



**Estudo da Complementaridade dos Recursos Hídrico
e Eólico na Região Vale do Submédio São Francisco**
Study of the Complementarity of Water and Wind Resources in
the Region Vale of the Submédio São Francisco

Fabricyo Villa Verde Silva & Claudemiro de Lima Júnior

*Universidade de Pernambuco, Laboratório de Física e Energias Renováveis, Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Tecnologia Ambiental, Rodovia BR 203, km 02 - s/n - Cidade Universitária, 56328-900, Petrolina, PE, Brasil.*

E-mails: fabricyo.villa@gmail.com; claudemiro.lima@upe.br

Recebido em: 17/09/2020 Aprovado em: 09/11/2020

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_451_459

Resumo

No Nordeste do Brasil, mais especificamente o Vale do Submédio São Francisco é uma região bastante afetada nos períodos de estiagem, onde o déficit de energia gerado pelas hidrelétricas é frequente. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o papel da fonte eólica como recurso energético complementar à fonte hidrelétrica convencional na região. Por meio dos índices de complementaridade, foi estimada a relação entre tais recursos em determinado espaço e período de tempo para o caso em estudo. O período analisado apresentou índices de complementaridade significativos, sugerindo uma relação energética considerável entre os recursos, verificando-se a potencialidade da complementaridade hídrico-eólica como alternativa que possa contribuir positivamente na geração de energia elétrica para a região.

Palavras-chave: *Desenvolvimento Sustentável; Metodologia de Estudo; Energia Eólica*

Abstract

In the Northeast of Brazil, more specifically, the Sub-São Francisco Valley is a very affected region during periods of drought, where the energy deficit generated by hydroelectric dams is frequent. Thus, this work had the objective of evaluating the role of the wind power source as a complementary energy resource to the conventional hydroelectric source in the region. Through the complementarity indexes, it was estimated the relation between these resources in a certain space and period of time for the case under study. The period analyzed presented significant complementarity indexes, suggesting a considerable energy relation between the resources, verified the potentiality of water-wind complementarity as an alternative that contributes positively to the generation of electric energy for the region.

Keywords: *Sustainable Development; Study Methodology; Wind Energy*

1 Introdução

O homem durante toda a sua história evolutiva sempre procurou se adaptar ao meio ambiente, atendendo as suas necessidades. Com o passar dos séculos, esse processo evolutivo foi acelerado de tal forma que, em muitos pontos, passou a exigir cada vez mais da natureza. Desde os primórdios da sociedade, a presença do recurso energético sempre foi crucial para seu desenvolvimento, necessária para a organização e a manutenção das atividades essenciais a sobrevivência.

Com o advento das tecnologias, aprimorou-se a forma de utilizar a energia como fonte de eletricidade e nesse processo de industrialização, os países que mais se destacaram, contavam fundamentalmente com fontes não renováveis de energia, dentre elas, o petróleo e seus derivados. À medida que a demanda por energia crescia, houve também o aumento da exploração desses recursos, antecipando a escassez do petróleo no cenário internacional, além dos problemas de ordem ambiental ocasionadas pela queima desses combustíveis fósseis (Costa & Prates, 2005). Dentre os quais, a emissão agravante de dióxido de carbono (CO₂) é o mais preocupante, devido a sua ação intensificadora do efeito estufa, aumentando irregularmente as temperaturas médias do planeta, afetando drasticamente os ecossistemas.

Diante esse cenário energético, surge a necessidade de se reduzir o consumo de combustíveis fósseis e a emissão de gases poluentes, buscando-se formas alternativas e sustentáveis de produção de energia elétrica, de maneira que resultem em mínimo impacto ao meio ambiente. Segundo Sachs (2007), independentemente dos custos econômicos, a sociedade deve promover, com máxima urgência, uma política rigorosa de redução do consumo das energias fósseis para evitar mudanças climáticas deletérias e irreversíveis, causadas pela emissão excessiva de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, a obtenção de energia através dos ventos, dos rios, da biomassa, dentre outras formas “limpas” é a atitude necessária para atender as próprias necessidades, sem prejudicar a vida no planeta. Comumente, atribui-se a expressão “desenvolvimento sustentável” a questões relacionadas à salvaguarda das gerações futuras, com a finalidade única de garantir-lhes a perpetuação de recurso e as condições favoráveis de sobrevivência, segundo medidas ecologicamente corretas, economicamente viáveis e socialmente justas (Hammes *et al.*, 2002). As fontes renováveis de energia se tornaram uma alternativa tecnológica para a obtenção de energia elétrica. Segundo Fajardo (2003), “pensar globalmente, agir localmente”, significa que todas as coisas e fenômenos estão ligados entre si e dependem uns dos outros. Dessa maneira, o planejamento da matriz energética tendo como participação principal as fontes renováveis, usufrui dos recursos disponíveis pela natureza, sem afeta-la prejudicialmente.

O Brasil possui uma matriz energética considerada limpa, pois cerca de 70% da energia elétrica consumida é gerada por hidrelétricas, cada vez mais, outras formas de aproveitamento sustentável para geração de energia também vem ganhando espaço. Dentre elas, a energia eólica que aproveita a energia cinética fornecida pelos ventos para produção de energia elétrica. Além de oferecer uma forte complementaridade aos regimes de geração hidrelétrica, o potencial eólico no nordeste do Brasil é considerado bom, com áreas que apresentam médias anuais de vento de até 11 m/s (Pereira *et al.*, 2017).

