



Otimização de Portfólios de Geração Eólica

Adriana Nunes, João Caldas, Paulo Campos, Vicente Ferrer

Departamento de Engenharia/Casa dos Ventos

Av. Brigadeiro Faria Lima 2055 12º Andar, São Paulo-SP, Brasil

joao.caldas@casadosventos.com.br

Resumo: Com a abordagem por métodos de otimização por busca combinatória foi possível otimizar um problema de portfólio de geração de eletricidade por fonte eólica. Este conceito se baseia na otimização de problemas complexos por variação probabilística das soluções candidatas. Um trabalho extenso de coleta de dados públicos e tratamento analítico de dados do setor elétrico brasileiro foi desempenhado, agregando e compilando informações que permitiram a realização do estudo com grande relevância para a expansão da matriz elétrica do país. O trabalho apresenta um problema de otimização de portfólio de projetos eólicos em operação. Os resultados e conclusões permitem novos caminhos para atribuições de novas características da geração no ambiente competitivo de viabilização de novos projetos eólicos.

Palavras-chave: Geração Eólica, Otimização, Complementaridade, Portfólio Ótimo de Markowitz, *Simulated Annealing*.

INTRODUÇÃO

As fontes de energias renováveis tiveram grande crescimento na última década em todo o mundo. Em 2014, 23% da energia mundial já é atendida por fontes renováveis, enquanto a previsão para 2030 é que este percentual seja de 45% (IRENA, Planning for the Renewable Future, 2017). No Brasil não está sendo diferente. A matriz energética do Brasil já é uma das mais renováveis do mundo, mais de 40% da matriz energética brasileira já é renovável (EPE, Matriz Energética e Elétrica, 2018) devido ao aproveitamento do potencial de geração de eletricidade por fonte hidrelétrica e produção de biocombustíveis como o álcool. Mais recentemente, a fonte eólica também tem contribuído para a transição renovável do país com um crescimento acelerado, devendo se tornar a segunda fonte de energia elétrica do país em breve.



Com o crescimento das fontes de energia elétrica renováveis intermitentes, a exemplo pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e solares, algumas outras questões de planejamento e de operação do sistema elétrico interligado passam a ter maior destaque no setor elétrico. A partir do momento em que a geração de eletricidade dessas fontes têm um maior percentual da carga, existe a preocupação com a segurança do suprimento de energia, uma vez que existe uma incerteza da geração elétrica eólica e solar.

Recentemente, mudanças regulatórias têm alterado a forma de contratação de energia elétrica proveniente dessas fontes no ambiente regulado, em leilões de energia (ACR) (ANEEL, Ambiente de Contratação Regulada (ACR), 2018). Antes a contratação de energia eólica era tipicamente como produto “disponibilidade” em contabilizações quadrienais de energia. Ou seja, a comparação entre a energia vendida em contrato e a geração realizada era feita a cada 4 anos, com mecanismos de compensação diluídos no fluxo de caixa dos empreendimentos. A partir de 2018, a contabilização de energia passou a ser anual sob a forma do produto “quantidade” (MME, PORTARIA No 121, DE 4 DE ABRIL DE 2018., 2018). Portanto, os novos empreendimentos passaram a ter o compromisso da entrega da energia em base mensal, podendo estar expostos à compensações maiores num curto período no caso de exposições negativas do preço da energia no mercado de curto prazo.

Dessa maneira, as variações de produção associadas à sazonalidade de geração que estavam no portfólio da carga (distribuidoras) e passam a ser risco gerenciado pela geração (investidor). Deve-se entender que a alocação de mais risco da geração está sendo transferida para o gerador de energia, justificada pelo argumento que o gerador pode ter maior conhecimento sobre a geração de suas usinas.

Por outro lado, o sistema elétrico e o parque gerador do país se beneficiam do efeito portfólio de um amplo conjunto de usinas de geração com características distintas com grande dispersão geográfica em um país com dimensões continentais e diversidade dos recursos naturais. Dessa forma, pode ser necessário repensar a alocação de alguns riscos que pode ser suportado pelo portfólio e pode não ser suportado por alguns geradores.

