

**PRISCILLA SALES DOS ANJOS**

**CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS DA  
VELOCIDADE DO VENTO E RADIAÇÃO SOLAR EM  
FERNANDO DE NORONHA, BRASIL.**

**RECIFE-PE – ABRIL/2013.**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS DA  
VELOCIDADE DO VENTO E RADIAÇÃO SOLAR EM  
FERNANDO DE NORONHA, BRASIL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre.

**Área de Concentração:** Biometria e estatística aplicada

**Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tatijana Stošić**  
**Co-orientador: Prof. Dr. Borko Stošić**

**RECIFE-PE – ABRIL/2013.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS DA**  
**VELOCIDADE DO VENTO E RADIAÇÃO SOLAR EM**  
**FERNANDO DE NORONHA, BRASIL.**

PRISCILLA SALES DOS ANJOS

Dissertação julgada adequada para  
obtenção do título de mestre em Biometria  
e Estatística Aplicada, defendida e  
aprovada por unanimidade em 02/04/2013  
pela Comissão Examinadora.

Orientadora:

---

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Tatijana Stošic  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Banca Examinadora:

---

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Tatijana Stošic  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

---

Prof. Dr. Borko Stošic  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

---

Prof. Dr. Pedro Hugo de Figueirêdo  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

---

Prof. Dr. Moacir Cunha Filho  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## Dedicatória

Aos meus pais Margareth Sales e Gerson Oliveira do Anjos. Aos meus sobrinhos Raíssa dos Anjos, Leonardo dos Anjos e Guilherme dos Anjos.

## Agradecimentos

Agradeço, sem exageros ou cegueiras religiosas, a Deus, mesmo nunca o tendo visto, sei que tudo que acontece em minha vida para me melhorar enquanto pessoa tem a sua interseção. Assim, todas as pessoas que me levaram até este grau de ensino, o mestrado, devem receber meus agradecimentos, minha consideração e respeito, pois foram agentes da maravilhosa energia Deus.

Agradeço a minha orientadora, Tatijana Stosic, que me auxiliou em todos os momentos que a procurei, incentivou à pesquisa, me estimulou nos momentos de desânimo e, acima de tudo me aconselhou em momentos difíceis. Tatijana Stosic, realmente é uma orientadora, excelente orientadora e, devo a ela a conclusão do mestrado.

Agradeço com tamanha alegria, aos meus amigos do mestrado, que talvez para toda vida, em especial para José Neto e Renata, que por afinidade nos tornamos como irmãos. Nós estudamos juntos, dividimos sorrisos, angústias, passeios e acima de tudo, compartilhamos a energia do bem estar, do respeito, da troca, do amor.

Por fim, agradeço aos que compartilharam dos meus dias mais íntimos, meus sobrinhos, que devolveram a minha vontade de sorrir, minha amiga-irmã Claudiane Nascimento, que está comigo em grandes momentos da minha vida, ao meu namorado-noivo-marido, o único homem sem correntes sanguíneas que amei e amo, que me incentivou a continuar meus estudos, que sabe do meu potencial, que admira minha vontade de buscar cada vez mais o conhecimento e compartilhar do mesmo, que acredita em mim sem por menores. Acima de todos, sem medo de machucar, agradeço os meus genitores, os meus pais, minha alma feminina e masculina, a minha vida, meus amores, meu tudo. Ao meu pai que em vida foi meu maior amor, meu rei, aquele que deixou o maior dos vazios quando se foi. A minha mãe, sinônimo de força, de proteção, de cuidado, de amor, que na falta do meu pai, recebe tudo de maravilhoso que eu conquistar nessa vida. Nada mais teria sentido se não fosse para fazê-la feliz. “Você minha mãe é a minha vida, e mesmo quando de mim uma vida brotar, tu serás a origem, o meu princípio, o meu sangue, a mulher da minha vida e, a ti devo tudo que sou e que eu conquistar.”

*“Obrigada minha velha, Margareth Sales dos Anjos, esse título é teu. Tu és mestre na arte de viver, tu és mestre na arte de proteger, tu és mestre sem qualquer estudo superior. Fizestes melhor, aprendestes a ser humilde e ensinar a humildade a mim, minha mãe. Te AMO.”*

“Ninguém pode construir em teu lugar  
as pontes que precisarás passar, para  
atravessar o rio da vida. Ninguém, exceto tu,  
só tu.”  
(Friedrich Nietzsche)

## Resumo

A utilização das energias solar e eólica desempenha um papel estratégico no esforço do Brasil ao desenvolvimento sustentável. A implementação de novas tecnologias mais eficientes para a conversão em energia solar e eólica, visa facilitar o fornecimento de energia em áreas remotas como em ilhas e na região amazônica, ajudando a reduzir o consumo de energia por combustível fóssil e, portanto, as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera. Os altos níveis de irradiação solar com pequena variação sazonal e regime de vento tornam as áreas costeiras do nordeste do Brasil, uma região com alto potencial para o desenvolvimento de programas que viabilizem o uso de dessas energias alternativas. O Arquipélago de Fernando de Noronha, considerado Parque Nacional Marinho, é localizado próximo a costa brasileira, no Oceano Atlântico, e pertence ao estado de Pernambuco, tem suas regras de preservação estabelecidas pelo Governo Federal e direcionadas ao uso sustentável dos habitantes. O fornecimento de energia é feito exclusivamente por uso de geradores a diesel, e há esforço contínuo no desenvolvimento de soluções tecnológicas eficientes para o abastecimento de energia a partir do vento e recursos solares. A avaliação do potencial de energia eólica requer uma análise estatística cuidadosa da velocidade média do vento e sua distribuição de frequência, entretanto, o maior desafio na integração de energia eólica na rede elétrica é a sua intermitência devido à variabilidade temporal e espacial de vento, em grande variedade de escalas. Como um processo natural de turbulência, o vento é a variável temporal mais complexa, com propriedades específicas como: correlações de longo alcance espacial e temporal e, dinâmica fractal e multifractal. A fim de contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica da velocidade do vento e radiação solar na ilha de Fernando de Noronha, neste trabalho investigamos as correlações de longo alcance em séries temporais dessas variáveis, registradas durante o período 2003-2011. Usamos o *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) método que foi projetado para detectar e quantificar correlações em longo prazo, em séries temporais não estacionárias. Os nossos resultados mostram que tanto a velocidade do vento quanto a radiação solar pertencem à classe dos processos estocásticos persistentes caracterizados por correlações de longo alcance. O valor

do expoente de escala mostrou-se maior para a velocidade do vento do que a radiação solar, indicando a persistência mais forte. Para complementar, foram feitas as comparações da variação temporal dos expoentes de escala para a radiação solar e vento, com aplicação do DFA em intervalos de três anos, concluindo que durante o período estudado o expoente de escala é mais estável para a radiação solar do que para a velocidade do vento. Os resultados deste trabalho fornecem novas informações sobre a velocidade do vento e da dinâmica da radiação solar em Fernando de Noronha e devem ser considerados na avaliação do potencial de energia renovável na ilha.

**Palavras-chave:** Detrended Fluctuation Analysis, Correlações de Longo Alcance, Velocidade do vento e radiação solar.

## Abstract

Solar and wind energy play a strategic role in Brazil's efforts for sustainable development. The implementation of new, more efficient technologies for solar and wind energy conversion will facilitate energy supply in remote areas, such as the Amazon region and islands, and help reduce greenhouse gas emissions to the atmosphere, by reducing the fossil fuel consumption. The high solar irradiation levels with small seasonal variation and wind regime make the coastal areas of northeastern Brazil highly valuable for alternative energy developing programs. Fernando de Noronha archipelago, located close to the Brazilian coast in the Atlantic Ocean, belongs to the state of Pernambuco, and there are preservation rules established by federal and state government with a purpose to preserve natural resources that can be achieved through sustainable development. However, the island energy supply currently comes mainly from diesel generators, and there is a continuous effort in developing efficient technological solutions for energy supply based on wind and solar resources. The evaluation of wind power potential requires careful statistical analysis of mean wind speed and its frequency distribution. However, the biggest challenge in integrating wind power into the electric grid is its intermittency due to temporal and spatial variability of wind in large range of scales. As a natural process of turbulence wind is the most complex weather variable with specific properties as long-range spatial and temporal correlations and fractal and multifractal dynamics. In order to contribute to better understanding of wind speed and solar radiation dynamics at the location of Fernando de Noronha island, in this work we investigate long-term correlations in temporal series of these variables recorded during the period 2003-2011. We use Detrended Fluctuation Analysis (DFA) method which was designed to detect and quantify long-term correlations in non stationary temporal series. Our results show that both wind speed and solar radiation belong to the class of persistence stochastic processes characterized by long-term correlations. The value of scaling exponent is higher for wind speed than for solar radiation, indicating stronger persistence. We also compare temporal variation of scaling exponents for wind and solar radiation by applying DFA on three-year intervals, and find that during the studied period the scaling exponent is more

stable for solar radiation than for wind speed. The results of this work provide new information about wind speed and solar radiation dynamics at the location of Fernando de Noronha island, and should be considered in evaluation of renewable energy potential.

**Keywords:** Detrended Fluctuation Analysis, long range correlation, Wind velocity and solar radiation.

## LISTA DE FIGURAS

1	Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais e as direções dos ventos próximos à superfície. Também são indicadas as latitudes típicas de baixas e altas pressões. Adaptado [36].....	25
2	Estrutura de uma célula fotovoltaica (a). Célula fotovoltaica de silício monocristalino (b).Célula de silício policristalino (c). Célula de silício amorfo (d). Adaptada [47].....	28
3	Mapa de Cantino, primeira carta cartográfica da América do Sul, escrita em 1502. Adaptada [48].....	29
4	Usina Termoelétrica Tubarão – CELPE, da Ilha de Fernando de Noronha. Arquivo pessoal.....	30
5	Primeira turbina eólica de Fernando de Noronha – PE (75 kW) (a). Arquivo do Memorial da Eletricidade. Segunda turbina eólica de Fernando de Noronha – PE (225kW) (b). Arquivo da ANEEL. Turbina eólica destruída por raio (c). Arquivo cedido pelo Ministério da Aeronáutica.....	31
6	Exemplos de formas fractais estocásticos e objetos autossimilares: (a) samambaia, (b) brócolis [49].....	32
7	Fractal curva de Koch, com dimensão de Hausdorff-Besicovitch [53].....	33
8	Exemplo de extração de uma fração da série temporal em vários níveis, com dois fatores de ampliação, um para frequência e outro para amplitude. Adaptado [25].....	35
9	Mapa das PSD instaladas no Brasil. Adaptada [20].....	43
10	Ilustração de aplicação do método DFA em séries temporais experimentais. Adaptada [25].....	46
11	Série temporal original de velocidade de vento a 10m, em m/s, dos dados coletados pela PCD de Fernando de Noronha.....	47

- 12 Série temporal original de radiação solar, em MJ/m<sup>2</sup>, dos dados coletados pela PCD de Fernando de Noronha..... 48
- 13 DFA1 da série original (preto),  $\alpha = 0,88$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,58$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais (linear - 1º grau) da velocidade do vento a 10m, em m/s em Fernando de Noronha-PE..... 50
- 14 DFA1 da série original (preto),  $\alpha = 0,7$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,5$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais (linear - 1º grau) da radiação acumulada diária em Fernando de Noronha-PE..... 50
- 15 DFA2 da série original (preto),  $\alpha = 0,86$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,53$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais da velocidade do vento a 10m, em m/s, em Fernando de Noronha-PE..... 51
- 16 DFA2 da série original (preto),  $\alpha = 0,71$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,50$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais da radiação acumulada diária em Fernando de Noronha-PE..... 51
- 17 Evolução temporal do expoente de autossimilaridade  $\alpha$ , das séries de velocidade do vento a 10 (preto) e radiação solar diária (vermelho), usando janelas (subséries) de tamanho 3 anos, deslocando-se 7 dias..... 53

## LISTA DE TABELAS

- 1 Medidas descritivas da velocidade do vento a 10 m, em m/s, e radiação solar acumulada ( $\text{MJ/m}^2$ ) diárias no período de janeiro/2003 a dezembro/2011. .... 49
- 2 Expoentes DFA para a velocidade do vento e radiação solar acumulada diária da série original ( $\alpha$ ) e randomizada ( $\alpha_r$ )..... 52

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	23
2.1 Clima .....	23
2.1.1 Vento .....	24
2.1.1.1 Energia Eólica .....	26
2.1.2 Radiação Solar .....	26
2.1.2.1 Energia Solar Fotovoltaica .....	27
2.2 Fernando de Noronha .....	28
2.3 Fractais .....	32
2.4 Análise de Correlações de Longo Alcance em Séries Temporais Fractais. ....	36
2.4.1 Séries Temporais Fractais Estacionárias .....	36
2.4.2 Métodos de análise de correlação de longo alcance em séries temporais fractais estacionárias. ....	36
2.4.2.1 Função de Autocorrelação .....	36
2.4.2.2 Análise Espectral .....	37
2.4.2.3 Análise de Hurst .....	38
2.4.2.4 Análise de Flutuação .....	40
2.4.3 Séries Temporais Fractais não Estacionárias .....	41
2.4.4 Métodos de análise de correlação de longo alcance em séries temporais fractais não estacionárias. ....	41
2.4.4.1 Detrended Moving Average (DMA) .....	41
2.4.4.2 Detrended Fluctuation Analysis (DFA) .....	42
<b>3. DADOS E METODOLOGIA</b> .....	43
3.1 Dados .....	43
3.2 Metodologia .....	44
3.2.1 Algoritmo Detrended Fluctuation Analysis (DFA) .....	44
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	47
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	54
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	56

# 1 INTRODUÇÃO

A importância das energias renováveis e o seu aproveitamento como fonte de geração de energia, aumenta progressivamente no atual cenário mundial de mudanças climáticas e crise energética, visto que, a qualidade de vida da sociedade pode estar intimamente relacionada com o uso de energia elétrica. Tais fontes de energia são apontadas como principal alternativa para atender as demandas da sociedade, com qualidade e possibilidade de redução aos danos ambientais decorrentes do consumo de energia. Entretanto, estudos sobre a viabilidade econômica, social e ambiental, necessitam ser realizados, a fim de torná-las mais viável economicamente e menos impactante ao ambiente, pois a geração de energias de fontes renováveis, mesmo consideradas limpas, pode implicar em alterações físicas ambientais.