Historicamente, são realizadas pesquisas voltadas ao estudo tanto do aproveitamento sustentável dessas fontes renováveis para obtenção de energia, como da complementaridade entre elas em sistemas energéticos híbridos. No Brasil, Pimenta & Assireu (2015) apresentaram estudos de cenários viáveis de inserção de usinas eólicas no sistema elétrico, com potencial comprovado por meio de medições específicas, também são apresentadas evidências da complementaridade sazonal entre os regimes hídricos e eólicos.

Tais estudos são baseados em metodologias específicas que, por meio de medições espaciais e temporais dos ciclos naturais dos recursos (vazão dos afluentes, velocidades das massas de ar, intensidade solar), avaliam a complementaridade entre as fontes energéticas em determinadas regiões e períodos de tempo. Eifler Neto *et al.* (2014), por meio de indicadores denominados índices de complementaridade, analisou as disponibilidades hídrica e eólica na Região Nordeste do Brasil. Outro caso, utilizando da mesma metodologia, foi estudado por Beluco *et al.* (2008) que estabeleceu as bases técnicas para o dimensionamento de aproveitamentos hidrelétricos e fotovoltaicos no estado do Rio Grande do Sul, propondo metodologias para a investigação da complementaridade entre duas fontes energéticas em termos temporais e espaciais.

Nessa perspectiva, segundo Custódio (2009), o Brasil busca, permanentemente, diversificar sua matriz energética, contemplando o crescente uso das energias renováveis que além de aproveitar os recursos locais, também contribuem para a redução dos efeitos do aquecimento global. Além do mais, é notável a abundância de recursos naturais no país, dentre os quais, os recursos hídricos para hidroeletricidade, o recurso solar para energia solar, como também os ventos para a energia eólica.

Entre as fontes de energia da matriz brasileira, a principal papel cabe à hidrelétrica. (Custódio, 2009), segundo dados divulgados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), por meio do plano de operação energética, a energia gerada pelos mananciais corresponde a aproximadamente 79% da matriz elétrica do país (Eifler Neto *et al.*, 2014). Os regimes hidrológicos naturais possuem caráter estocástico com flutuações sazonais de amplitude significativa. Em outras palavras, principalmente na Região

Nordeste do país, os períodos de estiagem estão afetando drasticamente o nível hídrico da bacia, diminuindo assim a produção de energia hidroelétrica.

Após seca severa nos últimos quatro anos (2011-2015), a barragem de Sobradinho, principal usina hidrelétrica na região Vale do Submédio São Francisco, chegou ao seu volume morto com menos de 5% de sua capacidade de armazenagem em outubro de 2015, comprometendo a produção de energia hidroelétrica. Diante essa consequência direta, termelétricas são acionadas, como a que funciona em Petrolina (PE) abastecendo as cidades circunvizinhas (Siqueira Filho *et al.*, 2015). Por mais eficiente que essa central termelétrica (CTE) seja, segundo dados da Companhia Energética de Petrolina (CEP), tendo uma capacidade de geração em cerca de 136 MW, seus impactos ambientais são notáveis. Dentre os principais, por funcionar a base de recursos não renováveis de energia, como o petróleo e seus derivados, as emissões de poluentes gasosos na atmosfera são constantes.

Como alternativa ecológica viável e sustentável, a complementação por meio da energia eólica, surge para reduzir tais impactos danosos ao meio ambiente, como também contornar esse déficit de energia nos períodos de estiagem. Uma observação importante é que as maiores incidências de vento na Região Nordeste coincidem com o período em que a vazão das águas do rio São Francisco é mínima, favorecendo dessa forma a interligação das hidrelétricas com usinas eólicas (Gorayeb & Brannstrom, 2016). Além disso, a complementação com a energia eólica apresenta-se como uma alternativa não somente atrativa do ponto de vista ambiental, mas também econômica, em razão de se tratar de uma fonte inesgotável.

Ainda mais, pode oferecer, conforme a região, estabilidade sazonal no aproveitamento energético através da complementaridade entre os regimes naturais eólico e hídrico (Traldi, 2018). Para comprovar essa complementação, o índice de complementaridade tem a função de expressar o grau de complementaridade entre duas fontes de energia (Jurasz *et al.*, 2020), e inclui a avaliação de três componentes: a defasagem entre os valores de disponibilidade de energia das duas fontes, a relação entre os dois valores médios e a relação entre as amplitudes de variação das funções.

Essa metodologia permite, com boa aproximação, estimar o comportamento conjunto dessas fontes no fornecimento energético para determinada região e intervalo de tempo. Este trabalho aborda a questão da complementaridade entre fontes de energia, envolvendo as disponibilidades de energia hídrica e eólica. Considerando-a uma grande oportunidade quando se leva em conta sua capacidade de contornar o déficit energético hídrico nos períodos de estiagem, além de não ser tão impactante ao meio ambiente como as termelétricas.

Nesse contexto, um sistema de produção energética nesse formato requer um planejamento integrado dos recursos de energia, abrangendo o conhecimento sistematizado da disponibilidade das fontes existentes, em termos espaciais e temporais. Para tanto, o trabalho teve como objetivo, realizar um estudo sobre o desempenho dos recursos hídrico e eólico na Região Nordeste do Brasil, mais especificamente na região Vale do Submédio São Francisco. Utilizando-se dos índices de complementaridade para avaliar o papel dessas fontes renováveis como recursos energéticos promissores para a região, analisando estatisticamente a relação energética entre elas.