Ao mesmo tempo, as novas tecnologias de *BigData* têm despertado maiores possibilidades e contribuído para análises mais profundas e detalhadas do sistema elétrico à medida que mais dados estão sendo disponibilizados. Entre outras possibilidades, análise descritiva e inferência de modelos baseados em base de dados cada vez maiores. Observa-se uma área promissora para aplicação de modelos sofisticados na área de séries temporais e



composição de portfólios. Além disso, modelos preditivos cada vez mais complexos para mitigar deficiências operativas do sistema e redução do risco de suprimento têm sido desenvolvidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) em parceria com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que entre outros projetos, desenvolve a utilização de diversas fontes de previsão meteorológica com redes neurais para mescla dos conjuntos de previsões (ensemble) (CEPEL, 2018). Este projeto destinou-se ao estudo do portfólio atual de projetos eólicos, análise da competição de novos projetos eólicos e efeito da inserção desses novos projetos na matriz elétrica, levando em consideração a possibilidade de melhor aproveitamento do recurso disponível com minimização da variabilidade da geração. Entre outras técnicas utilizadas neste estudo, estão o acesso à diferentes fontes de dados públicos, verificação, validação e exploração descritiva dos dados com aplicação de modelos de otimização para avaliação da competição e contribuição dos novos projetos eólicos para o portfólio de geração eólica do Brasil.

OBJETIVO

Definir e otimizar um problema de composição de portfólio de geração eólica com projetos existentes. O problema de otimização considera variáveis de preço e custo de energia, e volatilidade horária da geração eólica.

MÉTODOS

O problema de otimização foi definido da seguinte forma: “*Dados os conjuntos geradores existentes, qual a composição desses projetos deveria formar um portfólio de geração eólica com menor custo e menor volatilidade da geração? Ou seja, existe alguma complementaridade dos conjuntos geradores existentes a um preço razoável?*”

Formulação matemática:

Função objetivo: $f_o = p * \sigma$

Onde:

p : preço médio da energia do portfólio: média ponderada por quantidade de energia

σ : volatilidade do portfólio de geração eólica (desvio padrão da geração horária)

A otimização deve ser conduzida de maneira a minimizar a função objetivo. A variável a ser otimizada é um vetor com as quantidades de energia de cada conjunto gerador (e_i). As quantidades de energia de cada conjunto gerador (e_i , em MWh) devem ser positivas e menor que a garantia física (GF_i) somada das usinas de um mesmo conjunto gerador (ou seja, a energia equivalente à potência média do conjunto gerador). A soma das quantidades de energia (e_i) de todos os conjuntos geradores deve atender uma potência média mínima (E_{min}). Ou seja:

$$p = \sum p_i e_i ; w_i = \frac{e_i}{\sum p_i e_i} ; \sigma^2 = \mathbf{w} * \text{cov}(\mathbf{G}) * \mathbf{w}$$

Com as condições:

$$(i) \sum e_i \geq E_{min}$$

$$(ii) \sum e_i \leq E_{max}$$

$$(iii) 0 \leq e_i \leq GF_i$$

Onde G são as séries horárias de geração dos conjuntos geradores eólicos e $\text{cov}(G)$ a matriz de covariância dessas séries temporais. E p_i é o preço médio do conjunto gerador, média ponderada do preço da energia dos projetos que compõem cada conjunto gerador.

Existem alguns métodos apropriados para otimização de portfólios (*Simulated annealing*, *particle swarm*, *genetic algorithms*, etc). Neste estudo foi utilizado o *Simulated Annealing*. Este método de otimização combinatória (meta-heurística) tem esse nome (traduzido como “recozimento simulado”) pela analogia com um processo termodinâmico utilizado na metalurgia para obtenção de sólidos com baixa energia interna. Analogamente, à medida que a “temperatura” vai diminuindo, soluções próximas do espaço de soluções vão se “acomodando”.