O crescimento da demanda energética mundial em razão da melhoria dos padrões de vida nos países em desenvolvimento, traz a preocupação com alguns aspectos essenciais para a política e planejamento energético de todas as economias emergentes. Dentre eles, podemos citar a segurança no suprimento de energia necessária para o desenvolvimento social e econômico de um país e os custos ambientais para atender a esse aumento no consumo de energia [1]. Atualmente o suprimento está associado às perspectivas do possível esgotamento das reservas de petróleo nas próximas décadas [2,3].

O suprimento energético no Brasil está basicamente concentrado na geração de energia por hidrelétricas, que sofrem instabilidades nos períodos de estiagem sendo, portanto, uma opção passível de esgotamento em regiões que sofrem demasiada estiagem e também por uso de fontes de energia, ditas alternativas, como petróleo, óleo diesel, pertencentes ao mercado de combustíveis fósseis, que atualmente são afetadas por crises internacionais. Devido às instabilidades e as crises no mercado energético, pesquisas quanto ao uso de fontes de energias complementares ditas renováveis e limpas, como a geração de energia

oriunda do vento e da radiação solar, vêm recebendo maior incentivo governamental, para inserção na matriz energética do país.

As instabilidades climáticas podem interferir na produção das energias alternativas e renováveis, assim os estudos climáticos, quanto aos fatores de influência, elementos de composição e as alterações do clima, têm sido amplamente divulgados, tanto para entender a sua evolução, quanto o seu funcionamento, com o objetivo de prevenir desequilíbrios no ecossistema e auxiliar as pesquisas de desenvolvimento em diversas áreas, tais como agricultura [4], atividade marítima [5], estudos sobre incêndios florestais [6], geração de energia eólica [7], variabilidade da radiação solar [8]. Para pesquisas relacionadas ao potencial energético, os elementos climáticos, vento e radiação solar, recebem maior atenção por produzirem energia elétrica alternativa considerada limpa, a energia eólica e solar, respectivamente.

O Brasil tem altos níveis de radiação solar ao longo de todo o ano devido à sua localização na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) [9,10], podendo assim trazer grandes benefícios como uso da eletricidade. Sendo o principal elemento climático, a radiação solar, na qual a sua variabilidade e potencialidade funciona como um regulador e indicador das condições climáticas locais, auxiliando as pesquisas que envolvem a utilização de energia solar como energia elétrica sendo, portanto, uma fonte renovável. Investigações referentes à radiação solar enfrentam muitas limitações em função da baixa densidade de estações radiométricas sobre a região Nordeste do Brasil; esta situação tem incentivado alguns pesquisadores a adotarem modelos baseados em dados de satélites [11], a fim de suprimir a baixa densidade de estações actinógrafas sobre o Brasil.

Além dos benefícios oriundos da radiação solar, no Brasil a presença na ZCIT também influencia o regime de vento, que é causado pelo alto sistema de pressão equatorial vindo do oceano Atlântico que invade as áreas costeiras dos estados do Nordeste Brasileiro [12] e a produção de ventos alísios, caracterizados por serem úmidos e soprarem durante todo ano, torna essa região estimada para a utilização do vento no que tange a produção de energia elétrica. Vários estudos foram desenvolvidos no Brasil para fornecer dados confiáveis para a avaliação de vento e recursos de energia eólica. Um atlas de energia eólica para a o Território

brasileiro foi produzido pelo Centro Brasileiro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), usando modelos climáticos regionais [13].

O uso de fontes de energia solar e eólica trará vários benefícios ao país em longo prazo, sendo o principal, a produção de eletricidade em regiões remotas, como na Ilha Fernando de Noronha, na região nordeste do Brasil, na qual toda produção de energia da ilha é por meio alternativo com uso de geradores de energia a base de óleo diesel, um combustível poluente por emitir gases nocivos ao homem. Entretanto, a implementação para o uso das energias solar e eólica devem ser embasadas em pesquisas, físicas, estatísticas e ambientais, para o conhecimento das vantagens e desvantagens do uso das mesmas, a fim de comprovar a viabilidade econômica, social e ambiental da região a qual serão implementadas.

Para esta pesquisa serão usados métodos de física estatística em séries temporais de velocidade de ventos e radiação solar, com o objetivo de auxiliar estudos que envolvam a variabilidade e a disponibilidade da velocidade de vento e radiação solar na Ilha Fernando de Noronha, em Pernambuco/Brasil, detectando a existência de correlações de longo alcance no período pesquisado. Este entendimento, por sua vez, também possibilita o desenvolvimento dos modelos matemáticos e computacionais necessários aos estudos de vários fenômenos que incluam o vento e a radiação solar como parte do seu funcionamento. Vários fenômenos naturais têm como propriedade comum uma dinâmica caracterizada pela existência de correlações de longo alcance (a função de autocorrelação diminui seguindo uma lei de potência), tais como: fenômenos em fisiologia, clima e finanças [14-16]. Vários métodos já foram desenvolvidos para detectar esta propriedade em séries temporais, entre quais os mais usados são análise por Função de Autocorrelação [17], Análise de Hurst [18], e Análise Espectral [19].

A fim de detectar e quantificar as correlações de longo alcance em séries temporais de velocidade de vento e radiação solar, cujos dados históricos foram registrados pelas Plataformas de Coletas de Dados (PCD's) [20], na Ilha Fernando de Noronha, localizada em Pernambuco/Brasil, foi utilizado o método *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) [21-25], introduzido por Peng et al. em 1994 [26], com efeito em séries não estacionárias. Os resultados obtidos podem auxiliar na avaliação de um modelo de dinâmica do vento e radiação solar, desenvolvido para a

localidade onde os dados foram coletados. Um modelo matemático apropriado deve reproduzir todos os resultados das análises empíricas dos dados, para a posteriormente ser usado em estudos de fenômenos influenciados pela dinâmica do vento e radiação.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CLIMA

O clima é caracterizado por padrões observados durante alguns anos do comportamento de vários fenômenos climáticos como: precipitação, temperatura, vento, entre outros. A climatologia pode ser estudada do ponto de vista meteorológico e geográfico, os quais se complementam. Do ponto de vista geográfico, estuda a interação entre o ambiente e o homem. Do ponto de vista meteorológico, estuda a relação entre diferentes fenômenos climáticos [27].

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), os padrões da atmosfera que caracterizam o clima são observados pelos valores médios dos vários elementos climáticos num período de 30 anos, designando-se valor normal de um elemento climático, o valor médio correspondente a um número de anos suficientemente longo, para se admitir que ele represente o valor predominante daquele elemento no local considerado. No Brasil, o primeiro período padrão possível de ser calculado, foi o de 1931 a 1960.

Diante da variabilidade dos fenômenos climáticos, o clima pode sofrer variações em suas propriedades, características e peculiaridades, algumas condicionadas a ações antrópicas, com a produção do dióxido de carbono e quantidade de poeira atmosférica, e outras variações causadas por elementos e fatores climáticos, estes que correspondem a grandezas meteorológicas. Os principais elementos climáticos são: umidade, precipitação pluvial (chuva), vento, radiação, nebulosidade, pressão atmosférica, entre outros. Tais elementos são influenciados pelos fatores climáticos, como: latitude, altitude, relevo, massas de ar, vegetação, entre outros. De alguma forma, alguns elementos como radiação podem também ser ditos fatores climáticos, pois promovem variações nas condições climáticas.

Os fatores do clima trazem alterações por vezes bastante significativas, no clima local e/ou nos seus elementos e são descritos como aqueles que produzem alterações e interferências diretas e/ou indiretas nos elementos climáticos e nos tipos climáticos. Esses fatores afetam diretamente os elementos climáticos, e podem fazê-lo de maneira individual ou conjuntamente [28].

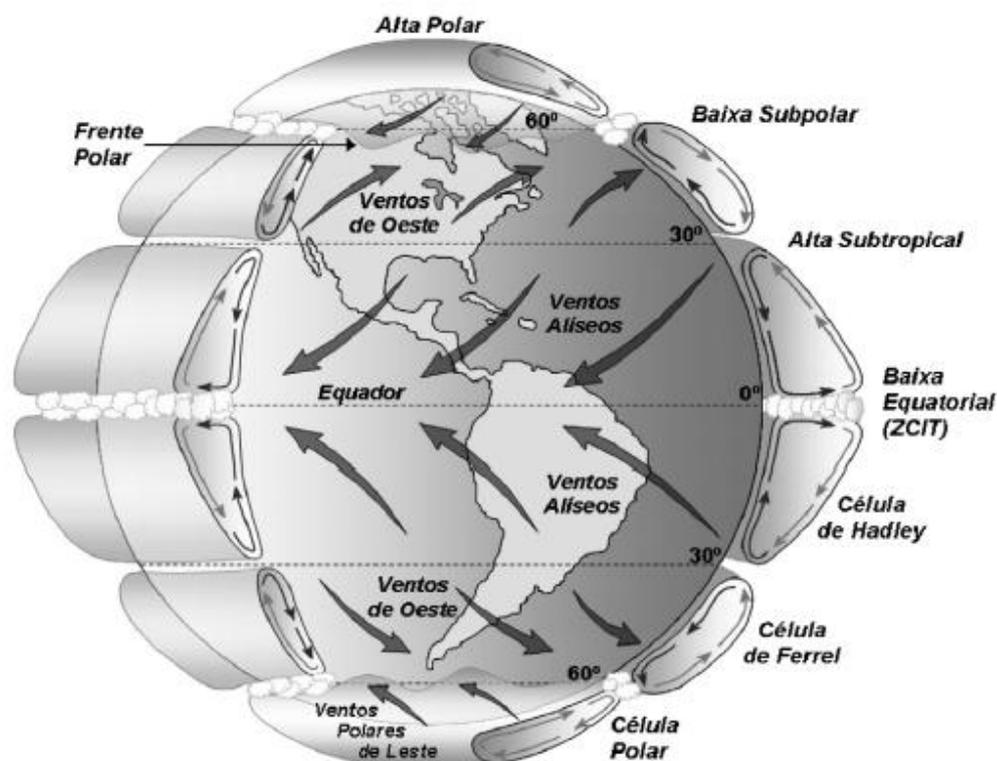
### 2.1.1 VENTO

Fenômeno meteorológico, o vento é resultado do deslocamento nas parcelas de ar das zonas atmosféricas de alta pressão para as zonas de baixa pressão e atua nas modificações das condições do tempo, sendo responsável pelo transporte de umidade e de energia na atmosfera.

Em conjunto com outras variáveis, como direção do vento, temperatura e pressão do ar atmosférico, tornam-se as variáveis mais importantes empregadas na descrição meteorológica da atmosfera terrestre [29]. Dessa forma, o vento pode contribuir positivamente e negativamente às condições atmosféricas. Entre os pontos positivos destaca-se a dispersão dos poluentes [30], o transporte de pólen [31] e de sementes [32] e, também a geração de energia quando convertida em outras formas de energia, como a elétrica [33]. Os efeitos negativos correspondem aos danos à vegetação e a propagação de doenças, em particular as bacterianas [34] e pode provocar grande destruição quando associado a eventos como furacões e tornados.

Vale ressaltar, que os pontos positivos da utilização do vento não se restringem à meteorologia. Historicamente, o desenvolvimento da navegação e o período das grandes descobertas de novos continentes foram propiciados em grande parte pelo emprego da energia dos ventos. Bem como a aplicação de tal energia na agricultura com a utilização de moinhos de vento para moagem de grãos e bombeamento da água [35].

Entretanto, as aplicações no setor energético merecem devidas atenções, tanto para às previsões do vento, recebendo dois enfoques principais: a estimativa dos ventos médios levando em conta dados climatológicos; e a previsão de vento para instantes futuros em curto e médio prazo [29], quanto para os estudos físicos de direção e velocidade do vento com relação à circulação global atmosférica que indicará a predominância de ventos em grandes escalas. Importante salientar que, as escalas de ventos dependem das modificações, a partir da incidência de radiação solar, ao longo do ano, das circulações atmosféricas e regiões de baixas e altas pressões, determinando os tipos de ventos e zona de convergência no hemisfério, Figura 1.



**Figura 1.** Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais e as direções dos ventos próximos à superfície. Também são indicadas as latitudes típicas de baixas e altas pressões. Adaptado [36].

Para tal pesquisa, a conceituação dos Ventos Alísios e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) são de suma importância, pois ambos estão relacionados com a região do estudo, o Nordeste do Brasil. Os ventos Alísios são úmidos, provocando chuva nos locais onde convergem, sopram durante todo o ano, proporcionam os fenômenos do El Niño e La Niña e são responsáveis pela distribuição da energia térmica recebida pela superfície terrestre. O seu deslocamento ocorre dos trópicos para o equador, distinguindo-se em alísios do sudeste (mais intensos) que sopram para o nordeste do hemisfério e os alísios do nordeste (menos intensos) que sopram para região sudeste. Na região Nordeste do país o seu deslocamento acontece por meio da ZCIT, zona onde os ventos alísios convergem, caracteriza-se por ser uma zona de convergência de ar úmido em superfície de formação de nuvens convectivas, um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuando nos trópicos e parte integrante da circulação geral da atmosfera [37].

### **2.1.1.1 ENERGIA EÓLICA**

A energia eólica ou dos ventos, é obtida pela conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica, através de turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores [38]. Estudos relatam o emprego da energia eólica em moinhos de vento a partir de 1700 a.C na agricultura e nas grandes descobertas de novos continentes através da navegação [35].