2 Metodologia e Dados

O estudo da complementaridade hídrico-eólica na região Vale do Submédio São Francisco foi fundamentado em séries de dados de vazão naturalizada do Rio São Francisco e nas velocidades dos ventos na região em estudo. Além disso, teve como base algumas revisões bibliográficas, principalmente os trabalhos que envolvem os índices de complementaridade como metodologia para analisar a relação energética entre tais recursos, como os estudos realizados por Eifler Neto *et al.* (2014) e Beluco *et al.* (2008).

Para a caracterização do vento na região, em geral são necessários no mínimo de 3 a 5 anos de dados para se obter parâmetros estatísticos confiáveis (Feitosa *et al.*, 2002). Assim, foram utilizados os dados comportamentais hídricos-eólicos na região no período entre 2007 e 2010. Tal intervalo foi selecionado por carência de dados mais atuais e confiáveis das velocidades dos ventos disponibilizados gratuitamente. Assim, foi possível analisar o comportamento cíclico natural desse vento, além de estimar, através dos índices de complementaridade, suas contribuições energéticas para a região. Nessa perspectiva, o mesmo tratamento foi aplicado aos dados das vazões do rio São Francisco na região de estudo.

A Bacia do Rio São Francisco, estimada em 639.237 km², por sua grande dimensão territorial foi dividida por regiões, para fins de planejamento e para facilitar a localização das suas muitas e diversas populações e ambiências naturais. Essa divisão se fez de acordo com o sentido do curso do rio e com a variação de altitudes. Sendo a região Vale do Submédio São Francisco, a segunda maior da bacia, com uma extensão de 155.637 km². Localiza-se depois de Remanso, onde o rio inflexiona o seu curso para o leste, constituindo-se na divisa natural entre os estados da Bahia e de Pernambuco, até alcançar o limite com Alagoas (CBHSF, 2017).

Por meio de consultas em sites governamentais obtiveram-se os dados necessários para a realização da pesquisa. Os dados hidrológicos da Usina de Sobradinho –

BA, de latitude de -9.431176° e longitude de -40.827604° , foram obtidos no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que disponibiliza séries históricas de vazões naturalizadas diárias e mensais. Considerando-se a vazão observada no local e as informações relativas às ações antrópicas na bacia, entre 1931 e 2015. A vazão naturalizada considera a vazão correspondente que ocorreria em uma seção de rio se não houvesse ação antrópica na área de drenagem contribuinte da seção, incluindo elementos de balanço hídrico (Capozzoli, *et al.*, 2017).

Os dados de velocidade de vento foram obtidos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) que dispõe de uma base de dados dos recursos de energia solar e eólica para algumas regiões no Brasil. Para Petrolina-PE, tais valores estão disponíveis até o ano de 2010. Os dados foram registrados na torre anemométrica do INPE com coordenadas (-9.068900° , -40.319700°), obtidos em séries organizadas, com médias a cada dez minutos e, posteriormente, calcularam-se as médias diárias e mensais.

Os dados das vazões do rio e das velocidades dos ventos foram organizados na mesma periodicidade, possibilitando a análise e normalização dos dados para ambas as fontes de energia. Para tanto, foram calculadas médias mensais para os doze meses do ano, abrangendo os dados disponibilizados para ambas as fontes no intervalo de 2007 a 2010 e normalizados conforme a Equação 1 (Jurasz *et al.*, 2020).

$$In = \frac{X - X_{min}}{X_{máx} - X_{min}} \quad (1)$$

No qual In é o índice normalizado para cada um dos doze meses, X é a média do mês em questão, X_{min} é o valor médio mensal mínimo e $X_{máx}$ é o valor médio mensal máximo. A obtenção desses dados mensais normalizados para ambas as fontes ao longo dos doze meses de cada ano proporcionou condições adequadas para a análise gráfica do comportamento e disponibilidade dos recursos.

Com o intuito de comparar o desempenho desses recursos em termos de geração de energia, como também estimar o quanto são complementares na região, calcularam-se os índices de complementaridade entre as disponibilidades hídrica e eólica ao longo da região do Vale do Submédio São Francisco. Basicamente, esse método consiste no cálculo de três índices de complementaridade parciais e um índice total que os relaciona, sendo necessário os dados normalizados obtidos em todo o intervalo de tempo, diminuindo a incerteza do resultado, na medida em que são eliminados eventos que estejam fora da tendência sistemática.

Dentre os índices parciais, o índice de complementaridade no tempo (Jurasz *et al.*, 2020), It , é definido pela Equação 2 e avalia o intervalo de tempo entre os valores máximos das disponibilidades das duas fontes de energia.

$$It = \frac{|dh - de|}{\sqrt{|Dh - dh| |De - de|}} \quad (2)$$

Sendo Dh e dh os números dos meses que correspondem aos valores máximos e mínimos, respectivamente, de disponibilidade de energia hidráulica ao longo do ano; De e de , por sua vez, correspondem aos números dos meses de valor máximo e mínimo, respectivamente, de disponibilidade de energia eólica em um intervalo anual.