DESCRIÇÃO DOS DADOS

Para os empreendimentos existentes, foram consideradas as usinas participantes de conjuntos geradores de onde foi possível obter as séries de geração horárias do ONS. Os dados foram considerados a partir de 2015 e foram baixadas as séries horárias dos conjuntos geradores até julho/2018 (3,5 anos). A informação de geração não é disponibilizada pelo ONS

por usina, mas por um conjunto de usinas próximas, sendo necessária a associação das usinas e seus respectivos conjuntos geradores. Neste estudo foram considerados dados de 79 conjuntos geradores, que abrangem 395 usinas eólicas associadas. Com os dados de geração das usinas é possível verificar a estrutura de correlação desses conjuntos geradores na Figura abaixo:

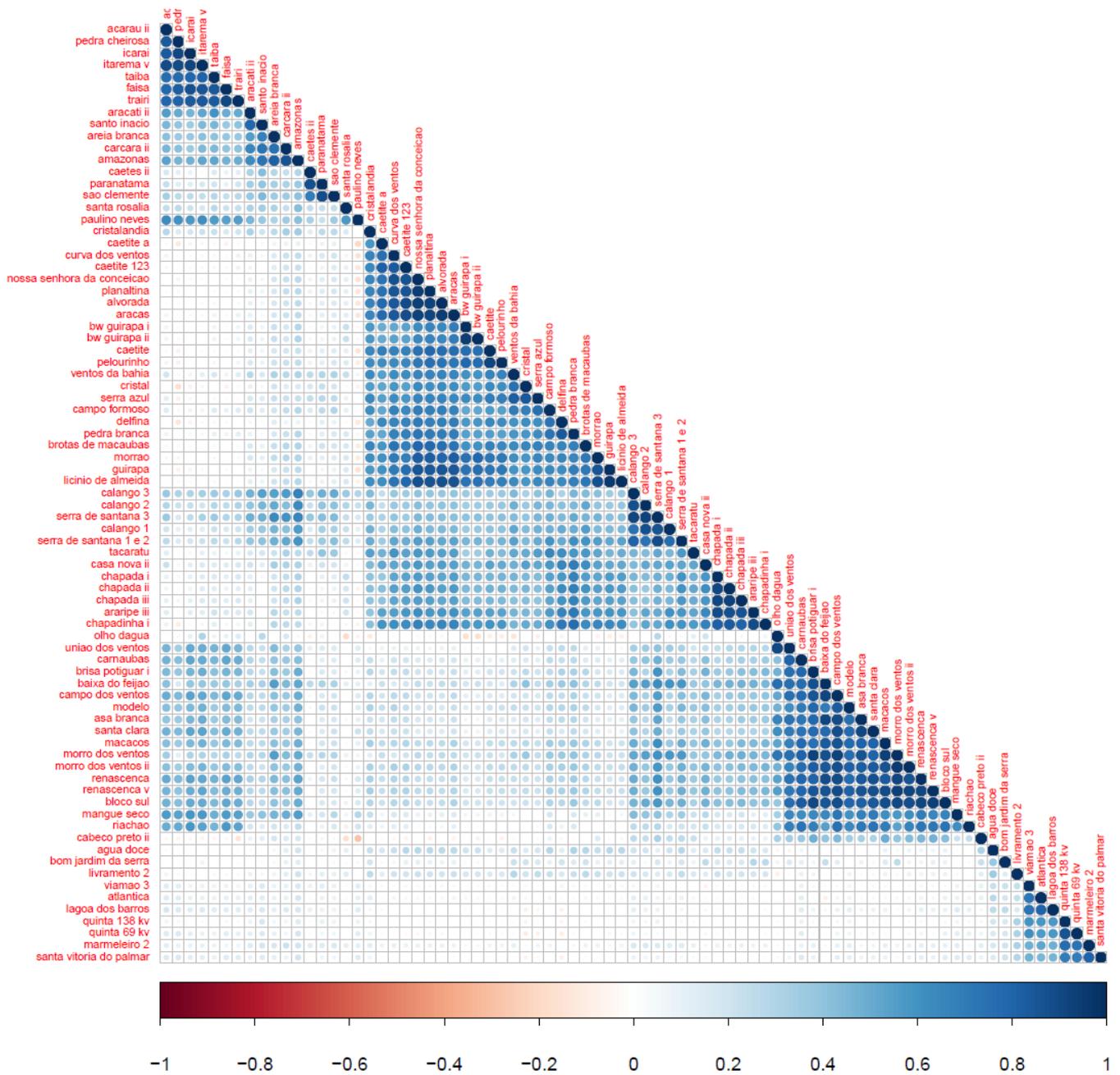


Figura 1 - Estrutura de correlação da geração horária dos conjuntos geradores eólicos do Brasil.

A técnica de análise de componentes principais foi adotada com as séries históricas de geração para identificação de uma quantidade mínima de componentes necessária para

descrever cerca de 90% da variância do conjunto de dados. A partir desse número de componentes principais, as séries históricas foram agrupadas em conjuntos de séries mais correlacionadas.

O agrupamento hierárquico foi realizado com as correlações entre as séries de geração eólica. Esse método consiste em um algoritmo onde cada projeto é atribuído ao seu próprio grupo de correlação e, em seguida, o algoritmo procede iterativamente unindo outros grupos mais semelhantes, continuando até que haja apenas um único grupo. As distâncias entre os grupos são recalculadas pela fórmula de atualização de dissimilaridade de Lance - Williams, de acordo com o método de agrupamento, em particular foi utilizado o método de Ward.