Atualmente a maior importância em aproveitamento da energia eólica tem sido direcionada ao uso da energia renovável e de fonte considerada limpa, à produção de eletricidade, sendo apontada como a mais promissora em curto prazo, considerando aspectos de segurança energética, custo socioambiental e viabilidade econômica [39]. Considerando tais vantagens, várias instituições se empenham no mapeamento eólico do Brasil e algumas regiões são consideradas com melhores potenciais de vento, como as regiões Norte e Nordeste, sendo esta última, uma das pioneiras na instalação de energia eólica para aproveitamento na geração de energia elétrica, considerando o argumento de pertencer à costa litorânea, onde se observam fortes e estáveis ventos durante todo o ano [40].

Contudo, a inserção da energia eólica na matriz energética brasileira, necessita não só de apoio aos avanços tecnológicos, a fim de atender a objetivos sociais, proteção ambiental e maior diversidade na matriz energética, mas maiores esforços financeiros e estudos que apontem os custos na produção de aerogeradores, a viabilidade e os benefícios da utilização da energia eólica.

### **2.1.2 RADIAÇÃO SOLAR**

A radiação solar, energia radiante proveniente do sol e emitida em forma de radiação eletromagnética, constituiu-se um elemento meteorológico e principal fator climático, pois sua disponibilidade regula a circulação atmosférica, esta que é responsável pelas condições climáticas locais.

A radiação solar é a principal fonte de energia para os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no sistema Terra-atmosfera [41]. O conhecimento acerca da variabilidade desta variável, tem aplicabilidade em diversas áreas

científicas, como engenharia, arquitetura, meteorologia, agricultura, hidrologia e, ainda, como indicador da variabilidade climática [42].

Algumas premissas devem ser levadas em consideração, como as variações temporais na taxa de radiação solar. Uma das primeiras pesquisas em que se abordou este tema foi desenvolvida por Ohmura & Lang (1989) que observaram que as taxas de radiação solar incidente à superfície terrestre estariam declinando de maneira acentuada, desde 1950 [43]. Tal diminuição pode ser devido a vários fatores, como: Dispersão de Rayleigh por moléculas de ar; Absorção por ozônio; Absorção por vapor de água; Absorção por gases como CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), entre outros. Nos últimos anos, alguns autores argumentam que essa diminuição é devido ao aumento de partículas aerossol na atmosfera [44]. Outra provável causa da diminuição seria a variabilidade na frequência de nebulosidade [45]

As consequências da variabilidade da radiação solar observadas nas últimas décadas podem ser catastróficas para diversas atividades humanas. A inversão da diminuição de radiação solar pode acarretar efeitos desastrosos sobre o clima, especificamente em relação ao ciclo hidrológico, na temperatura da superfície da Terra e na precipitação pluvial, visto a importância para o ciclo atmosférico que a radiação representa, como principal fator climático.

O conhecimento da variabilidade do tempo registrado em fluxos de energia solar e sua potencialidade poderão indicar as condições climáticas locais, favorecendo pesquisas à utilização da energia solar quando transformada em energia elétrica, fonte renovável e limpa, segundo a necessidade imperiosa de uso de energia para manutenção da qualidade de vida terrestre.

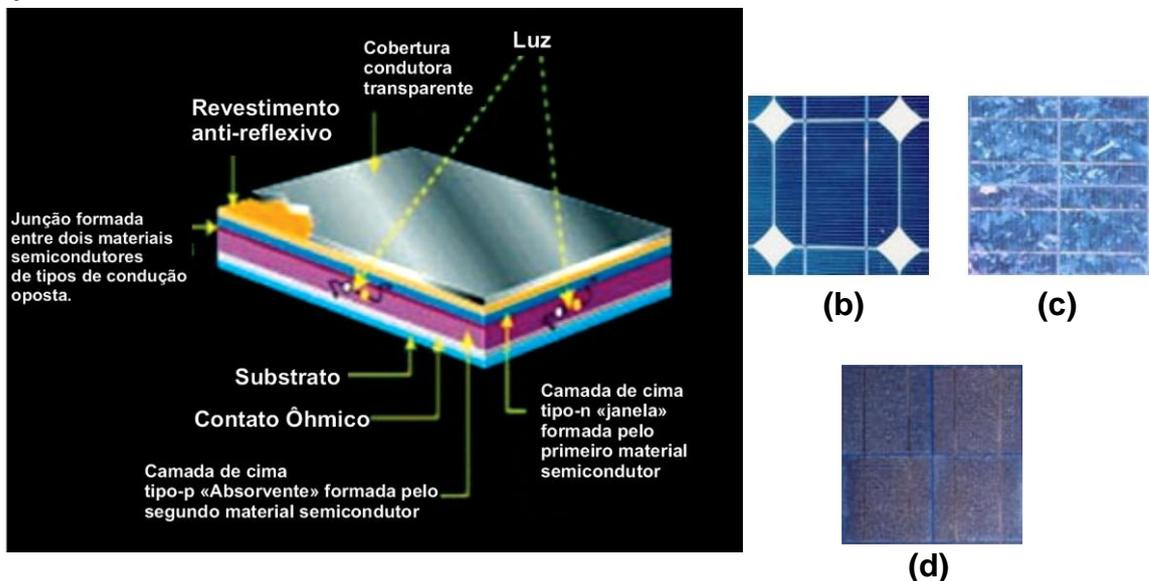
### **2.1.2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade, sendo a potência solar instantânea que incide em determinado ponto, medida em  $W.m^{-2}$  (potência/área) e o total desta energia em um dia que atinge este ponto em  $KWh.m^{-2}.dia^{-1}$ . Dessa forma, a variabilidade e disponibilidade são decorrentes das estações do ano e suas influências climáticas em cada região [46].

Além desses estudos, é necessário realizar estudos físicos, estatísticos e ambientais, para entender as vantagens e desvantagens do uso dessa energia.

Algumas vantagens são conhecidas com relação ao baixo custo de manutenção das células fotovoltaicas (Figura 2), vida útil longa (em torno de 25 anos), e não apresenta impacto ambiental por fonte de combustíveis, pois não consomem nenhum tipo e, portanto, não geram nenhum tipo de emissão de poluentes, não produz ruído e não é composto por substâncias tóxicas. Uma desvantagem conhecida é o seu alto custo de implementação, podendo não ser viável para grandes aplicações.

(a)

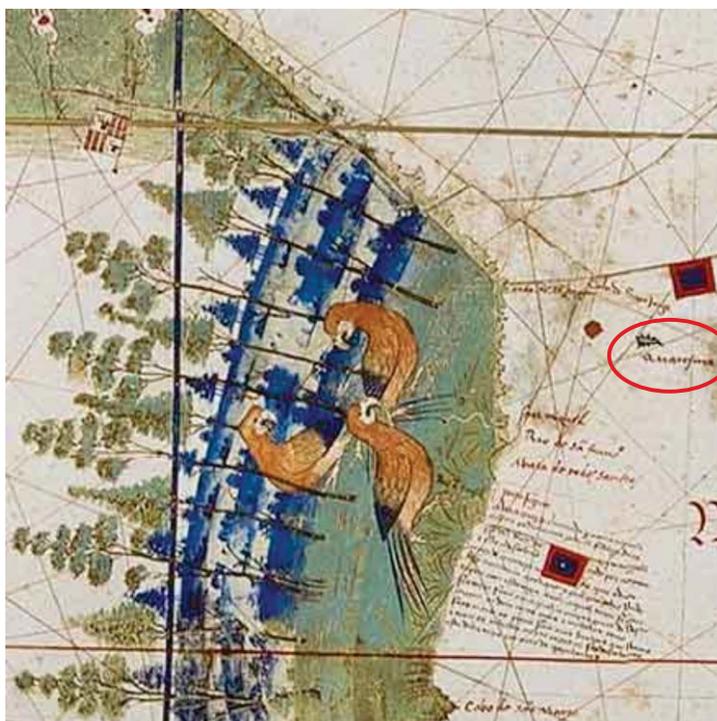


**Figura 2.** Estrutura de uma célula fotovoltaica (a). Célula fotovoltaica de silício monocristalino (b). Célula de silício policristalino (c). Célula de silício amorfo (d). Adaptada [47]

## 2.2 FERNANDO DE NORONHA

Considerado um arquipélago, Fernando de Noronha, originado por fenômenos geológicos vulcânicos, cujo vulcão submerso ao arquipélago foi extinto há mais de vinte anos, teve seus primeiros relatos de existência no século XVI, por volta de 1503, pelo Navegador Português, Florentino Américo Vespúcio. Em 1504 a ilha é doada ao português Fernão de Loronha, que originou o nome da ilha, antes chamada de Ilha Quaresma no Mapa Cantino (Figura 3), considerada a mais célebre carta cartográfica e mais antiga da América do Sul. Anos após a conquista, a sua

história foi marcada por invasões e piratarias, causa da construção de dez fortes, atualmente apenas com o Forte dos Remédios e o Forte de São Pedro do Boldró. Serviu de base militar, entre 1942 e 1945, para norte-americanos, durante a Segunda Guerra Mundial e, no período da ditadura (1964) serviu foi uma ilha penal.



**Figura 3.** Mapa de Cantino, primeira carta cartográfica da América do Sul, escrita em 1502. Adaptada [48]

Formado por vinte e uma ilhas e ilhotas todas protegidas por leis federais ambientais, sendo vinte inabitadas e uma ilha habitada, de maior extensão, chamada Fernando de Noronha, o arquipélago desde 1988 pertence ao Governo do Estado de Pernambuco, - distando 545 km do continente -, após lutas territoriais históricas, ano que foi transformado no Parque Nacional Marinho, que está dividido em duas unidades de conservação: a Reserva Marinha Nacional (retidos para a fauna, flora e proteção dos recursos naturais) e Área de Proteção Ambiental, que é reservado para a ocupação humana. Cada uma dessas unidades tem regras de preservação estabelecidas pelo governo federal e estadual, com a finalidade de preservar os recursos naturais e favorecer o desenvolvimento sustentável da ilha. Atualmente o arquipélago é considerado um dos mais ricos ecossistemas brasileiros, cuja fiscalização fica sob a responsabilidade do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente-IBAMA, que procura utilizar seus recursos naturais para a sustentabilidade

da Ilha e da população que atualmente é de 2.100 habitantes, na ilha de Fernando de Noronha, a única habitada.

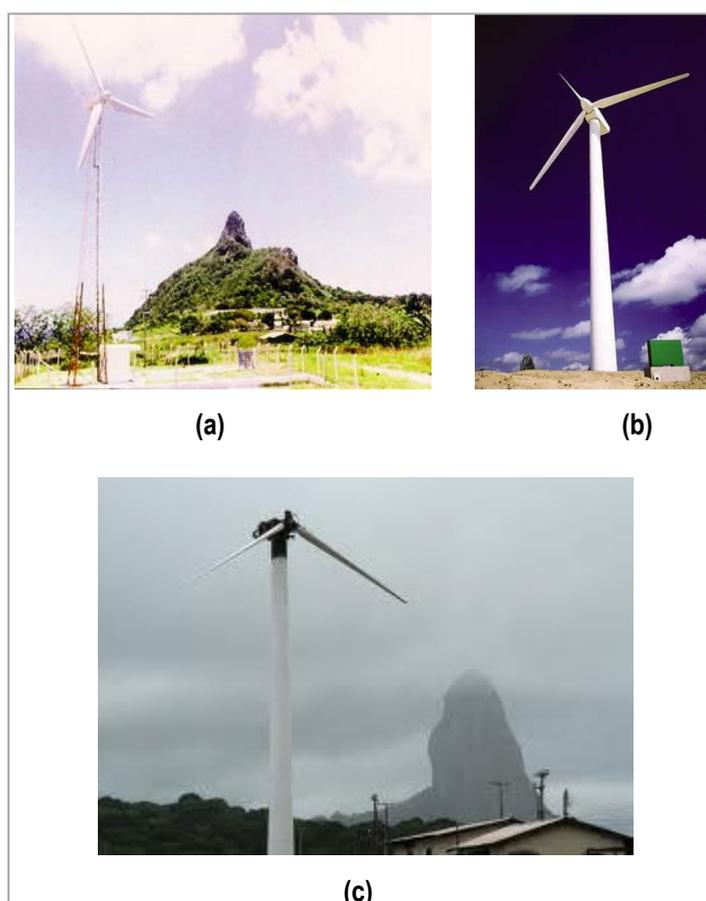
A preservação da ilha é um dos maiores impulsionadores ao uso de práticas sustentáveis e projetos preservacionistas, entretanto, o uso da energia elétrica foi e continua sendo um problema eminente, tanto para os moradores, quanto para as condições ambientais da ilha. Atualmente a ilha recorre a fontes alternativas de energia para suprir a demanda local, tendo sua maior produção através de geradores elétricos a diesel, que constitui uma fonte considerável de poluição atmosférica, pois emitem gases como o óxido de nitrogênio; o óxido de enxofre, o dióxido e o monóxido de carbono, que são gases nocivos ao homem. Outro fator relacionado ao uso dos geradores são os possíveis incêndios das máquinas, o barulho emitido pelas mesmas e o cheiro forte de combustível, oriundos das estações energéticas que viabilizam esse tipo de energia, assim moradores e a fauna local são seriamente prejudicados, contradizendo a proposta de sustentabilidade sem prejuízos ao meio ambiente. Em Fernando de Noronha a estação de energia recebe o nome de Usina Termelétrica Tubarão, Figura 4, da Companhia Energética de Pernambuco - Celpe, responsável por 100% do fornecimento de energia elétrica na ilha, com cinco geradores a óleo diesel, entretanto pousadas e algumas residências também possui seu gerador particular, resultando no aumento desse tipo de máquina na ilha.