A Equação 3 define o índice de complementaridade de energia, Ie , que avalia a relação entre as médias dos valores de disponibilidade energética (Jurasz *et al.*, 2020). Com Eh e Ee representando, respectivamente, o total da energia hidráulica e eólica ao longo de um ano.

$$Ie = 1 - \sqrt{\left(\frac{Eh - Ee}{Eh + Ee}\right)^2} \quad (3)$$

O índice de complementaridade entre amplitudes, Ia , é expresso pela Equação 4 e avalia a relação entre os valores máximos e mínimos de disponibilidade das duas fontes de energia (Jurasz *et al.*, 2020).

$$Ia = \left\{ \begin{array}{l} \left[1 - \frac{(\delta h - \delta e)^2}{(1 - \delta e)^2} \right], \text{ for } \delta h \leq \delta e \\ \left[\frac{(1 - \delta e)^2}{(1 - \delta e)^2 + (\delta h - \delta e)^2} \right], \text{ for } \delta h \geq \delta e \end{array} \right\} \quad (4)$$

Os valores de Δ (δ) correspondem a uma manipulação envolvendo os valores máximos e mínimos de disponibilidade de energia. Tais diferenças são obtidas a partir da Equação 5, em que $Ed_{máx}$ e Ed_{min} representam, respectivamente, os valores máximo e mínimo de disponibilidade mensal de energia e Ed_m o valor médio mensal de energia (Jurasz *et al.*, 2020).

$$\delta = 1 + \frac{Ed_{máx} - Ed_{min}}{Ed_m} \quad (5)$$

O valor de δe não sofre tanta variação, nunca sendo inferior a um. O valor de δh pode apresentar uma grande variação, em função da disponibilidade hídrica no local de aproveitamento e da capacidade instalada do gerador hidrelétrico. No entanto, pelo modo como foi definido, δh nunca será inferior a um, valor correspondente a uma situação em que o gerador hidrelétrico operaria com vazão constante, com um tempo de recorrência muito baixo ou uma frequência muito alta. (Jurasz *et al.*, 2020)

Após o cálculo desses índices parciais, lembrando que todas as equações apresentadas são manipulações matemáticas que utilizam os dados normalizados de cada ano. Em outras palavras, cada equação foi aplicada quatro vezes, compreendendo todo o intervalo de 2007 a 2010. Da mesma forma, por meio do índice de complementaridade total, Equação 6, obtiveram-se resultados que representam estatisticamente o comportamento mais geral dos recursos hídrico e eólico como recursos complementares na região de estudo. O índice de complementaridade foi calculado conforme a Equação 6 (Jurasz *et al.*, 2020).

$$I = It.Ie.Ia \quad (6)$$

Onde It é o índice parcial de complementaridade no tempo, Ie é o índice parcial que descreve a complementaridade entre os valores médios de disponibilidade de energia e Ia é o índice parcial de complementaridade entre as amplitudes de variação das disponibilidades de energia entre as fontes.

Por meio desses índices de complementaridade tornou-se possível estimar e analisar a relação energética entre os recursos hídrico e eólico, como também, através de um levantamento sazonal do fluxo hídrico, pode-se relacionar os períodos de estiagem com os períodos em que os ventos circundantes na região são mais intensos. Desse modo, para relacionar tais períodos utilizaram-se os dados normalizados pela Equação 1 e manipularam-se graficamente tais valores. Para cada ano do intervalo, gerou-se curvas que representavam o comportamento de ambos os recursos na região. Posteriormente, comparou-se com a Figura 1, onde são apresentadas duas fontes consideradas perfeitamente complementares ao longo de um ano.

No estudo da complementaridade de duas fontes energéticas, nesse caso os recursos hídrico e eólico, quando há características de fontes perfeitamente ideais, devem apresentar o mesmo comportamento ilustrado na Figura 1. Quando não há complementaridade ideal, segundo Jurasz *et al.* (2020), torna-se necessário por meio de índices matemáticos adimensionais, índices de complementaridade, estudar o quanto essas duas fontes se aproximam da situação mostrada na Figura 1.

Na Figura 1, as curvas apresentadas possuem períodos iguais a 1 ano, os valores médios das disponibilidades são

iguais a 1, os valores mínimos de disponibilidade são iguais a 0,8 e os valores máximos são iguais a 1,2. Analisando a primeira curva, percebe-se que o valor mínimo de disponibilidade está situado no mês de setembro (0,75 ano), enquanto que esse mesmo valor na segunda curva está no mês de março (0,25 ano). Dessa forma, a complementaridade entre essas duas curvas pode ser caracterizada como perfeita na medida em que os valores mínimos estão defasados entre si de um intervalo igual à metade de um ano (0,5 ano), quando a diferença entre os valores máximos e mínimos de disponibilidade são iguais em ambas as curvas, no caso apresentado é igual a 0,4 e quando os respectivos valores médios são iguais entre si (Jurasz *et al.*, 2020).

3 Resultados

A partir dos gráficos que relacionam as séries das velocidades do vento com as séries das vazões do rio para cada ano do intervalo de 2007 a 2010 tornou-se possível estudar o quanto expressiva seria a contribuição energética, além de, por meio desses valores normalizados, visualizar o comportamento temporal do sistema híbrido e compará-los com a Figura 2, onde é representando um caso de complementaridade ideal.

Como pode ser observado na Figura 2, à medida que ocorre um declínio da curva dos valores médios das vazões do rio, quase simultaneamente ocorre o crescimento da curva das velocidades médias dos ventos predominantes na região. Sendo possível também, relacionar esses períodos com os baixos índices pluviométricos na região (Juárez *et al.*, 2014). Os intervalos de máxima e mínima disponibilidade energética de ambos os recursos se correspondem durante todo o intervalo. Por exemplo, para o ano de 2008, enquanto o pico máximo do recurso eólico está no mês de setembro, nesse mesmo mês encontra-se o pico mínimo do recurso hídrico. Podem-se observar sistemas complementares com contribuição positiva da fonte eólica para o sistema elétrico, principalmente durante o período de baixas vazões do rio São Francisco no trecho de Sobradinho, que limita a geração pela fonte hídrica.