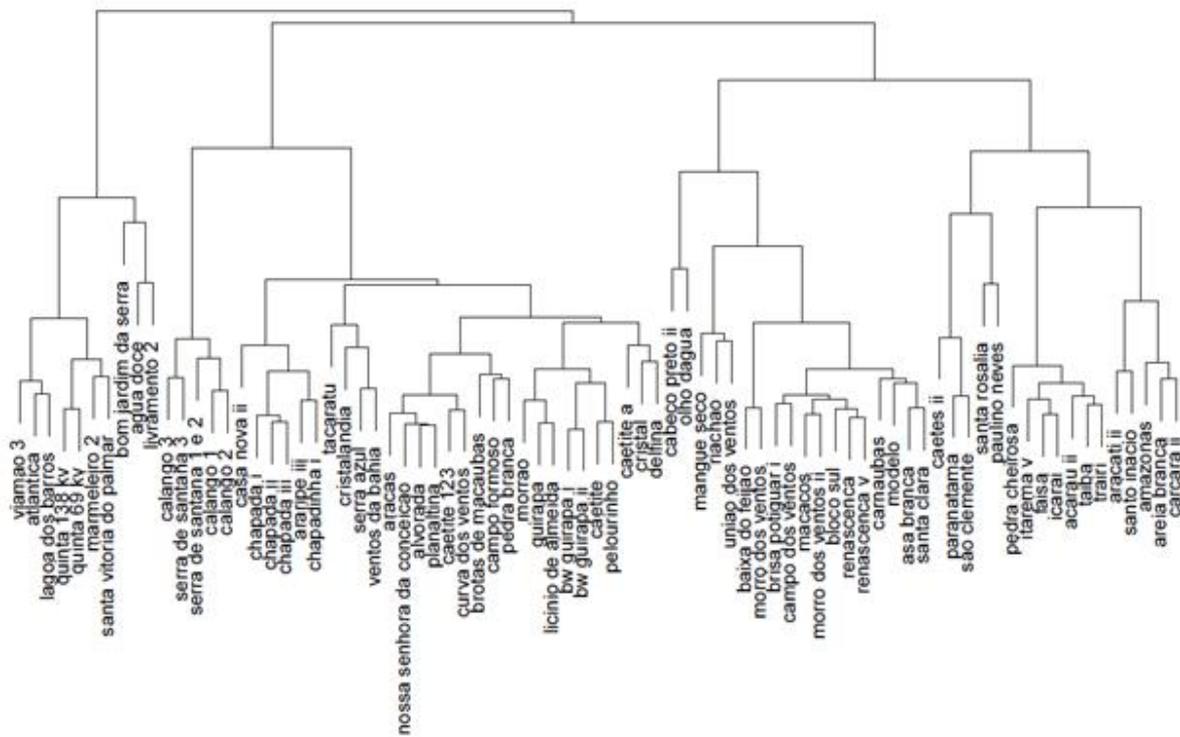


Figura 2 - Dendrograma do agrupamento de conjuntos geradores eólicos por correlação da geração horária.

Os agrupamentos de conjuntos geradores com maior correlação estão mostrados em mapa na figura abaixo. 12 grupos de conjuntos geradores foram definidos de acordo com a similaridade da geração horária, que foi refletida em localização geográfica próxima.

