registrado para a região Sul é o mesmo do mínimo registrado da região Sudeste, sendo esta região com maior capacidade de armazenamento hidráulico e também com a maior demanda de energia do SIN. Desta forma, a região sul exporta energia para a região sudeste para o atendimento da sua demanda, bem como, auxilia na redução do deplecionamento dos reservatórios do Sudeste.

0 objetivo deste trabalho é avaliar se a complementaridade hidro-eólica avaliada nas séries históricas permanece válida para o período futuro, bem como, a sua intensidade, em decorrência do efeito das mudanças climáticas para as regiões Nordeste e Sul do Brasil. Para as séries históricas de vento utilizou-se o histórico do modelo VORTEX, e para a vazão d'água os dados medidos pelo ONS. As séries futuras foram construídas através dos dados dos modelos climáticos. Antes de fazer a análise de complementaridade, foi necessário fazer uma análise estatística das séries futuras de velocidade de vento resultante dos modelos climáticos. O objetivo foi verificar a aderência entre o histórico e futuro para cada localidade das eólicas avaliadas, identificando a necessidade de correção de viés e validando as séries que serão utilizadas.

Primeiramente, analisou-se a correlação entre as eólicas selecionadas para este artigo, para ambos modelos climatológicos, de acordo com a Fig. 4. Observa-se que para as localidades selecionadas, as eólicas da região Nordeste possuem forte correlação entre si, assim como as da região Sul também são fortemente correlacionadas entre si. Além disso, algumas usinas do Sul, como Coxilha Negra possui correlação com algumas EOL do Nordeste, como Amontada - CE, Aracati - CE e Morro do Chapéu -BA.

Para simplificar estas análises e facilitar a apresentação dos resultados, foram selecionados três pontos na região Nordeste e uma na região Sul: Amontada - CE, Morro do Chapéu - BA, Currais Novos - RN e Coxilha Negra - RS.

Além disso, devido às semelhanças observadas nas séries de vento do período futuro para os dois modelos climáticos, ETA-HadGEMs-ES 8.5 e ETA-MIROC5 8.5, nas análises apresentadas a seguir o período futuro será representado apenas pelas séries de velocidade de vento do modelo ETA-HadGEMs-ES 8.5.

A Fig. 5 apresenta os histogramas das séries de velocidade de vento, das eólicas selecionadas, para o período histórico e futuro. Observa-se, que a distribuição de frequências do futuro é correspondente com a do histórico para Amontada - CE, visto que, o intervalo de velocidade de vento com maior predominância no período futuro é o mesmo do histórico. Já para Morro do Chapéu - BA e Coxilha Negra - RS as maiores intensidades da velocidade de vento foram observadas em velocidades acima da verificada no período histórico, e Currais Novos - RN apresentou a maior frequência em velocidades abaixo do observado no período histórico. Pelo histograma observa-se que as séries de velocidade de vento tendem a seguir a distribuição de probabilidade Weibull como já mencionado na seção V.

Continuando a análise estatística das séries, a Fig. 6 mostra a função de autocorrelação para os dados históricos e futuro. A função de autocorrelação dá informações sobre a dependência temporal da série, ou seja, o quanto a informação em períodos passados é relevante para a observação no presente. O eixo x corresponde ao lag (defasagem), e o eixo y ao valor da correlação que varia de -1 a 1. Quando a correlação ultrapassa a linha pontilhada azul significa que aquele lag é relevante e significativamente correlacionado com o último valor, correlacionado com o último valor, positivamente ou negativamente. Observa-se em todos os gráficos que a ACF alterna de sinal e não decai exponencialmente identificando a possível presença de não estacionaridade e sazonalidade na série que parece se repetir a cada 12 meses. A exceção é a EOL Morro do Chapéu que apresenta um comportamento diferenciado dos dados históricos e parece não ter uma dependência temporal forte. Já nos dados futuros, a dependência se assemelha as demais eólicas. Portanto, acredita-se que seja uma falha no histórico que cobre apenas um curto período de tempo que não foi suficiente para gerar uma boa representação da série.