**Figura 4.** Usina Termelétrica Tubarão – CELPE, da Ilha de Fernando de Noronha. Arquivo pessoal.

Para reduzir os impactos causados ao meio ambiente na ilha pelo uso dos geradores, alguns projetos envolvendo o uso das energias alternativas de fonte

limpa, ou seja, não poluentes, estão sendo viabilizados pelo governo de Pernambuco. Já em 1992, o Grupo de Energia Eólica da Universidade Federal de Pernambuco, em convênio com o governo da Dinamarca, através do Instituto de Pesquisas Dinamarquês–FOLKECENTER, implantou a primeira turbina eólica na Ilha de Fernando de Noronha, com um gerador assíncrono de 75 kW, Figura 5.a. A turbina, na sua primeira fase, reduziu em 10% o consumo mensal de 80.000 litros de óleo diesel. Em 2000, o Centro Brasileiro de Energia Eólica –CBEE/UFPE, com colaboração do RISØ National Laboratory da Dinamarca, e financiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL, instala a segunda turbina eólica, iniciando sua operação em 2001, composta de um gerador assíncrono de 225 kW, Figura 5.b, sendo responsável por 20% da produção de energia elétrica da ilha, entretanto, em março de 2009, a turbina é atingida por um raio, Figura 5.c, e atualmente continua sem reparação.



**Figura 5.** Primeira turbina eólica de Fernando de Noronha – PE (75 kW) (a). Arquivo do Memorial da Eletricidade. Segunda turbina eólica de Fernando de Noronha – PE (225kW) (b). Arquivo da ANEEL. Turbina eólica destruída por raio (c). Arquivo cedido pelo Ministério da Aeronáutica.

Atualmente a na Ilha de Fernando de Noronha, a concentração de sua economia está voltada ao turismo, devido ao seu ecossistema rico e seu clima tropical quente, com duas estações climáticas bem definidas, seca e chuvosa, com precipitações ocasionais e temperatura média de 28°C e, sob a influência da Zona Continental Intertropical (ZCIT), zona de convergência dos ventos alísios, úmidos e que sopram forte e durante todo ano, favorecendo o turismo e, por conseguinte, os problemas relacionados à energia. Entretanto, vários ramos de pesquisa estão sendo viabilizados, em maior escala para a preservação de espécies nativas e práticas sustentáveis relacionadas à reciclagem de resíduos produzidos, visto que o saneamento básico, nos últimos anos não recebe devida atenção. Ainda tímidos, os estudos envolvendo as fontes alternativas de energia com fonte limpa recebem atenção diante da problemática existente em Fernando de Noronha.

### 2.3 FRACTAIS

Os fractais, Figura 6, surgiram da necessidade em estudar formas geométricas altamente irregulares, mais complexas e com dimensões definidas como não inteiras. Visto que, até então, eram conhecidos estudos acerca da geometria Euclidiana, cujas dimensões são bem definidas, como: um conjunto finito de pontos tem dimensão zero; uma linha tem dimensão um; uma superfície plana, dimensão dois, etc.

(a)



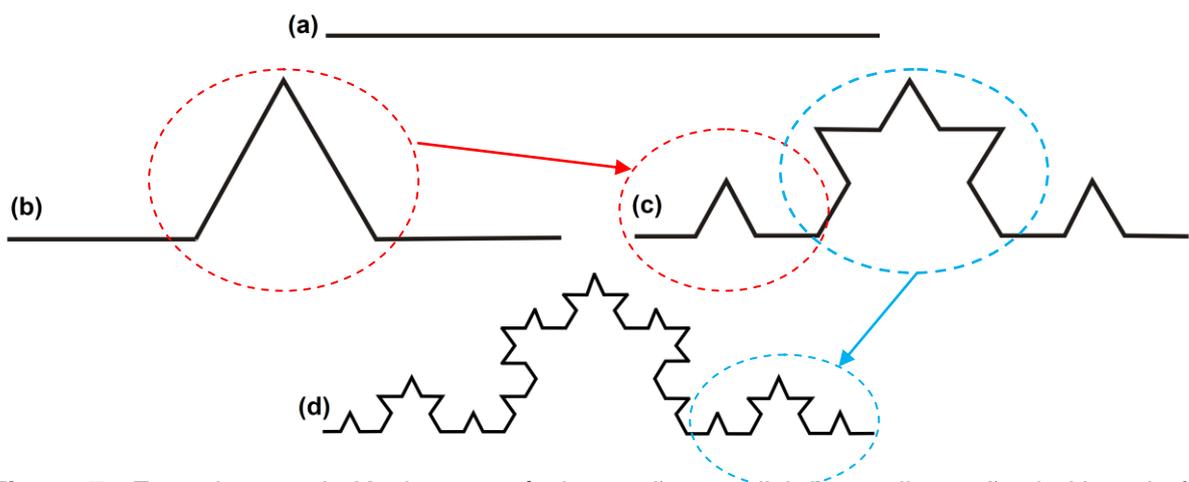
(b)



**Figura 6.** Exemplos de formas fractais presentes na natureza: (a) samambaia, (b) brócolis. [49]

As formas irregulares, chamadas de amorfas, na geometria Euclidiana, foram estudadas pelo menos um século antes de Benoit Mandelbrot<sup>1</sup>, em 1975 (data do lançamento de seu livro “*The fractal Geometry of Nature*), criar a palavra *fractal*, do adjetivo latim *fractus*, que significa irregular ou fragmentado e, defini-los como sendo um conjunto cuja dimensão Hausdorff-Besicovitch, um método de calcular a dimensão fractal, não é um valor inteiro [50]. Contudo, por considerar que tal conceito deixa sem fundamentação os fractais de interesse físico, como fluxo turbulento de fluidos e séries temporais com grandezas físicas, em 1986, Mandelbrot define fractal como sendo conjuntos cuja forma é extremamente irregular ou fragmentada, apresentando essencialmente o mesmo padrão em todas as escalas, sua propriedade básica, chamada de autossimilaridade ou homotetia interna [51].

A Figura 7, conhecida por Curva de Koch, com quatro interações ou divisões, representa a construção de um objeto fractal, com autossimilaridade exata. Sua construção consiste em dividir uma linha infinita, Figura 7.a, em quatro segmentos semelhantes ou autossimilares, formando vértices de um triângulo ou face triangular, Figura 7.b, a cada segmento intermediário, dividi-se novamente em três segmentos semelhantes formando novamente uma face triangular, Figura 7.c, repetidamente a cada segmento formado dividirá em faces triangulares, cujos lados são  $1/3$  do comprimento dos lados das faces construídas Figura 7.d,. É destacável que a Curva de Koch é uma curva contínua, entretanto, não diferenciável em todos os pontos [52].



**Figura 7.** Fractal curva de Koch, com três interações ou divisões e dimensão de Hausdorff-Besicovitch [53].

Um objeto autossimilar com dimensão  $D$  pode ser dividido em  $N$  cópias menores autossimilares, cada uma delas reduzida a uma escala representada por [54]:

$$N = r^d \quad (1)$$

Onde  $r$  é a proporção de redução;  $N$  é o número de réplicas autossimilares e,  $D$  a dimensão fractal, que difere da dimensão euclidiana por não precisar ser, necessariamente, um número inteiro [55].

Reciprocamente, dado um objeto autossimilar de  $N$  partes reduzidas à uma proporção  $r$  do todo, sua dimensão fractal ou similaridade é dada por:

$$D = \frac{\log(N)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (2)$$

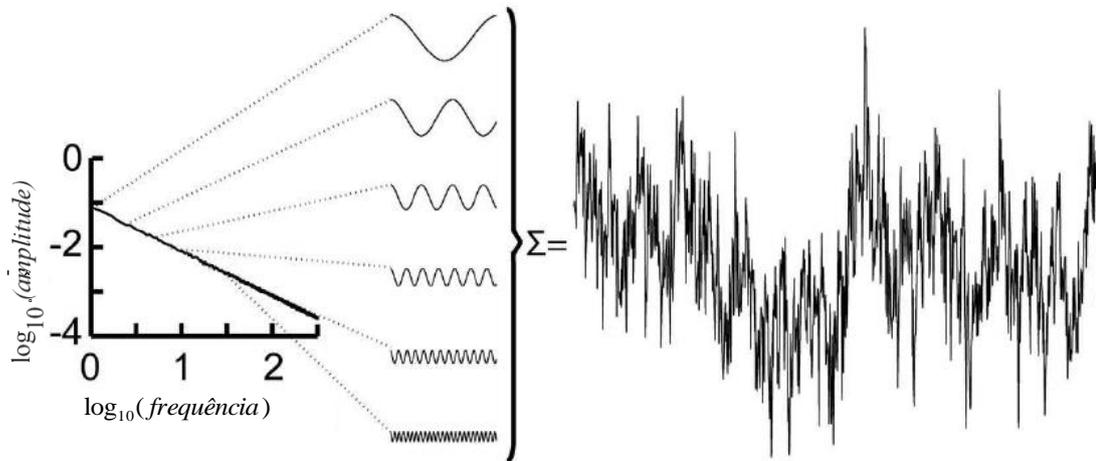
Com a aplicação da fórmula para o cálculo da dimensão fractal (2), a curva de Von Koch, e sua construção representada na Figura 7, possui dimensão fractal aproximada de 1,26. Através de um processo iterativo, de acordo com um processo particular, cada segmento de reta está sendo dividida em quatro partes autossimilares, então  $N = 4$  com uma proporção  $r = 1/3$ , então:

$$D = \frac{\log(4)}{\log\left(\frac{1}{1/3}\right)} = \frac{\log(4)}{\log(3)} = 1,261859\dots$$

As características fractais podem ser estendidas as séries temporais que possuem flutuações em múltiplas escalas de tempo. Tais flutuações são caracterizadas pela autossimilaridade estatística, da mesma maneira, que os objetos fractais possuem a autossimilaridade em diferentes escalas espaciais. Os processos fractais são exemplificados em: intervalos entre batimentos cardíacos em humanos [56], intervalo entre dois passos de humanos [57], flutuações na respiração [58],

variação da pressão arterial [59], contagem das células brancas em sangue [60], cinética de canais iônicos [61] e vasculatura retínica [62].

A autossimilaridade em uma estrutura fractal é encontrada extraindo uma fração da mesma, aumentando-a até o tamanho da estrutura original com o mesmo fator de ampliação para o comprimento e largura, tornando-as semelhantes. Dessa forma é possível comparar as propriedades estatísticas a fim de considerar o fractal, como uma estatística fractal. No caso das séries temporais, a dimensão é adaptada, ou seja, pode ter dois tipos de fatores de ampliação para cada tipo de variável, Figura 8.



**Figura 8.** Exemplo de extração de uma fração da série temporal em vários níveis, com dois fatores de ampliação, um para frequência e outro para amplitude. Adaptado [25].

Uma série temporal  $\{x_t\}$  possui propriedade de autossimilaridade, puramente estatística, com o parâmetro  $\alpha$  se a equação estocástica  $x(t)$  é dada por [63]:

$$x(t) = k^\alpha x\left(\frac{t}{k}\right) \quad (3)$$

Expressão que indica a igualdade de propriedades estatísticas, através do surgimento das mudanças de escalas para  $t$  e  $x(t)$ , tais que:  $t \rightarrow \frac{t}{k}$  e  $x(t) \rightarrow k^\alpha x(t)$ .

O expoente  $\alpha$  chama-se parâmetro de autossimilaridade [64].

## 2.4 ANÁLISE DE CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS FRACTAIS

Nesta seção serão apresentados os principais métodos de análise de correlação de longo alcance em séries temporais fractais estacionárias e não estacionárias.

### 2.4.1 SÉRIES TEMPORAIS FRACTAIS ESTACIONÁRIAS

Uma série temporal  $\{x_t\}$  é dita estritamente estacionária, se a distribuição de  $X(t)$  é independente de  $t$ , a distribuição conjunta de  $X(t_1 + \eta)$  e  $X(t_2 + \eta)$  é independente de  $t$  e do mesmo modo para todos os  $k$  - para o conjunto distribuições de  $X(t_1 + \eta) \dots X(t_k + \eta)$  [51]. Denotando que o deslocamento da origem por  $\eta$ , não tem causa na distribuição conjunta que, conseqüentemente depende apenas dos intervalos entre  $t_1, \dots, t_k$ .

### 2.4.2 MÉTODOS DE ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS FRACTAIS ESTACIONÁRIAS.

#### 2.4.2.1 FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO

A função de autocorrelação, denotada por  $A(\tau)$ , para séries temporais estacionárias, dada em (4), é definida por [17]:

$$A(\tau) = \frac{1}{(N - \tau)} \sum_{n=1}^{N-\tau} \frac{(x_n - \langle x \rangle)(x_{n+\tau} - \langle x \rangle)}{\sigma^2} \quad (4)$$

em que  $N$  é o número de pontos da série temporal,  $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$  sua média

amostral e  $\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \langle x \rangle)^2$  sua variância amostral.

Esta função representa a média do produto dos valores da série temporal  $x_n$  nos instantes  $t$  e  $t + \tau$ , e indica por quanto tempo o valor da série temporal no instante  $t$  depende de seus valores prévios. Em outras palavras,  $A(\tau)$  mede o grau de semelhança existente na série temporal à medida que o tempo passa.

Por meio da função de autocorrelação podemos também inferir a regularidade ou irregularidade de uma série temporal. Se a série temporal  $x_n$  é aperiódica ou quase periódica a função de autocorrelação  $A(\tau)$  permanece diferente de zero quando o tempo (ou  $\tau$ ) tende ao infinito. Já,  $A(\tau)$  de uma série periódica é igualmente periódica, pois a série temporal volta a se parecer consigo mesma após o intervalo de tempo correspondente ao período [17].

Para uma série não correlacionada,  $A(\tau) = 0$  para  $\tau > 0$ . Para uma série que possui correlação de curto alcance  $A(\tau)$  tem um decaimento exponencial

$A(\tau) \approx \exp\left(-\frac{\tau}{t_0}\right)$ , com uma escala característica  $t_0$ . Para uma série que possui

correlação de longo alcance  $A(\tau)$  tem decaimento seguindo uma lei de potência  $A(\tau) \approx \tau^{-\gamma}$ , com o expoente de correlação,  $0 < \gamma < 1$ . Para séries não estacionárias a média não é bem definida e para grandes escalas  $\tau$ ,  $A(\tau)$  flutua ao redor de zero que dificulta a obtenção do expoente de correlação  $\gamma$  [65].