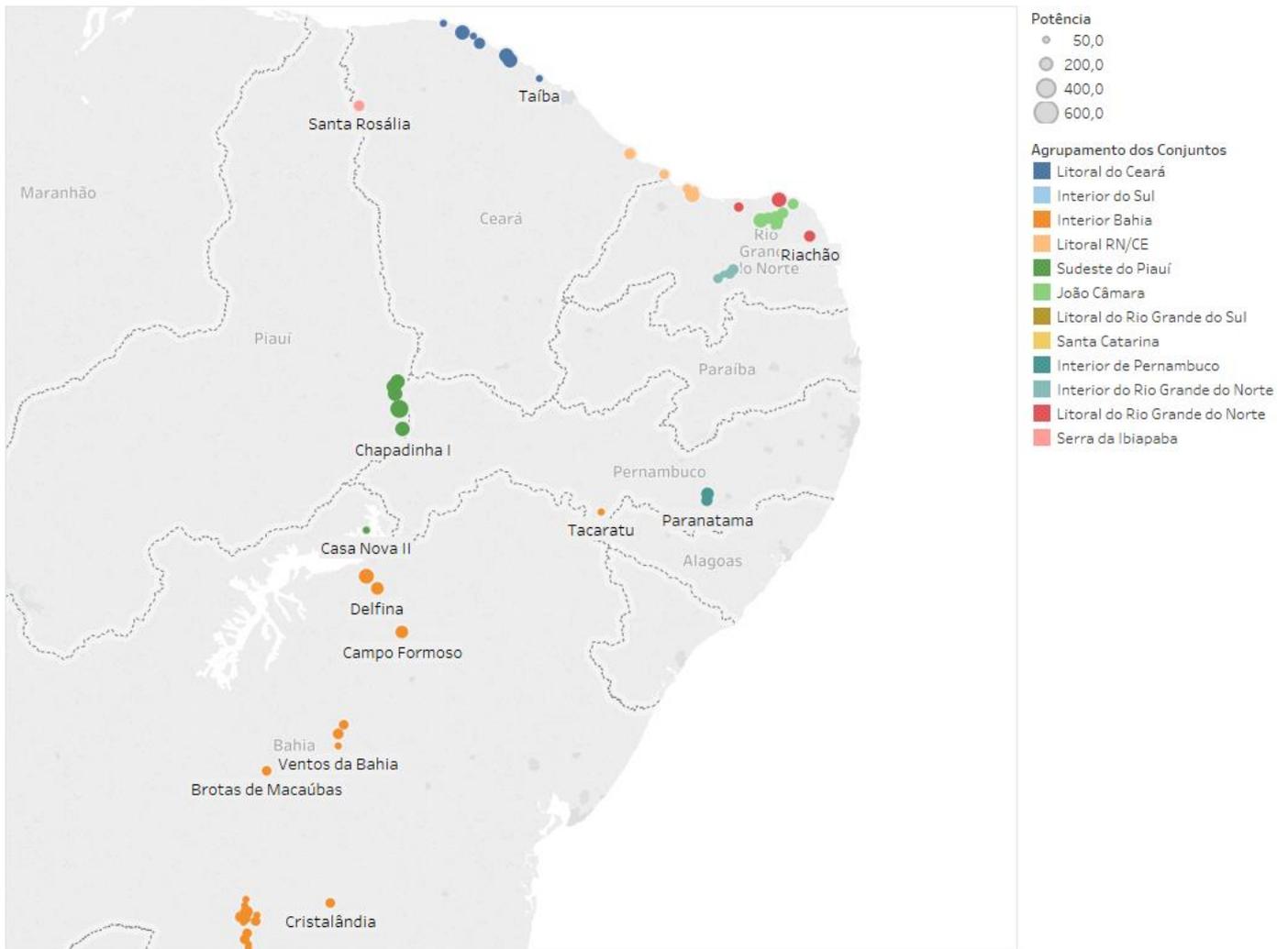


Figura 3. Localização geográfica dos conjuntos geradores agrupados por correlação da geração horária.

A partir dos agrupamentos de similaridade da geração eólica, também é possível observar perfis de geração mais complementares, a exemplo os perfis diurnos de geração