A princípio, esses índices mensais adimensionais mostram-se significativos para o dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hídrica e eólica. Na Figura 2 as duas funções apresentadas podem representar as disponibilidades de duas fontes, ou as potências disponibilizadas por dois geradores, ou ainda as energias diárias disponibilizadas pelos dois tipos de geradores. Além disso, nota-se um padrão no comportamento nas curvas, além da complementaridade temporal, existe a estabilidade dos ventos durante os anos, gerando benefícios ao aproveitamento do recurso na região.

Analisando a complementaridade para o ano de 2008 na Figura 2, percebe-se que ambas as curvas apresentam

Estudo da Complementaridade dos Recursos Hídrico e Eólico na Região Vale do Submédio São Francisco
 Fabricio Villa Verde Silva & Claudemiro de Lima Júnior

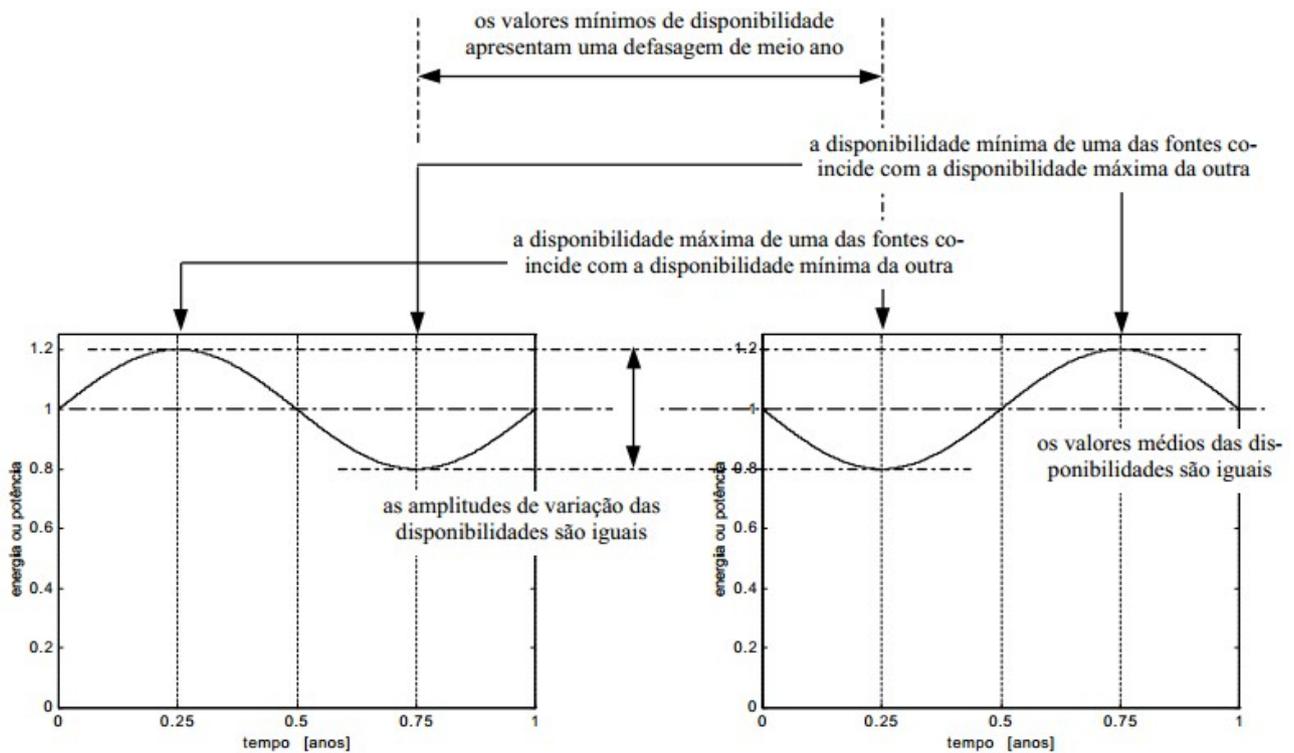


Figura 1 Características Comportamentais de Fontes Perfeitamente Ideais. Fonte: Jurasz *et al.*, 2020.