#### 2.4.2.2 ANÁLISE ESPECTRAL

O espectro de potências é definido como a transformada de Fourier de função de autocorrelação [18].

$$s(f) = c(0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} c(n) \cos(2\pi f n) \quad (5)$$

Para séries temporais que possuem correlação de longo alcance  $s(f)$  segue uma lei de potência

$$s(f) \sim f^{-\beta} \quad (6)$$

Com  $\beta = 1 - \gamma$ . O expoente espectral  $\beta$  e o expoente de correlação  $\gamma$  são obtidos através da inclinação da reta  $\log s(f)$  versus  $\log f$ . A análise espectral também se aplica as séries temporais estacionárias.

### 2.4.2.3 ANÁLISE DE HURST

Método desenvolvido pelo Hidrólogo inglês H.E. Hurst (1951) [64], foi considerado o primeiro método para a análise de persistência em séries temporais de longo alcance e baseado no passeio aleatório, a estatística R/S, *rescaled range* ou *range over standard deviation*, que significa a divisão da amplitude sobre o desvio padrão, foi utilizada pelo autor nos estudos das cheias do rio Nilo, Egito [66]. O método consistia em calcular a diferença entre os máximos e mínimos das cheias e dividir tal valor pelo desvio padrão das vazões. O resultado desse método é a estatística R/S.

No primeiro passo da análise de *Hurst* divide-se a série original  $\{x_t\}$  em  $N_s = \text{int}\left(\frac{N}{s}\right)$  segmentos de tamanho  $s$ , não sobrepostos e, em cada segmento  $v = 1, 2, \dots, N$ , a série original é integrada pela equação [19]:

$$x_{vk} = \sum_{t=1}^k (x_{(v-1)s+t} - \langle x_v \rangle) \quad (7)$$

onde  $\langle x_v \rangle = \frac{1}{s} \sum_{v=1}^s x_{(v-1)s+t}$  é a média local da série no segmento  $v$ .

Em seguida para cada segmento calcula-se a diferença entre máximos e mínimos,

$$R_v(s) = \max(x_{vk}) - \min(x_{vk}), \quad k = (v-1)s + 1, \dots, vs \quad (8)$$

em que, o desvio padrão é dado por:

$$s_v(s) = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{v=1}^s (x_{(v-1)s+t} - \langle x_v \rangle)^2} \quad (9)$$

A função de flutuação de *Hurst* é dada pela expressão,

$$F_{R/S}(s) = \frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} \frac{R_v(s)}{S_v(s)} \sim s^H, \text{ para } s > 1 \quad (10)$$

O expoente de *Hurst*  $H$  é relacionado com o expoente de correlação  $\gamma$  e com o coeficiente  $\beta$  da análise espectral através da equação  $2H = 1 + \beta = 2 - \gamma$  [67].

As análises segundo o expoente  $H$  são interpretadas da seguinte forma [68-73],

- i) Para ruído branco (séries não correlacionadas)  $H = 0,5$  e, a função de autocorrelação diminui exponencialmente. A série é considerada como um processo ou passeio aleatório;
- ii) O valor  $0 < H < 0,5$  indica que a série original possui correlações de longo alcance antipersistentes, ou seja, existe uma probabilidade maior que cinquenta por cento de que os valores grandes (pequenos) sejam seguidos por valores pequenos (grandes);
- iii) Para  $0,5 < H < 1$  a série é dita persistente, pois apresenta uma probabilidade maior que cinquenta por cento de que os valores grandes (pequenos) sejam seguidos por valores grandes (pequenos). A função de autocorrelação  $A(\tau)$  diminui seguindo uma lei de potência  $A(\tau) \approx \tau^{-\gamma}$ , com  $\gamma = 2 - 2H$ ;
- iv) O valor  $H = 1$  representa um ruído tipo  $\frac{1}{f}$ , o espectro de potências  $s(f)$  segue uma lei de potências  $s(f) \approx f^{-\beta}$ ,  $\beta = 2H - 1 = 1$ ;
- v) Para  $H > 1$  as correlações existem, contudo não diminuem seguindo uma lei de potências. O caso especial  $H = 1,5$  indica um ruído Browniano, que é a integração do ruído branco.

#### 2.4.2.4 ANÁLISE DE FLUTUAÇÃO - FA

Este método é baseado no passeio aleatório, como a análise de Hurst. Seja  $\{x_i\}$  uma série temporal com média zero. Primeiro integra-se a série original, formando uma nova série  $y(k) = \sum_{i=1}^k x_i, k = 1, \dots, N$ . Em seguida a série  $y(k)$ , é dividida em  $N_s = \text{int}\left(\frac{N}{s}\right)$  segmentos não sobrepostos de mesmo comprimento  $s$ , a partir do início da série [68].

A função de flutuação é obtida para cada segmento pela equação:

$$F_{FA}^2(v, s) = [y((v-1)s + 1) - y(vs)]^2, \text{ para } v = 1, \dots, N_s \quad (11)$$

O cálculo da função de flutuação para o tamanho de segmento de comprimento  $s$  é dada pela expressão:

$$F(s) = \left[ \frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} F_{FA}^2(v, s) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Em casos de correlações de longo alcance,  $F(s)$  aumenta segundo uma lei de potência,  $F(s) \approx s^\alpha$ . O expoente  $\alpha$  possui as mesmas características e interpretação que expoente de Hurst ( $H$ ), para dados monofractais, sendo, portanto, considerados idênticos. Sua relação com os expoentes  $\gamma$  e  $\beta$  é dada pela equação:  $2\alpha = 1 + \beta = 2 - \gamma$  [67]. Os resultados da FA tornam-se estatisticamente confiáveis para escalas maiores do que um décimo do tamanho dos dados, ou seja, a análise deve ser limitada por  $s < N/10$ .

### 2.4.3 SÉRIES TEMPORAIS FRACTAIS NÃO ESTACIONÁRIAS

Uma série temporal  $\{x_i\}$  é dita não estacionária, quando apresenta uma tendência temporal crescente ou decrescente, ou seja, a média varia ao longo do tempo. No caso da série apresentar uma tendência não linear a covariância será alterada ao longo da série.

### 2.4.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS FRACTAIS NÃO ESTACIONÁRIAS.

#### 2.4.4.1 DETRENDED MOVING AVERAGE (DMA)

O *Detrended Moving Average* (DMA) [69,70] é uma técnica utilizada para quantificar as correlações de longo alcance, em séries temporais não estacionárias com tendências subjacentes e, as correlações de longo alcance em superfícies fractais [71,72], contendo um parâmetro  $\theta$  para determinar a posição da janela destendenciada [73]. O método DMA é amplamente utilizado em processos biológicos [74] e finanças [75]. Uma diferença marcante entre o DMA e os outros métodos de análises de correlação como o expoente de Hurst (R/S), visto em 3.2.3 e, o que será utilizado como metodologia nesta pesquisa, DFA, é que não necessita de uma divisão da série em janelas. O DMA, opera por meio da estimativa de uma variância generalizada da série de longo alcance correlacionada  $x(t)$  em torno da média móvel.

O método DMA é baseado na seguinte função [72]:

$$\sigma_{DMA}^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{t=n}^N [x(t) - \tilde{x}_n(t)]^2, \quad t = 1, \dots, N \quad (13)$$

$$\tilde{x}_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n x(t-k). \quad (14)$$

A equação (13) define uma variância generalizada do caminho aleatório em relação à média móvel  $\tilde{x}_n$ , calculada através da equação (14). A função  $\tilde{x}_n$  é calculada pelo valor médio em cada janela de comprimento  $n$ , com série temporal de dimensão  $N$ . Ao fazer isso, o ponto de referência processo de média é o último ponto

da janela. O processo dinâmico médio e o algoritmo de DMA podem ser, no entanto, que se refere a qualquer ponto dentro da janela [70], generalizando as equações (13), (14) como se segue:

$$\sigma_{DMA}^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{t=n(1-\theta)}^{N-n\theta} [x(t) - \tilde{x}_n(t)]^2, \quad (15)$$

$$\tilde{x}_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=-n\theta}^{n(1-\theta)} x(t-k). \quad (16)$$

Ao introduzir o parâmetro  $\theta$ , variando de  $[0,1]$ , o ponto de referência da  $\tilde{x}_n$ , é definido dentro da janela. Ao repetir o cálculo para diferentes tamanhos de janelas, a dependência entre a lei de potência e a variância generalizada  $\sigma_{DMA}$  é obtida por:

$$\sigma_{DMA}^2 \sim n^{2H}, \quad (17)$$

em que  $H$  é o expoente de Hurst, que está relacionada com a propriedades de correlação de  $x(t)$ ,  $H = 0,5$ , para série não correlacionada,  $H < 0,5$  correlações antipersistentes e  $H > 0,5$  correlações persistentes.

#### 2.4.4.2 DETRENDED FLUCTUATION ANALYSIS (DFA)

O método *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) foi introduzido por Peng et.al [26] para quantificar correlações, especificamente, em séries temporais não estacionárias. Este método foi amplamente utilizado para análises de sequências gênicas de DNA [26], na fisiologia [14], climatologia [15], geofísica [22], meteorologia [23] e séries temporais financeiras [20]. O método permite a detecção da autossimilaridade nas séries não estacionárias, a vantagem deste método em relação aos métodos convencionais é que ele evita falsas detecções de correlações de longo alcance que são artefatos de tendência incorporada no sinal [24].

Como a na Análise de Hurst R/S, uma caminhada aleatória é criada, porém uma operação de retificação é realizada onde um polinômio (originalmente, e geralmente, linear) é localmente apto para a caminhada dentro de cada janela, afim de, identificar a tendência, que em seguida, é removida. O DFA é tipicamente descrito como uma estimativa correta permitindo o dimensionamento da lei de

potência (expoente de Hurst) de uma série não estacionária enquanto é eliminada a detecção falsa da dependência em longo alcance.

### 3 DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 DADOS

Os dados utilizados neste trabalho fazem parte de um banco de dados histórico [20], fornecidos pelo Centro de Previsão Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). No Brasil, o CPTEC/INPE opera e gerencia plataformas de coleta de dados automáticos (PCD's), Figura 9, uma rede de coleta de dados de vento, radiação solar e outros dados ambientais voltados para atender a demanda por informações do setor energético – Rede SONDA, através do uso de plataformas de coleta de dados automáticos (PCD's), Figura 9.

O objetivo principal da rede SONDA é disponibilizar informações que permitam o aperfeiçoamento e validação de modelos numéricos para estimativa de potencial energético de fontes renováveis. Maiores detalhes sobre a Rede SONDA, bem como acesso livre a base de dados coletados podem ser obtidos em [www.cptec.inpe.br/sonda](http://www.cptec.inpe.br/sonda). O CPTEC/INPE também disponibiliza acesso à base de dados coletados em estações automáticas (não direcionados especificamente ao setor de energia).



**Figura 9.** Mapa das PSD instaladas em países da América do Sul. Adaptada [20].

Para tal pesquisa, foram analisadas séries temporais de velocidade do vento diária e radiação solar, coletados pela PCD instalada em Fernando de Noronha, Brasil, situado no oceano Atlântico, a leste do estado do Rio Grande de Norte, Brasil (longitude: 32,41 ° W; latitude: 3,84 ° S; altitude: 38m), durante o período de 01/01/2003- 31/12/2011, com 2.920 observações para cada variável.

A Ilha Fernando de Noronha foi escolhida pela necessidade de implementação de outras fontes de energia alternativas, visto que, atualmente a única fonte de energia da ilha se dá por geradores a diesel, na estação local. Fonte esta, responsável pela emissão de gases poluentes, relação de discordância com a proposta de proteção ambiental e sustentabilidade dos moradores da ilha. A fim de contribuir com a proposta de melhorias no campo da sustentabilidade, a pesquisa será realizada com direcionamento em potencial de vento e radiação solar da ilha Fernando de Noronha.

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1 ALGORITMO DETRENDED FLUCTUATION ANALYSIS (DFA)

O algoritmo do DFA é dado a seguir [21-26]:

- i) Inicialmente a série temporal original  $x(t)$ ,  $t = 1, \dots, N$  é deslocada pela média  $\bar{x}$  e integrada produzindo,

$$y(n) = \sum_{t=1}^n [x(t) - \langle x \rangle], \quad n = 1, \dots, N. \quad (18)$$

onde  $\langle x \rangle = \frac{\sum_{t=1}^N x(t)}{N}$  representa a média da série  $x(t)$ .