Para melhor avaliar a sazonalidade e verificar a existência de tendências no comportamento das séries temporais de velocidade de vento considera-se uma decomposição aditiva em três componentes explicativos: tendência, sazonalidade e termo aleatório. A tendência se refere à trajetória na qual a série parece se desenvolver ao longo de um intervalo de tempo, podendo ser de aumento, diminuição ou estacionária. A sazonalidade se refere ao fenômeno que se repete a cada período idêntico de tempo. O termo aleatório corresponde às variações adicionais que não podem ser explicadas pela tendência ou sazonalidade. A Fig. 7 apresenta os resultados obtidos para as séries temporais das eólicas considerando as séries futuras. Observa-se que parece não haver tendência nas séries futuras e que a sazonalidade apresenta um padrão "bem comportado" no tempo.

Para confirmar os resultados da decomposição das séries foi utilizado o teste de Mann Kendall sazonal. Os resultados do

teste mostram uma tendência de aumento na velocidade do vento apenas para a EOL Amontada no estado do Ceará, enquanto que para as demais localidades os resultados apontam para estacionariedade nas séries.

Terminado o processo de validação das séries futuras de velocidade do vento, foi feita a análise complementariedade entre as eólicas e algumas hidrelétricas nas proximidades. Para avaliar a correlação das séries de velocidade de vento e vazão d'água, no período histórico e futuro, aplicou-se o método de correlação de Pearson (apresentado no Capítulo V). Para fins didáticos, optou-se por dividir a série de vento futuro em três períodos, sendo estes: Futuro 1 (2011-2041), Futuro 2 (2041-2070) e Futuro 3 (2071-2099) que também foram utilizados em [19]. As Figs. 8 e 9 apresentam os resultados obtidos para séries futuras dos modelos ETA-HadGEMs-ES 8.5 e ETA-MIROC5 8.5, respectivamente, e também para a série histórica que é igual para ambas as figuras.

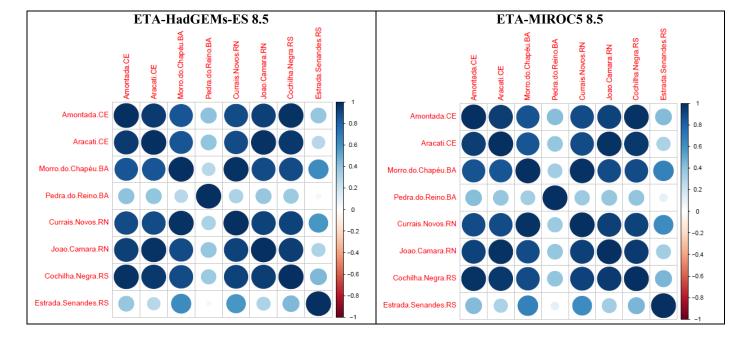
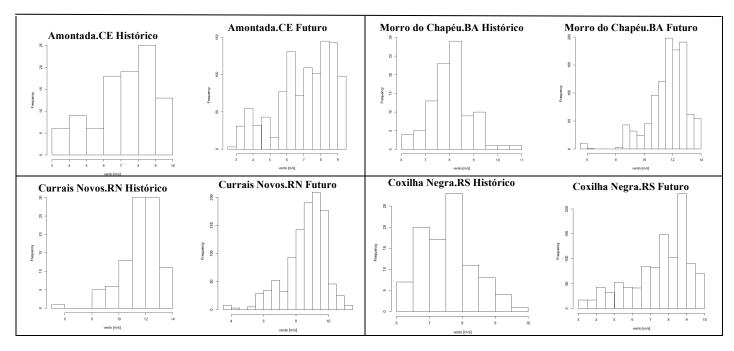