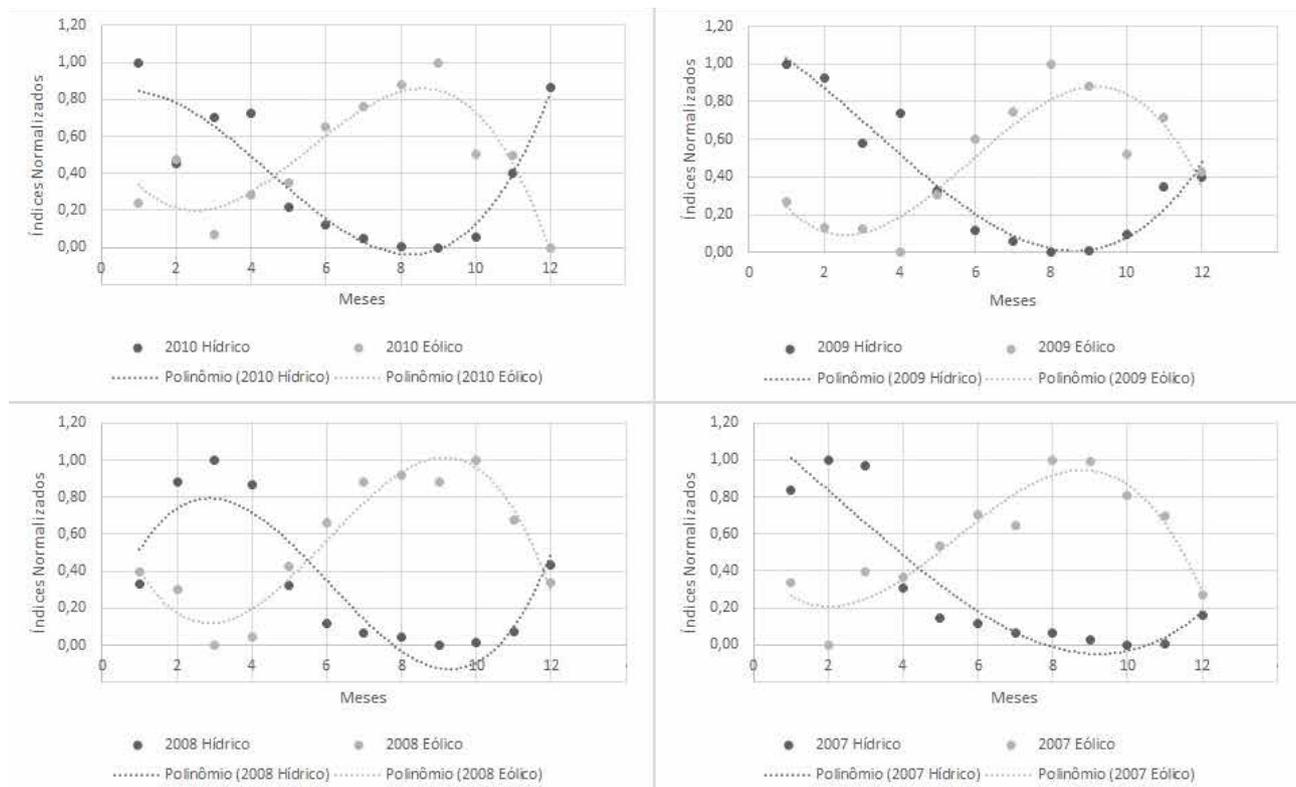


Figura 2 Gráficos da Complementaridade Temporal dos Recursos Hídrico e Eólico no Intervalo de 2007 a 2010.

períodos também iguais a 1 ano, valores médios das disponibilidades em torno de 0,4. Enquanto que, para os valores mínimos de disponibilidade o da função hídrica é de 0,0 e o da função eólica é em torno 0,2; já para os valores máximos o da função hídrica é de 0,8 e o da função eólica é de 1,0.

Pelo gráfico, localiza-se os valores mínimos da função hídrica no mês de setembro (0,75 ano) e o da função eólica no mês de março (0,25 ano). Desse modo, a complementaridade entre essas duas curvas aproxima-se bastante do comportamento perfeito, apresentado na Figura 1, na medida em que os valores mínimos estão defasados entre si de um intervalo igual à metade de um ano (0,5 ano), a diferença entre os valores máximos e mínimos de disponibilidade são aproximadamente iguais em ambas as curvas, em torno de 0,8 e os respectivos valores médios são iguais entre si.

Para melhor quantificar, com bastante aproximação, o grau de complementaridade entre as duas fontes de energia, possibilitando o estudo do comportamento desses recursos em sistemas híbridos de energia, utilizou-se o método que se baseia na avaliação dos índices de complementaridade apresentados na metodologia.

Depois dos cálculos dos índices mensais normalizados pela Equação 1 para cada ano no intervalo de 2007 até 2010, por meio da Equação 2, obtiveram-se os índices de complementaridade no tempo, no qual se esse intervalo é exatamente a metade do período, o índice será igual a um. Se o intervalo for nulo, isto é, se os valores de disponibilidade máxima coincidem, o índice será igual zero. No caso apresentado, percebe-se que nos anos de 2008 e 2007 os valores são bastante próximos de um, já nos anos de 2010 e 2009 há uma pequena defasagem dos valores em torno de um, como apresentado na Tabela 1. Em geral, os recursos apresentam disponibilidades energéticas complementares e estáveis ao longo do intervalo estudado na região.

Posteriormente, por meio da Equação 3 foram obtidos os índices de complementaridade de energia. Se esses valores médios forem iguais, o índice será igual a um. Conforme sejam diferentes, o índice deve se afastar da unidade, tendendo a zero (Jurasz *et al.*, 2020). Para o intervalo selecionado, os valores obtidos são intermediários e bem próximos de um.

Após o cálculo para encontrar os valores de *Delta* para ambos os recursos em cada ano do intervalo selecionado, utilizando-se da Equação 5, selecionou-se a equação característica ao intervalo de *Delta* de acordo com a Equação 4. Obtendo-se os resultados para o índice de complementaridade entre amplitudes, sendo iguais as diferenças, o índice é igual a um. Caso contrário, o índice varia conforme os valores de *Delta*.

Caso uma das fontes de energia não seja disponível ao longo do período de interesse, torna-se inviável a consideração das fontes como complementares. Se as duas fontes têm a mesma diferença entre os valores máximo e mínimo de disponibilidade, são idealmente complementares e o indicador deve ser igual a um. Nos casos intermediários, em que as diferenças são desiguais, o índice deve ser expresso por valores entre zero e um, indicativos de uma complementaridade menor que a ideal (Eifler Neto *et al.*, 2014).

Para o caso apresentando, no ano de 2010 e 2009 os valores são bem próximos de um, enquanto que nos anos de 2008 e 2007 os valores se afastam consideravelmente do valor ideal. Sabe-se que a vazão do rio depende de outros fatores, considerando os valores desse índice, dentro de certos limites, obtém-se uma avaliação razoável.