- ii) A série integrada  $y(n)$  é dividida em  $N_v = \text{int}\left(\frac{N}{v}\right)$  segmentos não sobrepostos de comprimento  $v$  e, em cada segmento  $s = 1, \dots, N_s$  estima-se por ajuste polinomial, geralmente linear, a tendência local  $y_{v,s}(n)$ , sendo subtraída, em seguida, da série original  $x(n)$ , transformando a série integrada  $y(n)$  em uma série sem tendências.

iii) A variância sem tendência é calculada como:

$$F_{DFA}^2(v) = \frac{1}{vN_v} \sum_{s=1}^{N_v} \sum_{n=(s-1)v+1}^{sv} [y(n) - y_{v,s}(n)]^2 \quad (19)$$

iv) Repete-se (i, ii, iii), para segmentos de diferentes comprimentos, fornecendo a relação entre a função de flutuação  $F_{DFA}(v)$  e o tamanho do segmento  $v$ . Se a série original  $x(n)$ , possui correlações de longo alcance e,  $F_{DFA}(v)$  aumenta com  $v$ , segundo uma lei de potência,

$$F_{DFA}(v) \sim v^\alpha \quad (20)$$

O expoente de autossimilaridade  $\alpha$ , também é descrito como o coeficiente angular da reta obtida por regressão linear de gráfico  $\log F_{DFA}(v)$  versus  $\log(v)$ , como expresso por:

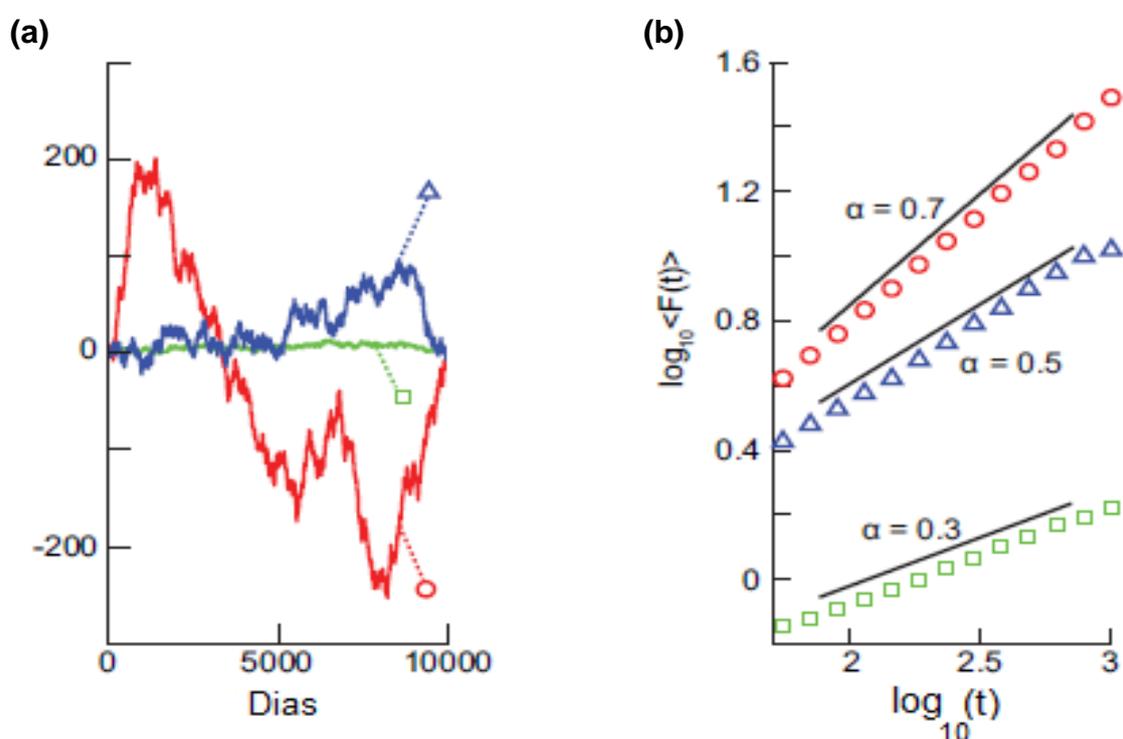
$$\alpha = \frac{\Delta \log F_{DFA}(v)}{\Delta \log(v)} \quad (21)$$

O coeficiente angular ou expoente de autossimilaridade  $\alpha$  que caracteriza a autocorrelação da série analisada é interpretado como [25]:

- i.  $\alpha = 0,5$  para ruído branco (série não correlacionada), a série apresenta uma caminhada aleatória;
- ii.  $0,5 < \alpha < 1$  indica que a série original apresenta correlações de longo alcance persistentes;
- iii.  $0 < \alpha < 0,5$  indica que a série original apresenta as correlações de longo alcance antipersistentes;
- iv.  $\alpha = 1$ , a série apresenta ruído do tipo  $1/f$ ;
- v.  $\alpha > 1$ , as correlações ainda existem, mas não se comportam pela lei de potência;
- vi.  $\alpha > 1,5$ , indica um ruído Browniano que é a integração do ruído branco.

O expoente  $\alpha$  pode ser interpretado como o parâmetro que indica a suavidade da série temporal original, ou seja, quanto maior o valor de  $\alpha$  mais suave é a série analisada.

A Figura 10.a, apresenta exemplos de séries temporais originais experimentais. A Figura 10.b, apresenta no gráfico  $\log F(t)$  versus  $\log(t)$  o expoente de autossimilaridade  $\alpha$  indicando a correlação das séries. A positivamente correlacionada (círculo vermelho), série não correlacionada apresentando uma caminhada aleatória (triângulo azul) e anticorrelacionada com menores flutuações ao longo do tempo (quadrado verde).



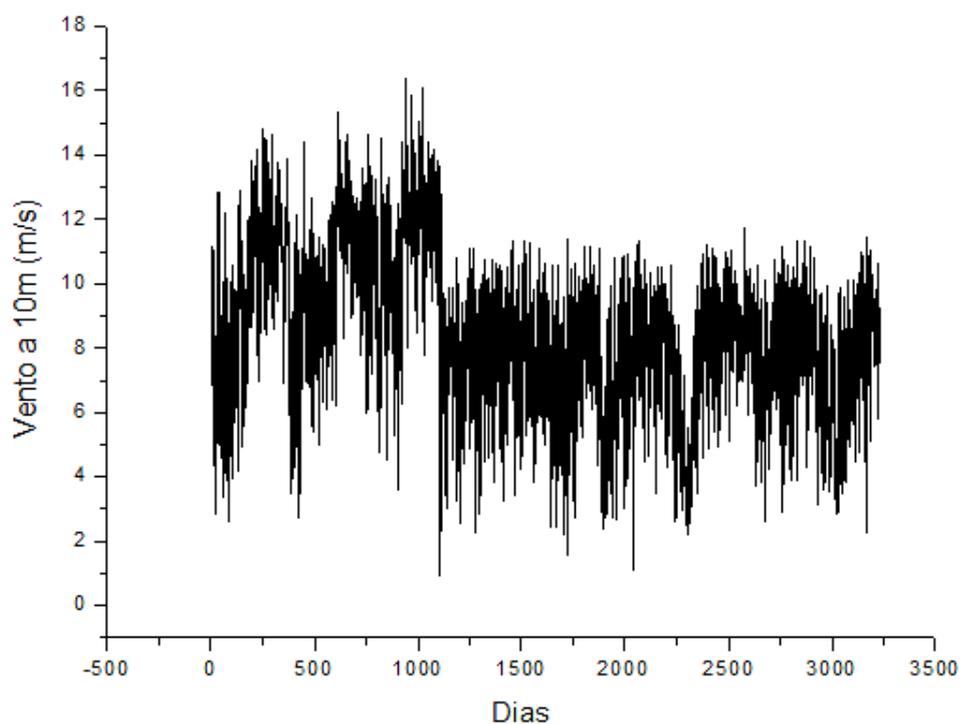
**Figura 10.** Ilustração de aplicação do método DFA em séries temporais experimentais.

Adaptada [25]

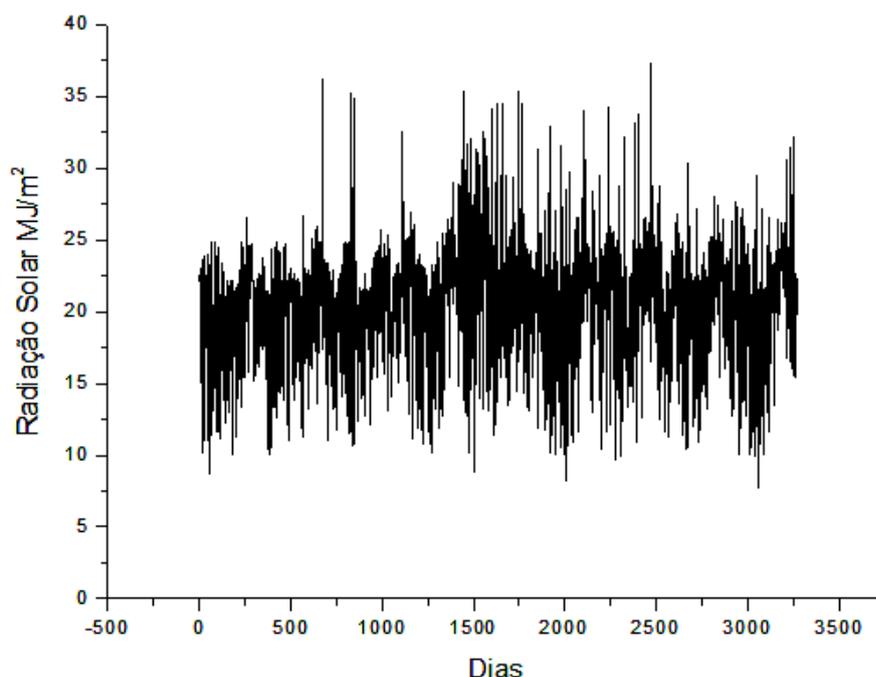
As análises dos dados de vento a 10m e radiação solar em Fernando de Noronha com o método Detrended Fluctuation Analysis foram desempenhadas com o Software disponibilizado no site [www.physionet.org/](http://www.physionet.org/) e o Software **Origin 7.0**.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 11 e 12 expressam, respectivamente, o comportamento das séries temporais diárias de velocidade do vento a 10m e radiação solar, coletados pela Plataforma de Coleta de Dados automática, instalada em Fernando de Noronha, Brasil, no período de 2003 a 2011.



**Figura 11.** Série temporal original de velocidade de vento a 10m, em m/s, dos dados coletados pela PCD de Fernando de Noronha.



**Figura 12.** Série temporal original de radiação solar, em MJ/m<sup>2</sup>, dos dados coletados pela PCD de Fernando de Noronha.

Pode-se observar na Figura 11, que o regime da velocidade do vento a 10m, sofre mudança em pouco mais que 1000 dias, o que corresponde ao período de 2006 a 2011. Entretanto, em ambos os regimes houve predominância de vento com velocidade de vento superior a 3m/s, o que possibilita o uso de turbinas eólicas para geração de energia elétrica, estudos mais profícuos, com o uso do DFA, poderá inferir sobre a persistência dessas velocidades na região estudada.

A Figura 12 indica os valores de radiação solar diária acumulada entre 7,70 e 37,30 MJ/m<sup>2</sup>, com potencial predominante entre 15 e 25 MJ/m<sup>2</sup>, no período de 2003 a 2011. Mostrando bastante regularidade e possibilitando estudos mais profundos quanto ao uso da energia fotovoltaica, como fonte alternativa de energia em Fernando de Noronha-PE.

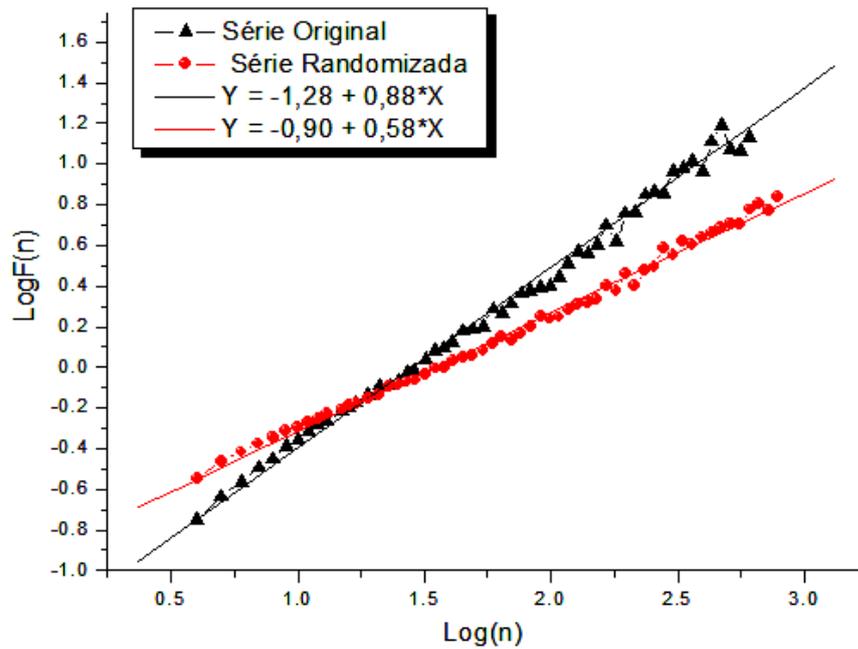
A Tabela 1 exibe as estatísticas descritivas para as variáveis de velocidade de vento e radiação solar acumulada diária. Os valores corroboram com a análise gráfica das séries originais, auxiliando quantitativamente a estatística das variáveis estudadas. Para a radiação acumulada diária os valores expressam entre o mínimo de 7,70 MJ/m<sup>2</sup> em 2011 e o máximo 37,30 MJ/m<sup>2</sup> em 2009, apresentando médias anuais regulares e compatíveis ao estudo. Para velocidade do vento a 10m,

expressam seu mínimo de 0,95 m/s em 2006 e seu máximo de 16,36 m/s em 2005, com médias anuais regulares entre os anos de 2006 a 2011. As duas variáveis apresentaram médias anuais que possibilitam outros estudos que viabilizem o uso das energias alternativas expostas nesta pesquisa.

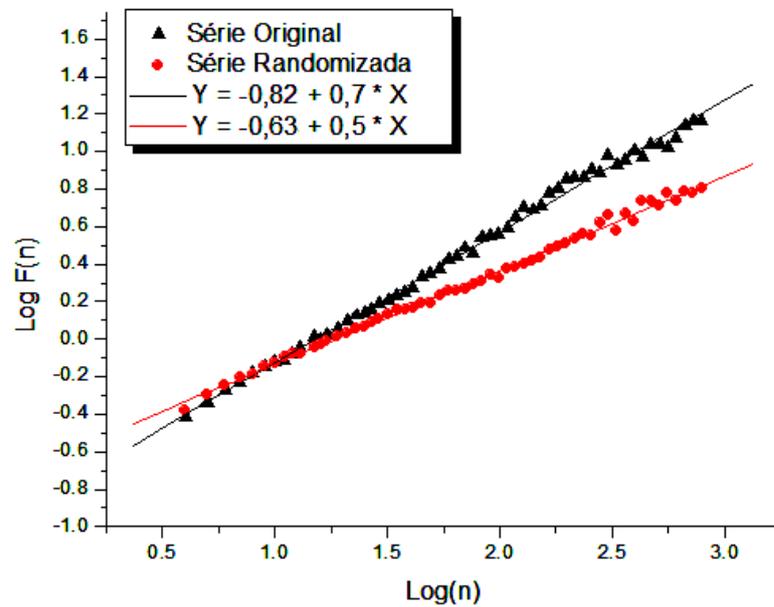
**Tabela 1** Medidas descritivas da velocidade do vento a 10m (m/s) e radiação solar acumulada (MJ/m<sup>2</sup>) diárias no período de janeiro/2003 a dezembro/2011.