Fig.4. Análise de Correlação Eólica



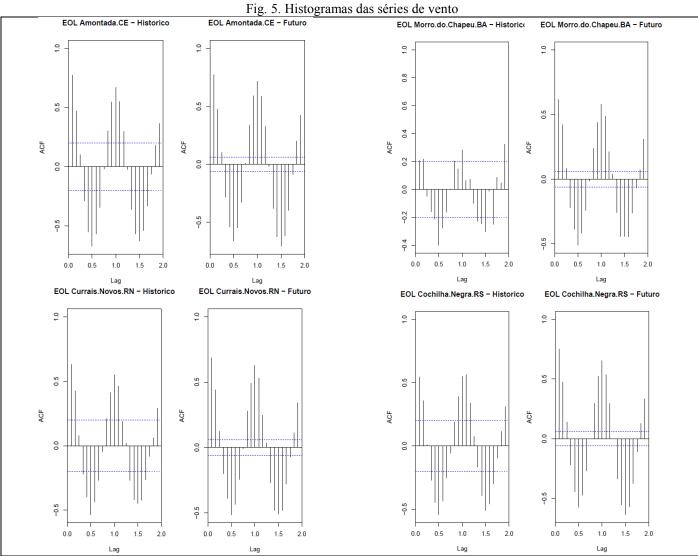
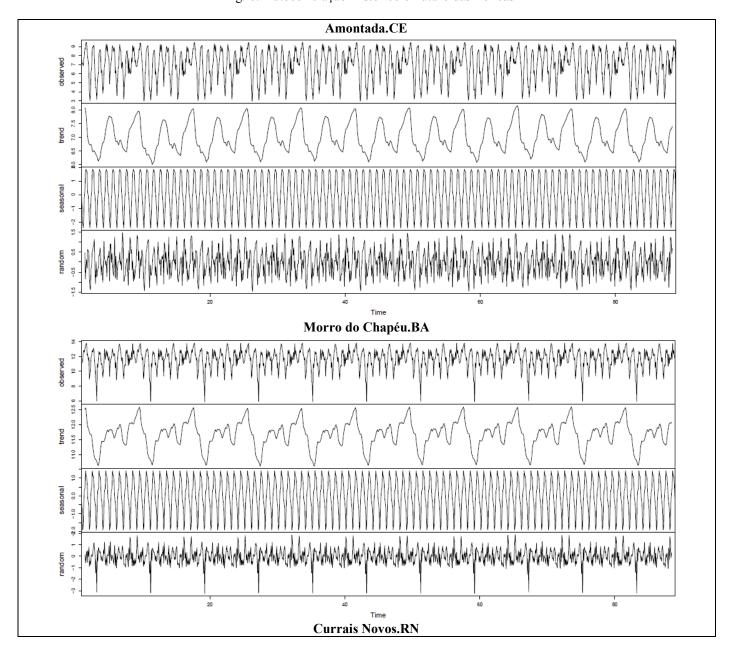


Fig. 6. Autocorrelação Histórico e Futuro das Eólicas



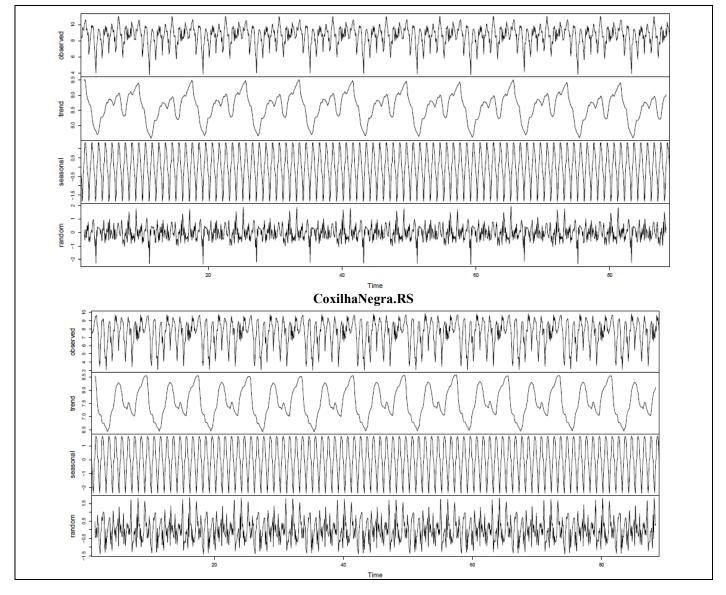


Fig. 7. Tendência das séries temporais

Quando comparamos as séries futuras dos modelos, o modelo ETA-MIROC5 8.5 exibe grau de correlação negativa maior que o verificado nas séries ETA-HadGEMs-ES 8.5 para a região Nordeste. Já, para a região sul ambos os modelos convergem para uma fraca correlação positiva entre as séries de vento e vazão.

Cabe ressaltar que, devido ao curto período histórico, a correlação entre as séries de vento e vazão d'água neste período pode ter sido super dimensionada. Isto pode causar más interpretações quando deseja-se planejar o parque gerador futuro, pois a redução da correlação no período futuro pode impactar no uso de mais usinas térmicas para o atendimento da demanda.