Obtidos os índices de complementaridade no tempo, de energias e entre amplitudes. Calculou-se o índice de complementaridade por meio da Equação 6 que relaciona todas essas medições, que é a pura relação dos comportamentos naturais dos recursos hídrico e eólico na região para o intervalo selecionado. Segundo Jurasz *et al.* (2020), com esses índices adimensionais, os quais devem assumir por definição valores no intervalo de zero a um, torna-se possível avaliar o afastamento da condição ideal de complementaridade mostrada na Figura 1.

A partir da análise realizada com os dados da vazão naturalizada hidrológica da usina de Sobradinho - BA e dados anemométricos de uma torre do INPE localizada no município de Petrolina - PE, ambos inseridos na região do Submédio do São Francisco, na Tabela 1, observa-se que no intervalo de 2007 a 2010, cerca de 75% apresentaram valores maiores que 0,50 e apenas 25% apresentaram valores inferiores para o índice de complementaridade, (*I*) mostrando que existe uma considerável potencialidade no uso simultâneo dos recursos hídrico e eólico. Nos resultados obtidos por Eifler Neto *et al.* (2014) para o mesmo eixo de pesquisa na região Nordeste, foi observado que aproximadamente 70% dos pontos analisados apresentaram valores maiores que 0,60 para o índice de complementaridade (*I*) e que em torno de 58% tem, para esse parâmetro, valores superiores a 0,70. Comparando os resultados, percebe-se que os valores obtidos nessa pesquisa se aproximam dos valores citados anteriormente, indicando a relevante potencialidade na complementaridade entre as disponibilidades de energia hídrica e eólica no Nordeste do país, surgindo como alternativa que possa contribuir positivamente na geração de energia elétrica na região.

O gráfico apresentado na Figura 3, apresenta os índices normalizados para o ano de 2010, comparando-os com os valores da demanda energética para a Região Nordeste nesse mesmo ano, sugerindo o comportamento de

um sistema híbrido a partir dos recursos hídrico e eólico para o fornecimento energético. É possível inferir que o recurso eólico é complementar também à demanda energética. No primeiro semestre do ano. A demanda energética poderia ser atendida mais facilmente pela fonte principal (hídrica), enquanto, no segundo semestre do ano, o fornecimento energético seria mais facilmente realizado pelo recurso eólico, sendo bastante significativa a participação desse recurso na demanda energética para a região.

4 Conclusões

Avaliando-se o papel das fontes renováveis eólica e hídrica como recursos energéticos complementares para a região, percebe-se o quanto a integração da operação de

usinas de origens hidráulicas e eólicas tendem a otimizar o uso dos reservatórios hídricos e adicionar estabilidade sazonal ao sistema elétrico interligado, reduzindo a emissão de gases causadores do efeito estufa, advindos do acionamento das termelétricas nos períodos de estiagem na região.

A metodologia usada, por meio dos cálculos dos índices de complementaridade, permite verificar que os melhores índices foram estimados nos anos finais do intervalo selecionado, sugerindo investigações mais atuais e frequentes sobre o comportamento desses recursos, acompanhando e prevendo uma maior inserção das energias renováveis no Sistema Elétrico Nacional.

Simulações computacionais e estudos experimentais permitirão a avaliação e justificativa de um estudo mais

Ano	Índice de Complementaridade do Tempo (<i>I_t</i>)	Índice de Complementaridade de Energia (<i>I_e</i>)	Índice de Complementaridade entre Amplitudes (<i>I_a</i>)	Índice de Complementaridade (<i>I</i>)
2010	0,61	0,89	0,94	0,51
2009	0,76	0,89	0,94	0,64
2008	0,93	0,78	0,76	0,55
2007	0,98	0,71	0,6	0,41