<b>Radiação acumulada diária (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
2003	19,73	3,29	8,70	26,50
2004	20,04	3,45	10,10	36,20
2005	20,03	3,05	10,70	27,80
2006	21,22	3,75	10,20	35,40
2007	21,78	4,26	8,80	35,40
2008	20,43	4,12	8,20	34,00
2009	21,06	4,14	9,70	37,30
2010	20,74	3,52	10,40	30,40
2011	20,43	4,01	7,70	32,20
<b>Velocidade de Vento a 10m (m/s)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
2003	9,60	2,57	2,65	14,80
2004	9,96	2,25	2,76	15,30
2005	10,94	2,26	3,58	16,36
2006	7,90	2,10	0,95	13,83
2007	7,66	1,90	1,59	11,38
2008	7,56	2,05	1,14	11,33
2009	7,38	2,10	2,24	11,20
2010	7,93	1,69	2,65	11,74
2011	7,58	1,94	2,25	11,43

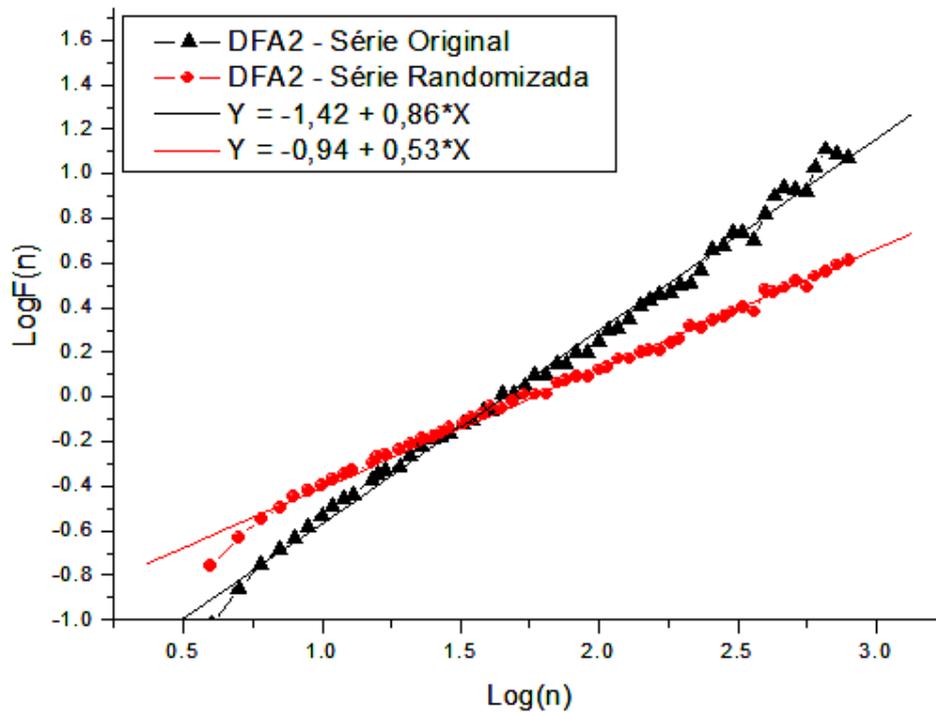
As Figuras 13 a 16 apresentam os gráficos *log x log* obtidos pela aplicação do método *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) no período de ocorrência contínua nas séries temporais estudadas. Ao aplicar o método DFA, foram usados diferentes intervalos não sobrepostos para obter a relação entre, a função de flutuação e o tamanho da janela. Para retirar as tendências em séries integradas, foram utilizados os polinômios de primeiro (DFA1) e segundo (DFA2) graus. Com o objetivo de explicar a origem das correlações, preservando a distribuição dos valores, foi aplicado o método DFA nas séries randomizadas, cujos expoentes encontrados apresentaram escala próximo a 0,5, indicando a perda de correlações.



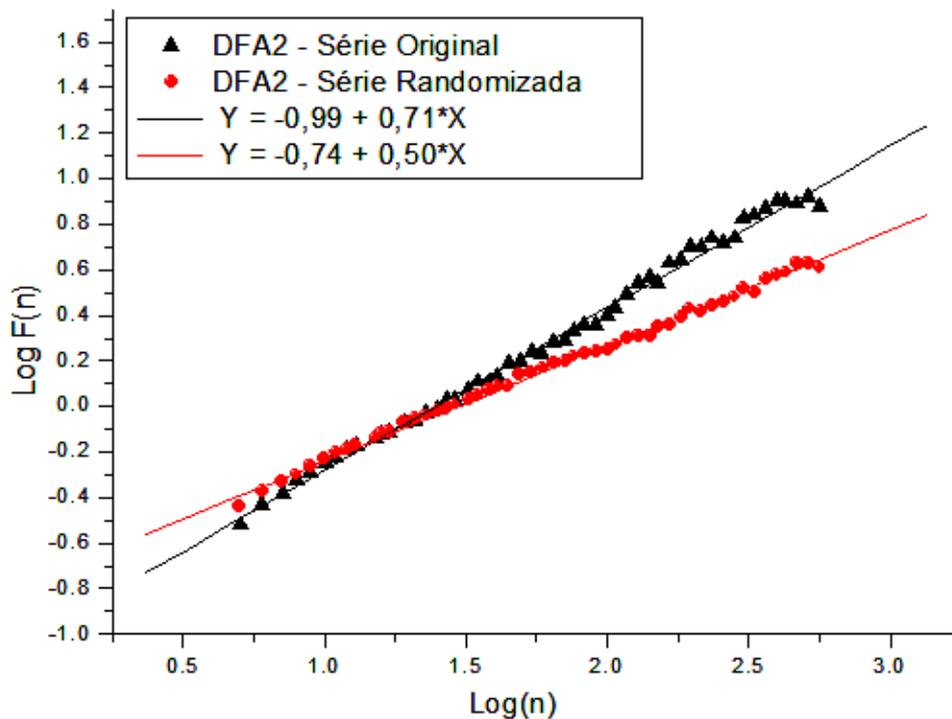
**Figura 13.** DFA1 da série original (preto),  $\alpha = 0,88$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,58$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais (linear - 1º grau) da velocidade do vento a 10, em m/s, em Fernando de Noronha-PE



**Figura 14.** DFA1 da série original (preto),  $\alpha = 0,7$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,5$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais (linear - 1º grau) da radiação acumulada diária em Fernando de Noronha-PE



**Figura 15.** DFA2 da série original (preto),  $\alpha = 0,86$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,53$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais da velocidade do vento a 10m/s em Fernando de Noronha-PE



**Figura 16.** DFA2 da série original (preto),  $\alpha = 0,71$  e da série randomizada (vermelho)  $\alpha_r = 0,50$ , e, seus respectivos ajustes polinomiais da radiação acumulada diária em Fernando de Noronha-PE

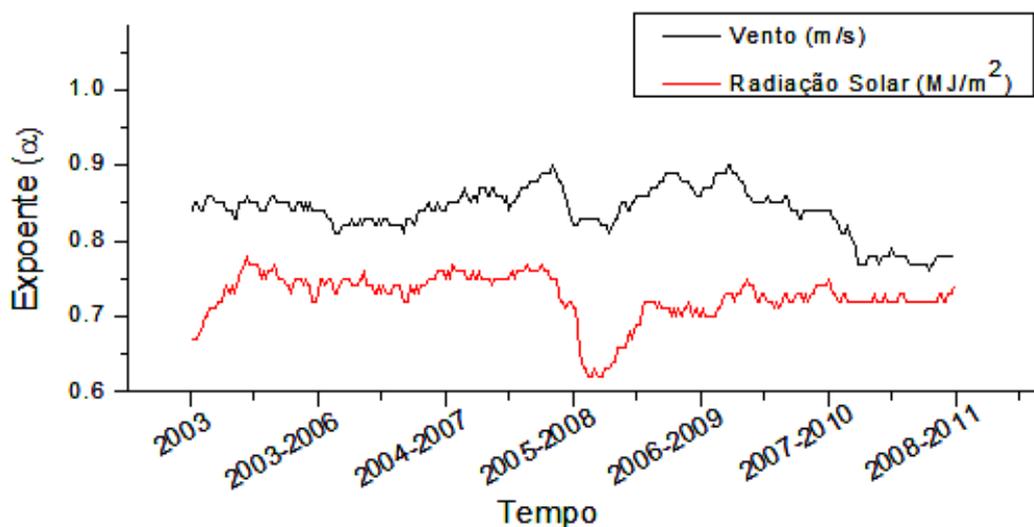
Os expoentes de autossimilaridade  $\alpha$  obtidos por meio do DFA1 e DFA2 para as séries originais e randomizadas, das variáveis de velocidade do vento a 10 m e radiação acumulada diária, são apresentados na Tabela 2. Os ajustes polinomiais dos gráficos  $\log F_{DFA}(v)$  versus  $\log(v)$ , para as séries originais e randomizadas, das variáveis de velocidade do vento a 10 m e radiação acumulada diária, são apresentados nas Figuras 13 a 16, indicados por retas pretas e vermelhas. Podendo comparar o coeficiente angular das retas e o expoente  $\alpha$ , garante-se a afirmação que são numericamente iguais.

**Tabela 2** Expoentes DFA para a velocidade do vento e radiação solar acumulada diária da série original ( $\alpha$ ) e randomizada ( $\alpha_r$ ).

	<i>DFA (grau)</i>	<i>Original (<math>\alpha</math>)</i>	<i>Randomizada(<math>\alpha_r</math>)</i>
<b>Velocidade de Vento (m/s)</b>	<b>DFA (1)</b>	0,880 $\pm$ 0,011	0,580 $\pm$ 0,005
	<b>DFA (2)</b>	0,860 $\pm$ 0,008	0,530 $\pm$ 0,005
<b>Radiação Solar (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>DFA (1)</b>	0,700 $\pm$ 0,006	0,500 $\pm$ 0,004
	<b>DFA (2)</b>	0,710 $\pm$ 0,007	0,500 $\pm$ 0,005

As séries originais da velocidade do vento a 10 m e radiação solar acumulada diária, apresentaram expoentes entre 0,5 e 1,0, indicando que existem correlações de longo alcance e são persistentes, ou seja, apresentam maior probabilidade em que os valores grandes (pequenos) sejam seguidos por valores grandes (pequenos). Para tais variáveis, ao randomizar as séries, ambas apresentaram a perda de correlações (expoente  $\alpha$  próximo ou igual a 0,5), denotando que suas correlações tem origem na organização temporal dos dados e não na distribuição dos valores.

Para avaliar a estabilidade temporal do expoente de autossimilaridade  $\alpha$  nas séries temporais de velocidade do vento a 10 m e radiação solar acumulada diária no período de 2003 a 2011, aplicou-se DFA nas subséries com tamanho de três anos, deslocando continuamente a cada sete dias, como exposto na Figura 17.



**Figura 17.** Evolução temporal do expoente de autossimilaridade  $\alpha$ , das séries de velocidade do vento a 10m, em (m/s), (preto) e radiação solar diária (vermelho), usando janelas (subséries) de tamanho 3 anos, deslocando-se 7 dias.

O resultado mostra que a série de radiação solar acumulada diária apresentou correlações de longo alcance persistentes mais estáveis (menor variabilidade dos valores do expoente de escala), entretanto, a série de velocidade do vento a 10m, apresentou a persistência mais forte (maior valor do expoente da escala) em sua evolução temporal. Vale atentar ao período de 2005 a 2008, ambas as series apresentam os valores dos expoentes da escala menores (mesmo que ainda persistentes), podendo ter sido ocasionadas pelos fenômenos atmosférico-oceânicos<sup>1</sup>, El Niño entre os anos de 2005-2007 de intensidade fraca e o El Niña entre 2007-2008 de intensidade forte. O El Niño é caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais no oceano Pacífico Tropical, e que pode afetar o clima regional e global, mudando os padrões de vento a nível mundial [76].

<sup>1</sup> O El Niño é caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais no oceano Pacífico Tropical, e que pode afetar o clima regional e global, mudando os padrões de vento a nível mundial. O El Niña caracteriza-se por um esfriamento anormal nas águas superficiais do Oceano Pacífico Tropical. Alguns dos impactos de La Niña tendem a ser opostos aos de El Niño, mas nem sempre uma região afetada pelo El Niño apresenta impactos significativos no tempo e clima devido à La Niña [76]

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual cenário mundial, no que tange as mudanças climáticas e crise energética, aponta a necessidade de pesquisas que viabilizem o aproveitamento de outras fontes de energias renováveis, menos exploradas, que compõe a atual matriz energética e são vistas como alternativas. As energias eólica e solar são ditas fontes limpas, e em determinadas regiões, após estudos complementares, podem ser usadas para suprir toda demanda local do uso de energia elétrica. Contudo, associado aos estudos estatísticos e modelagens computacionais, existe a necessidade de investigar não só a natureza de tais fontes de energia, mas a sua viabilidade econômica, social e ambiental, já que, o uso de energia elétrica está diretamente relacionado à qualidade de vida.

Através de métodos da física estatística, aplicados em séries temporais de velocidade de ventos e radiação solar diária, tornou-se possível analisar outras vertentes como a detecção da existência de correlações de longo alcance, que podem ser útil para estudos já existentes envolvendo as fontes de energias apontadas nessa pesquisa. Visto que, a única fonte de energia da Ilha de Fernando de Noronha é através de geradores a óleo diesel, fortemente poluente, não condizendo com os parâmetros de preservação ambiental da ilha.