A Fig. 10 apresenta a série histórica e os períodos futuros,o modelo ETA MIROC5 8.5, da eólica Amontada-CE (linha vermelha) e da UHE Complexo Paulo Afonso - NE (linha azul). Primeiramente, observou-se um certo ciclo na vazão da UHE nos períodos futuros, onde em uma pequena parte do tempo verifica-se vazões elevadas e depois passa a declinar, permanecendo a maior parte da série temporal com vazões abaixo de 5000 m³/s. Já a velocidade do vento apresenta variações sazonais dentro do ano, porém sem alterações da sua velocidade média no futuro. Também, é possível verificar pela Fig. 9 a existência da complementaridade entre as fontes em todos os períodos, onde os picos vazões apresentam declínio da velocidade do vento.

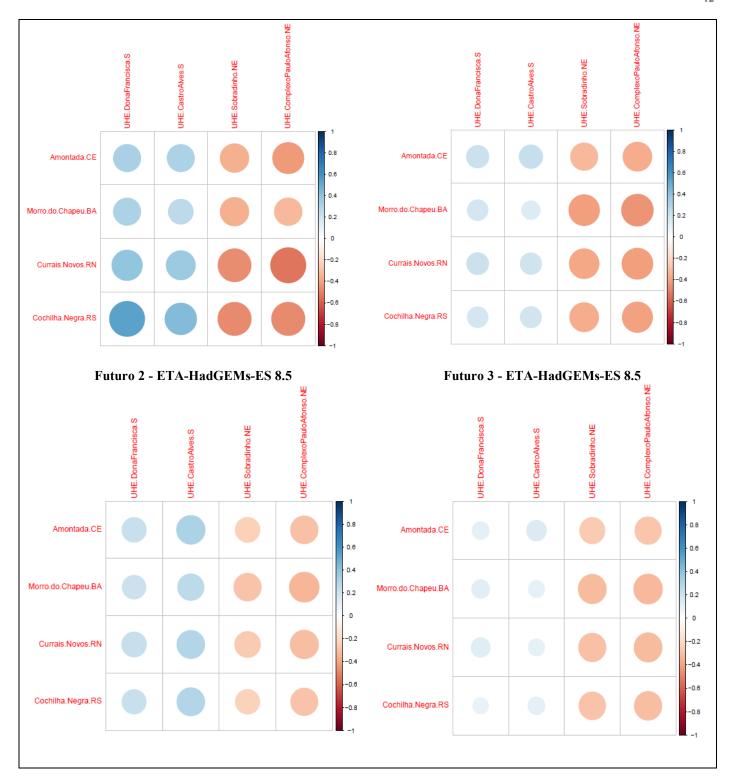


Fig. 8. Análise de Complementaridade hidro-eólica no longo prazo - Modelo ETA-HadGEMs-ES 8.5

Histórico Futuro 1 - ETA-MIROC5 8.5

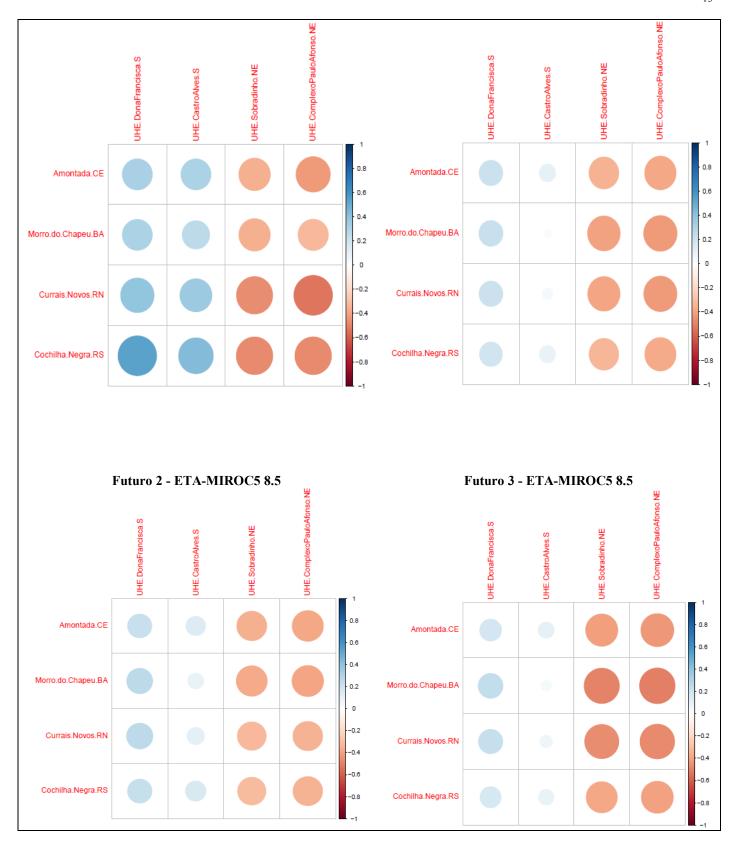


Fig. 9. Análise de Complementaridade hidro-eólica no longo prazo - Modelo ETA-MIROC5 8.5