horária média para dois conjuntos geradores potencialmente complementares.

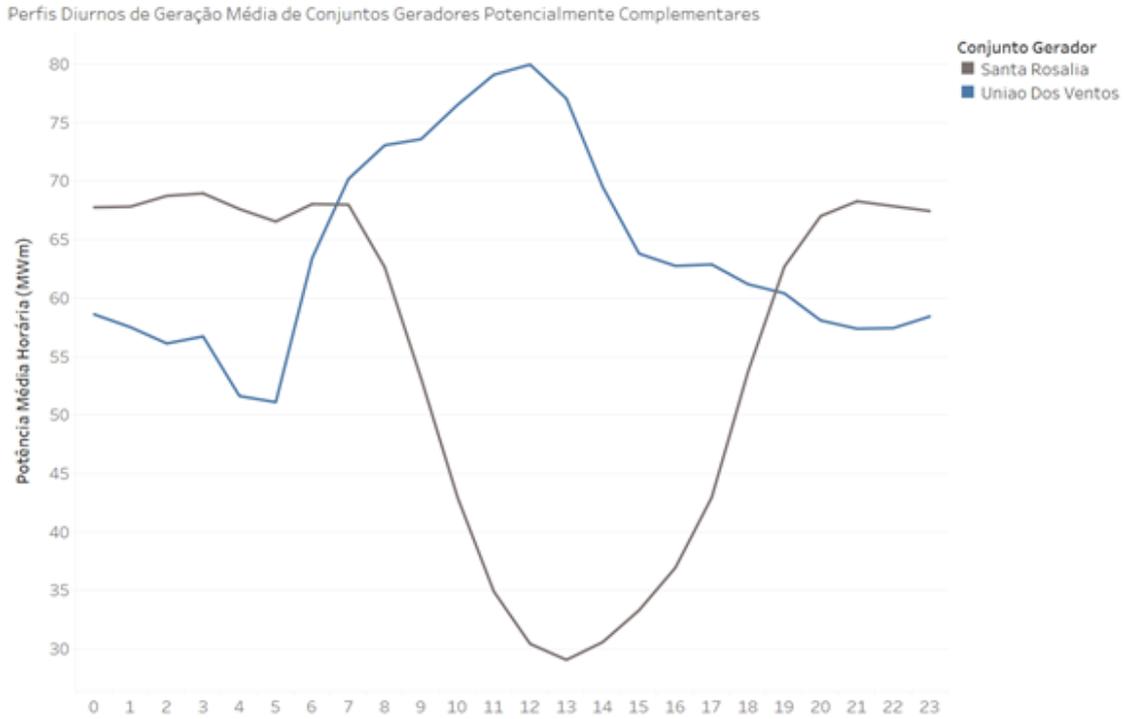


Figura 4. Perfis Diurnos de Geração Média de Conjuntos Geradores Potencialmente Complementares

Para estimativa do custo de energia, foram utilizados dados históricos da CCEE corrigidos a IPCA.