Para análise de correlações aplicou-se o método *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) sobre os dados de velocidade do vento e radiação solar diária, registrados na Ilha Fernando de Noronha, localizada na região Nordeste do Brasil, no período de 2003 a 2011. Através das análises concluiu-se que, ambas as séries temporais, apresentaram correlações de longo alcance persistentes, entretanto, a velocidade de vento a 10m apresentou maiores expoentes de correlação com maior variabilidade e a radiação solar diária, apresentou menores expoentes de correlação e maior estabilidade de persistência, ou seja, menor variabilidade no período em questão, levando em consideração, as subséries analisadas com tamanho de janela de três anos, deslocando-se a cada sete dias. Todas as séries quando randomizadas apresentaram a perda das correlações, indicando que as correlações de longo alcance não tem origem na distribuição dos valores e sim na organização temporal dos dados.

Os resultados encontrados, nessa pesquisa, devem ser úteis ao desenvolvimento e validação de modelos teóricos e computacionais, que auxiliem as estimativas para a velocidade do vento e a dinâmica da radiação solar em Fernando de Noronha, cuja necessidade em encontrar soluções para implementação de energia elétrica por fontes alternativas é eminente à garantia do desenvolvimento sustentável da ilha. Como trabalho futuro, pode-se verificar se as séries analisadas possuem as propriedades multifractais e se existem as correlações cruzadas entre estas séries (fractais ou multifractais), procedimento útil à avaliação de possibilidade de implementação de um sistema híbrido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Edusp, 2003.[2] BENTLEY, R. W. Global oil & gas depletion. **Energy Policy**, v. 30, p. 189, 2002.
- [3] GELLER, H. S. **Revolução Energética: Políticas para um futuro sustentável**. 1. ed. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.[4] DIAS, F.L.F. **Relação entre produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-açúcar, na região noroeste do estado de São Paulo**. Tese (Mestrado em Agronomia), Piracicaba, SP (Brasil). 1997.
- [5] RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 135-151, 2004.
- [6] FIEDLER, N. C. E. A. Efeito de incêndios florestais na estrutura e composição florística de uma área de cerrado sensu stricto na fazenda Água Limpa-DF. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 129-138, 2004.
- [7] ROVEDDER, A. P. M.; ELTZ, F. L. F. Revegetação com plantas de cobertura em solos arenizados sob erosão eólica no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 315-321, 2008.
- [8] ROBERTA, A. S. et al. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, p. 501-509, 2010.
- [9] TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da UFPE. 2000.
- [10] COLLE, S.; PEREIRA, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil: primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície**. Brasília: INMET. 1998.

- [11] CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. **Estimativa de radiação solar por satélite: Desempenho do modelo operacional GL1.2.** Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza: SBMET. 2004. p. 13.CD-ROM.
- [12] FERNANDO R. M. et al. **Solar and wind resources database to support energy Policy and investments in south america.** Proceedings of IV Biennial International Workshop "Advances in Energy Studies". Unicamp, Campinas, SP, Brazil. June 16-19, 2004. p 419-427.
- [13] AMARANTE, O. A. C.; ZACK, M. B. J.; SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** Brasília: Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, Brazil, 2001.
- [14] IVANOV, P. C.H. et al. Levels of complexity in scale-invariant neural signals, **Physical Review E** **79**, 041920, 2009.
- [15] TSONIS, A. A.; ROEBBER, P. J.; ELSNER, J. B. Long-range correlations in the extratropical atmospheric circulation: origins and implications. **Journal of Climate**, v.12, p.1534-1541, 1999.
- [16] COSTA, R. L.; VASCONCELOS, G. L. Long-range correlations and nonstationarity in Brazilian stock market. **Physica A.** Netherlands, v.329, p. 231 - 249, 2003.
- [17] FIEDLER-FERRARA, N.; PRADO, C.P.C. do.; **Caos: Uma Introdução**, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1994
- [18] RANGARAJAN, G., DING, M. Integrated approach to the assessment of long-range correlations in time series data. **Physical Review E**, v.61, pp. 4991 - 5001, 2000.
- [19] KANTELHARDT, J. W. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. **Physica A** **316** , 87-114 (2002).
- [20] Sistema Integrado de Dados Ambientais. **SINDA**. Disponível em: <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>>. Acesso em: 15 fevereiro 2013.

- [21] MATSOUKAS, A.; ISLAM, S.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamfall time series, **Journal of geophysical research** **105**, 105 - 129, 2000.
- [22] VAROTSOS, P. A.; SARLIS, N. V.; SKORDAS, E.S. Detrended fluctuation analysis of the magnetic and electric field variations that precede rupture, **Chaos** **19**, 023114, 2009.
- [23] KIRALY, A.; JANOSI, I. M. Detrended fluctuation analysis of daily temperature records: Geographic dependence over Australia, **Meteorology and Atmospheric Physics** **88**, 119 - 128, 2005.
- [24] HU, K. et al. Effects of trends on detrended fluctuation analysis, **Physical Review E** **64**, 011114, 2001.
- [25] Hardstone et al. Detrended fluctuation analysis: a scale-free view on neuronal oscillations, **Frontiers in Physiology**, November 2012 | Volume 3 | Article 450.
- [26] C.- K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, A. L. Goldberger, Mozaic organization of DNA nucleotides, **Physical Review E** **49**, 1685 -1689, 1994.
- [27] MENDONÇA, F.; OLIVEIRA, D.; MORESCO, I. **Climatologia: Noções básicas e Clima no Brasil**, Oficina de Textos, 2007.
- [28] TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia**, **Geographica**, 2008
- [29] MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.30, n.1,1304.2008.
- [30] DEMIRICI, E.; CUHADAROGLY, B. Statistical analysis of wind correlation and air pollution in urban Trabzon. **Energy and Buildings**, v. 31, pp. 49-53, 2000.
- [31] FRIEDMAN, J.; BARRET, S.C.H. **Wind of change: new insights on the ecology and evolution of pollination and mating in wind pollinated plants**. *Annals of Botany*, v. 103, pp. 1515-1527, 2009.

- [32] JONGEJANS, E.; TELENIUS, A. Field experiments on seed dispersal by wind in tem umbelliterous species (Apiaceae). **Plant Ecology**, v. 152, pp. 67-78, 2004.
- [33] PIMENTA, F.; KEMPTON, W.; GARVINE, R. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the ofshore wind power resource of Southeastern Brazil. **Renewable Energy**, v. 33, pp. 2375-2387, 2008.
- [34] PAZ, S.; BROZA, M. Wind direction and its linkage with vibrio cholerae dissemination. **Environmental Health Perspectives**, v. 115, p. 195-200, 2007.
- [35] GASCH, R.; TWELE, J. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Berlin: Solarpraxis AG, 2002.p.365- 380.
- [36] F.K. Lutgens and E.J. Tarbuck, *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology* (Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1995), 6<sup>th</sup> ed.
- [37] MARCOS, M. S. C. L. METEOROLOGIA SINÓTICA. **Master IAG**, 2004. Disponível em:  
<<http://www.master.iag.usp.br/ensino/Sinotica/AULA15/AULA15.HTML>>. Acesso em: 28 Dezembro 2012.
- [38] ALVES, Jose Jakson Amancio. **Estimativa da Potência, Perspectiva e Sustentabilidade da Energia Eólica no Estado do Ceará**. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Pos-Graduacao em Recursos Naturais. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) 163p, 2006.
- [39] B.J.M. De Vries, D.P. van Vuuren and M.M. Hoogwijk, **Energy Policy** **35**, 2590, 2007..
- [40] ALVES, Jose Jakson Amancio. Análise regional da energia eólica no Brasil. **G&DR** .v. 6, n.1, p. 165-188, 2010.
- [41] ROBERTA, A, R.; SILVA, et al. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira Eng. Agríc. Ambiental**, v.14, n.5, p.501–509, 2010.

- [42] LOHMANN, S.; SCHILINGS, C.; MAYER, B.; MEYER, R. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. **Solar Energy**, v.80, n.11, p.1390-1401, 2006.
- [43] OHMURA, A.; LANG, H. **Secular variação da radiação global na Europa**. Em Lenoble, J. e Geleyn, J.-F. (Eds.): IRS'88: problemas atuais de radiação atmosférica, A. Deepak Publ, Hampton, VA, 298-301, 1989.
- [44] LIEPERT, B. G.; TEGEN, I. Multi-decadal solar radiation trends in the United States and Germany and direct tropospheric aerosol forcing. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.D12, 2002.
- [45] QIAN, Y.; KAISER, D. P.; LEUNG, L. R.; XU, M. More frequent cloudfree sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. **Geophysical Research Letters**, v.1, n.33, L01812, 2006.
- [46] BENEDUCE, F.C.A. **Energia solar fotovoltaica sem mistérios**. Fortaleza: Banco do Nordeste, p.78,1999.
- [47] Universidade Federal Paraná. **UFPR**, 2000. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/luischan/celulafoto.htm>>. Acesso em: Dezembro 2012.
- [48] História do Mundo. **Portal Brasil Escola**. <<http://www.historiadomundo.com.br/curiosidades/o-mapa-de-cantino.htm>> Acesso em dezembro de 2012.
- [49] Criando fractais. **Portal Mathematikos UFRGS**. <<http://mathematikos.mat.ufrgs.br/disciplinas/ufrgs/mat01039032/webfolios/grupo6/fractais/>> Acesso em fevereiro de 2013.
- [50] PEITGEN, Heinz-Otto e outros. **The beauty of fractals**. New York : Springer-Verlag, 1986.
- [51] MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. San Francisco: Freeman, p.468, 1982.

- [52] SECCO, Fernando R.; ROCHA, Tatiane T. **Fractais**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2004.
- [53] KOCH, H.V. Une méthode géométrique Elémentaire pour l'Étude de perguntas certaines de la Theorie des Courbes aviões. **ACTA MATH** , vol. 30, no. 1, pp 145-174, 1906.
- [54] CRILLY, A. J. e outros. **Fractals and chaos**. New York : Springer-Verlag, 1991.
- [55] PEITGEN, Heinz-Otto e outros. **The science of fractals images**. New York : Springer-Verlag, 1988.
- [56] PENG, C. K. et al. Long-range anticorrelations and non-gaussian behavior pf the heartbeat. **Physical Review Letter**, United States, v.70, p.1343 - 1346, 1993.
- [57] HAUSDORFF, J. M. et al. Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in the stride interval of human gait. **Journal of Applied Physiology**, United States, v. 78, p.349-358, 1995.
- [58] SZETO, H. et al. Fractal properties of fetal breathing dynamics. **The American Journal of Physiology**, United States, v. 263, p. 141-147, 1992.
- [59] MARCH D. J.; OSBORN J. L.; CONLEY A. W. 1/f fluctuations in arterial pressure and regulation of renal blood flow in dogs. **The American Journal of Physiology**, United States, v. 258, p. 1394 - 1400, 1990.
- [60] GOLDBERGER A. L.; KOBALTER K.; BHARGAVA V. 1/f like scaling in normal neutrophil dynamics: implications for hematological monitoring, **IEEE transactions on bio-medical engineering**, United States, v. 33, p.874 - 876, 1984.
- [61] NOGUEIRA, R.A., VARANDA, W.A., LIEBOVITCH, L.S. Hurst analysis in the study of ion channel kinetics. **Braz. J. Med. Biol. Res.** **28**, 491 - 496, 1995.
- [62] MENDONCA, M. B. M. et al. **Análise fractal da vasculatura retínica: métodos de segmentação e de cálculo dimensional**. Arq. Bras. Oftalmol. [online]. 2007, vol.70, n.3, pp. 413-422. ISSN 0004-2749.

- [63] RIEDI, R.H. processos multifractais . Em: dependência de longo alcance: teoria e aplicações ., ed P. Doukhan , G.Oppenheim , MS Taqqu , pp 625-715. Birkhauser, Boston , 2002
- [64] H. E. HURST, Long-term storage capacity of reservoirs, **Transaction of American Society of Civil Engineers** **116**, 770 - 808, 1951.
- [65] BERAN, J. **Statistics for Long-memory Processes**. Chapman Hall, New York, 1994.
- [66] KANTELHARDT, J. W. **Fractal and multifractal time series**. In: Encyclopedia of Complexity and Systems Science; preprint arXiv: 0804.0747, Springer, 2009.
- [67] FEDER, J. **Fractals**. Plenum Press, New York, 1988.
- [68] BUNDE, A. et al. Correlated and uncorrelated regions in heart-rate fluctuations during sleep, **Phys. Rev. Lett.** v. 85, p. 37-36, 2000.
- [69] ARIANOS, S.; CARBONE, A. Detrending moving average algorithm: A closed-form approximation of the scaling law. **Physica A** 382, p.9-15,2007.
- [70] CARBONE, A.; CASTELLI, G.; STANLEY, H.E. Analysis of clusters formed by the moving average of a long-range correlated time series, **Phys. Rev. E** 69, 026105, 2004.
- [71] G. F. Gu and W. X. Zhou, Detrending moving average algorithm for multifractals, **Phys. Rev. E** 82, 011136, 2010.
- [72] XU, L. M. et al. Quantifying signals with power-law correlations: A comparative study of detrended fluctuation analysis and detrended moving average techniques, **Phys. Rev. E** 71, 051101, 2005.
- [73] ALESSIO, E.; CARBONE, A.; CASTELLI, G.; FRAPPIETRO, V. Second-order moving average and scaling of stochastic time series, *Eur. J. Phys.* **B** 27, p. 197, 2002.
- [74] TALLURI, S.; SARKIS, J. Health Care Efficiency Measures. **International Journal**. *Prod. Res.* 74, p. 47, 2004.

- [75] CARBONE, A.; CASTELLI, G.; STANLEY, H. E. "Time-Dependent Hurst Exponent in Financial Time Series," **Physica A** 344, p. 267-271, 2004.
- [76] Centro de Previsões e Estudos Climáticos, 2010. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 15 janeiro 2013.