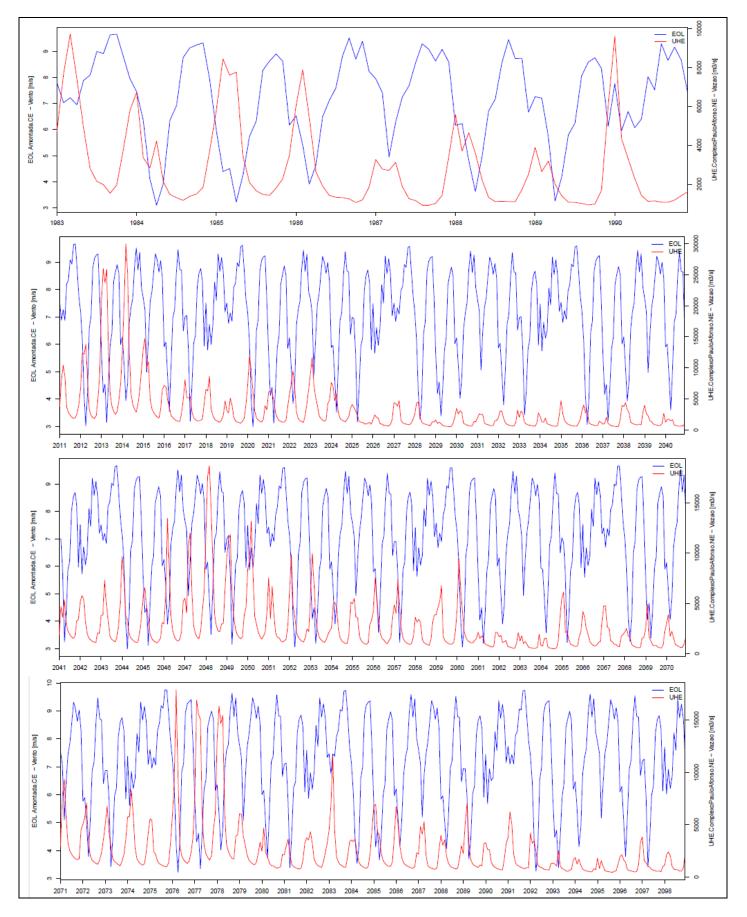


Fig. 10. Série de Vento e Vazão - Amontada - CE e UHE Complexo Paulo Afonso - NE, modelo ETA MIROC5 85

## VII. CONCLUSÃO

As mudanças climáticas já são uma realidade e as evidências fazem parte do nosso dia-a-dia, com ameaças à infraestrutura de cidades, diminuição da produtividade nas lavouras, alterações nos níveis dos oceanos e também, no caso brasileiro, risco de déficit de energia por indisponibilidade dos recursos hídricos.

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar uma possível situação futura dos recursos hídricos e eólicos para geração de energia no Brasil, com cenários de aquecimento global, averiguando se os registros da existência ou não da complementaridade entre as fontes hídricas e eólica registradas historicamente são factíveis para o futuro.

Foi observada a permanência da correlação negativa entre eólicas e hidrelétricas no Nordeste do Brasil, mesmo com menor intensidade. A geração de energia através de fontes eólicas torna-se fundamental para o atendimento da demanda de energia desta região, principalmente em situações como atualmente vivenciadas, onde os reservatórios hídricos do Nordeste apresentam a pior situação registrada na história. Este fato tornou a geração de energia pelas hidrelétricas do Nordeste menos expressivas. Assim, o aumento da velocidade dos ventos em épocas de baixas afluências, além de auxiliar no atendimento da carga, reduz o custo da geração elétrica, da diminuição do acionamento de termoelétricas que possuem custo variável unitário (cvu) elevado.

A região sul apresentou o enfraquecimento da correlação positiva, entre as fontes hídricas e eólicas, para os períodos futuros, mas mesmo assim manteve seu comportamento de agregador de geração, que faz com que o parque gerador desta região auxilie no atendimento da demanda das demais regiões do Brasil, assumindo um papel de exportador de energia no período de altas afluências e alta velocidade de vento.