Tabela 1 Valores Obtidos para os Índices de Complementaridade

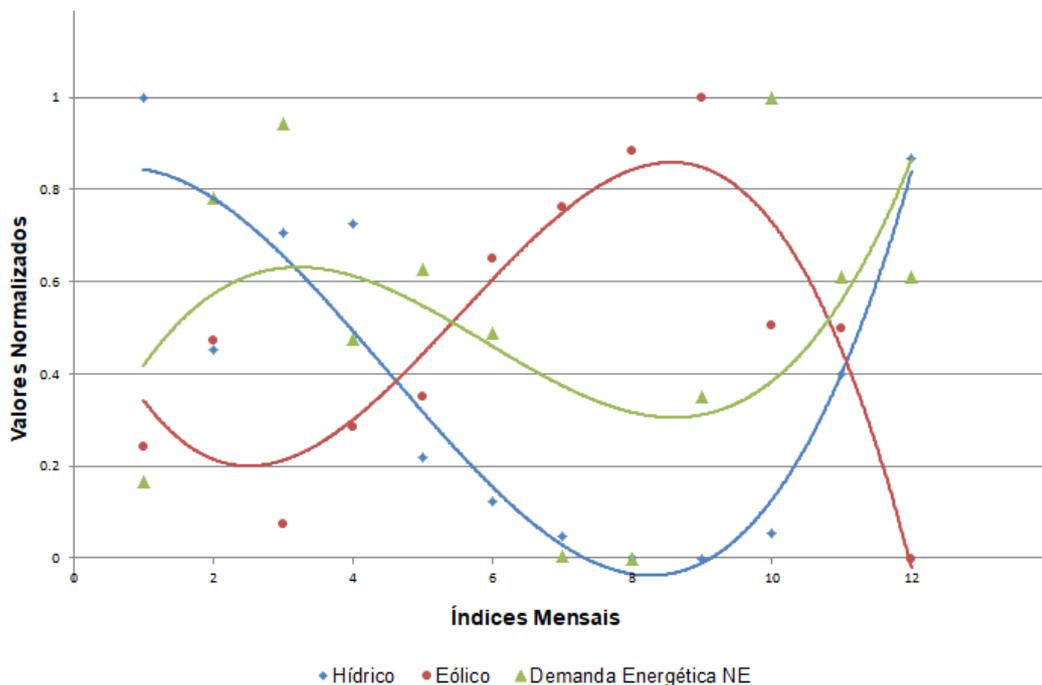


Figura 3 Comportamento Energético dos Recursos e Demanda Energética na Região Nordeste, a Partir dos Dados Normalizados.

amplo e completo para caracterização da complementaridade de recursos energéticos disponíveis. Para uma melhor sistematização da metodologia, como dos resultados obtidos em termos de tempo e espaço, torna-se necessário a disponibilidade de dados hídricos e eólicos confiáveis e atuais em outros trechos da Bacia do Rio São Francisco, como de um número maior de estações de monitoramento das velocidades dos ventos. Essas informações servirão como importante ferramenta e base de dados para as futuras tomadas de decisões para o planejamento energético da região.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do estado de Pernambuco – FACEPE, pela concessão da bolsa de iniciação científica (BIC-2496-1.05/16). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco.

6 Referências

- Beluco, A.; Souza, P. K. & Krenzing, A. 2008. A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies. *Renewable Energy*, 33: 2157-2165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.019>.
- Capozzoli, C.R.; Cardoso, A.O. & Ferraz, S. 2017. Padrões de Variabilidade de Vazão de Rios nas Principais Bacias Brasileiras e Associação com Índices Climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32 (2): 243-254. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863220006>.
- CBHSF, 2017. A Bacia. Disponível em: < <http://cbhsaofrancisco.org.br/2017/a-bacia/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.
- Costa, R.C. & Prates, C.P.T. 2005. O Papel das Fontes Renováveis de Energia no Desenvolvimento do Setor Energético e Barreiras à sua Penetração no Mercado. *BNDES Setorial*, 21: 5-30. URI: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2436>.
- Custódio, R.S. 2009. *Energia Eólica – Para Produção de Energia Eólica*. Rio de Janeiro, Eletrobrás, 280 p.
- Eifler Neto, E.; Alfonso, R. & Beluco, A. 2014. Complementarity in Time between Wind and Water Resources in Northeastern Brazil. *International Journal of Environmental Engineering and Natural Resources*, 1: 13-18. DOI: 10.5935/2333-9241.20140001.
- Fajardo, E. 2003. *Ecologia e cidadania: se cada um fizer sua parte*. Rio de Janeiro, Senac Nacional, 156 p.
- Feitosa, E.A.N.; Pereira, A.L.; Veleda, D.A.; Silva, G. & Caheté, C. 2002. *Panorama do Potencial Eólico do Brasil – Centro Brasileiro de Energia Eólica*. Recife, Centro de Tecnologia e Geociências – UFPE, 110 p.
- Gorayeb, A. & Brannstrom, C. 2016. Caminhos para uma gestão participativa dos recursos energéticos de matriz renovável (parques eólicos) no nordeste do Brasil. *Mercator (Fortaleza)*, 15 (1): 101-115. DOI: <https://doi.org/10.4215/RM2016.1501.0008>.
- Hammes, V.S.; Calegario, F.F.; Teixeira, R.F. & Arzabe, C. 2002. Construção da proposta pedagógica. In: Educação Ambiental para o desenvolvimento sustentável, Brasília, EMBRAPA, p. 19-36. (Série educação ambiental para o desenvolvimento sustentável).
- Juárez, A.A.; Araújo, A.M.; Janardan, S.R. & Oyama, D.Q.O.F. 2014. Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 828-834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.086>.
- Jurasz, J.; Canales, F.A.; Kies, A.; Guezgouz, M. & Beluco, A. 2020. A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, 195: 703-724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>.
- Pereira, E.B.; Martins, F.R.; Gonçalves, A.R.; Costa, R.S.; Lima, F.J.L.; Rüther, R.R.; Abreu, S.L.; Tiepolo, G.M.; Pereira, S.V. & Souza, J.G. 2017. *Atlas brasileiro de energia solar*. São José dos Campos, INPE, 52 p.
- Pimenta, F.M. & Assireu, A.T. 2015. Simulating reservoir storage for a wind-hydro hybrid system. *Renewable Energy*, 76: 757-767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.047>.
- Sachs, I. 2007. A revolução energética do século XXI. *Estudos Avançados*, 21 (59): 21-38. URI: <http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10204>.
- Siqueira Filho, J.A.; Campelo, M.J.A.; Nunes, E.B.; Bezerra, T.T.; Santos, D.F.; Almeida, E.D.S. & Oliveira, L.M.S.R. 2015. O Caos da Biodiversidade do Rio São Francisco e a Inércia da Sociedade Brasileira. *Revista de Desenvolvimento Econômico*, 18: 276-289. DOI: 10.21452/rde.v17nesp.4008.
- Traldi, M. 2018. As transformações socioespaciais resultantes da implantação e operação de parques eólicos no semiárido brasileiro. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 22: 1-34. DOI: <https://doi.org/10.1344/sn2018.22.19729>.