A diminuição da correlação vento-chuva implica na necessidade de complementação térmica por exemplo na região Nordeste. Esta necessidade implica em custos de expansão mais elevados. No caso da região Sul, a diminuição da correlação positiva pode representar uma melhor distribuição dos recursos minimizando a necessidade de capacidade adicional na interligação Sul-Sudeste.

## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Marengo, C. A. Nobre, S. C. Chou, J. Tomasella, G. Sampaio, L. M. Alves, G. O. Obregón, W. R. Soares, R. Betts and G. Kay. (2011, May) "Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil," Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, BR. Available: http://www.ccst.inpe.br/wpcontent/uploads/relatorio/Mudancas Climáticas no Brasil relatorio.pdf
- [2] MME, "Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
  PROINFA," 2009. Available: http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/
- [3] ANEEL, "Resolução Normativa n° 482," 2012. Available http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf
- [4] ANEEL, "Capacidade de Geração do Brasil," 2017. Available: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil. cfm
- [5] MME, "Energia Eólica no Brasil e no Mundo," 2014. Available: https://goo.gl/mxBSwN

- [6] L. Witzler, "Metodologia para reconstrução de séries históricas de vento e geração eólica visando a análise da complementaridade energética no Sistema Interligado Nacional," Master's dissertation, Dept. Energy and Automation Eng., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.
- [7] O. A. C. do Amarante, D. J. Schultz, R. M. Bittencourt and N. A. Rocha, "Wind / Hydro Complementary Seasonal Regimes in Brazil," DEWI Magazin, vol. 19, pp. 79-86, Aug. 2001.
- [8] Instituto Acende Brasil (2017). O setor elétrico brasileiro no contexto das mudanças climáticas e do Acordo de Paris. White Paper, São Paulo, 24 p. Available: https://goo.gl/Xv6QUe
- [9] J. W. Marangon Lima, W. Colischonn and J. A. Marengo, "Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica," Ed. Hunter Books, 2014, pp 23-145.
- [10] S. C. Chou, A. Lyra, C. Mourão, C. Dereczynski, I. Pilotto, J. Gomes, J. Bustamante, P. Tavares, A. Silva, D. Rodrigues, D. Campos, D. Chagas, G. Sueiro, G. Siqueira, P. Nobre, J. Marengo (2014). Evaluation of the ETA Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, vol. 3, pp. 438-454. Available: http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039
- [11] IPCC, "Climate Change,"2014. Available: https://goo.gl/tCtMfA
- [12] D. P V. Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomsonm, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith and S. K. Rose, "The representative concentration pathways: an overview," *Climate Change*, vol. 109, pp. 5-31, 2011.
- [13] EPE, "Caracterização do Recurso Eólico e Resultados Preliminares de sua Aplicação no Sistema Elétrico," 2013. Available: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos %20de%20Energia/20130925\_1.pdf
- [14] R. D. S. Custódio, "Energia eólica para produção de energia elétrica," 2nd ed., Ed. SYNERGIA, 2013.
- [15] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis "Atmospheric Chemistry and Physics -From Air Pollution to Climate Chande," Ed. John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [16] B. Lange, S. Larsen, J. Hojstrup and R. Barthelmie, "Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 92, pp. 959-988, 2014.
- [17] A. R. Queiroz, L. M. M. Lima, J. W. L, Marangon, B. C. Silva and L. A. Scianni, "Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system," Renawable Energy, vol. 99, pp. 379-389, 2016.
- [18] R. C. D. Paiva, W. Collischonn and D. C. Buarque, "Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon," Hydrilogical Processes, vol. 27, pp. 333-346, 2012.
- [19] A. L. Scianni, "Avaliação premilinar do efeito das mudanças climáticas na geração de energia elétrica," Master's dissertation, Dept. Electrical Eng., Universidade Federal de Itajubá - MG, 2014.
- [20] M. T. Nóbrega, C. E. M. Tucci and A. R. Paz, "Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brasil," Hydrology and Earth System Sciences, vol. 15, pp.585-595, 2011.
- [21] J. M. Bravo, W. Collischonn, A. R. Paz, D. Allasia and F. Domecq, "Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin," Climatic Change, vol. 127, pp. 27-41, 2014.
- [22] ONS, "Séries Históricas de Vazões," 2017. Available: http://www.ons.org.br/operacao/vazoes\_naturais.aspx
- [23] K. Pearson, "Mathematical contributions to the theory of evolution. VII. On the correlation of characters not quantitatively measurable," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 1–47, 1900.