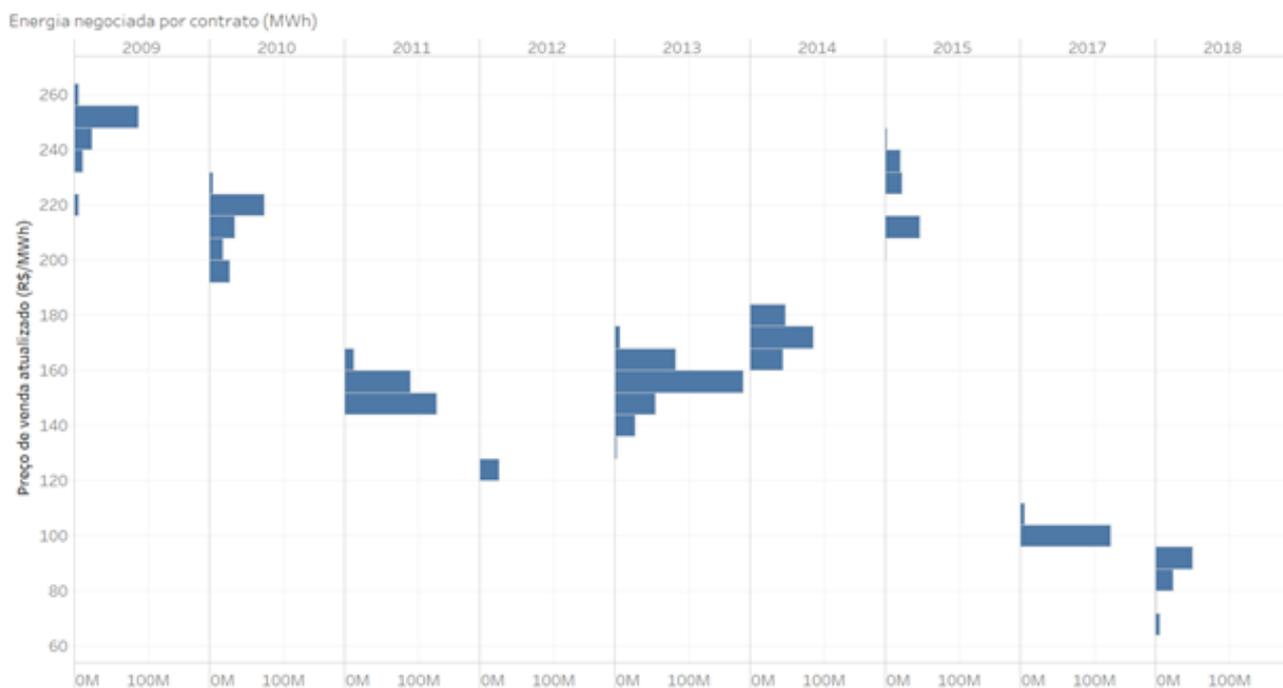


Figura 5. Histórico de contratação de energia eólica no mercado regulado. Quantidade de energia negociada em MWh por ano em função do preço de venda atualizado (R\$/MWh).

RESULTADOS

Nesta seção serão apresentadas as características do portfólio ótimo: quantidade de energia média de cada conjunto gerador, percentual da respectiva garantia física, percentual na composição do portfólio, preço médio e volatilidade da geração horária.

Com as exclusões de alguns conjuntos geradores, um total de 8715 MW em capacidade instalada de projetos eólicos foram utilizados na simulação, com equivalente a 3580 MWm em garantia física total (energia média por tempo ou quantidade de energia máxima disponível para comercialização). Uma meta de energia média em 1500 MWm foi adotada para uma solução inicial.

Abaixo a próxima figura ilustra o processo de otimização para obtenção da carteira de projetos (portfólio) eficiente de Markowitz, com menor volatilidade da geração horária.

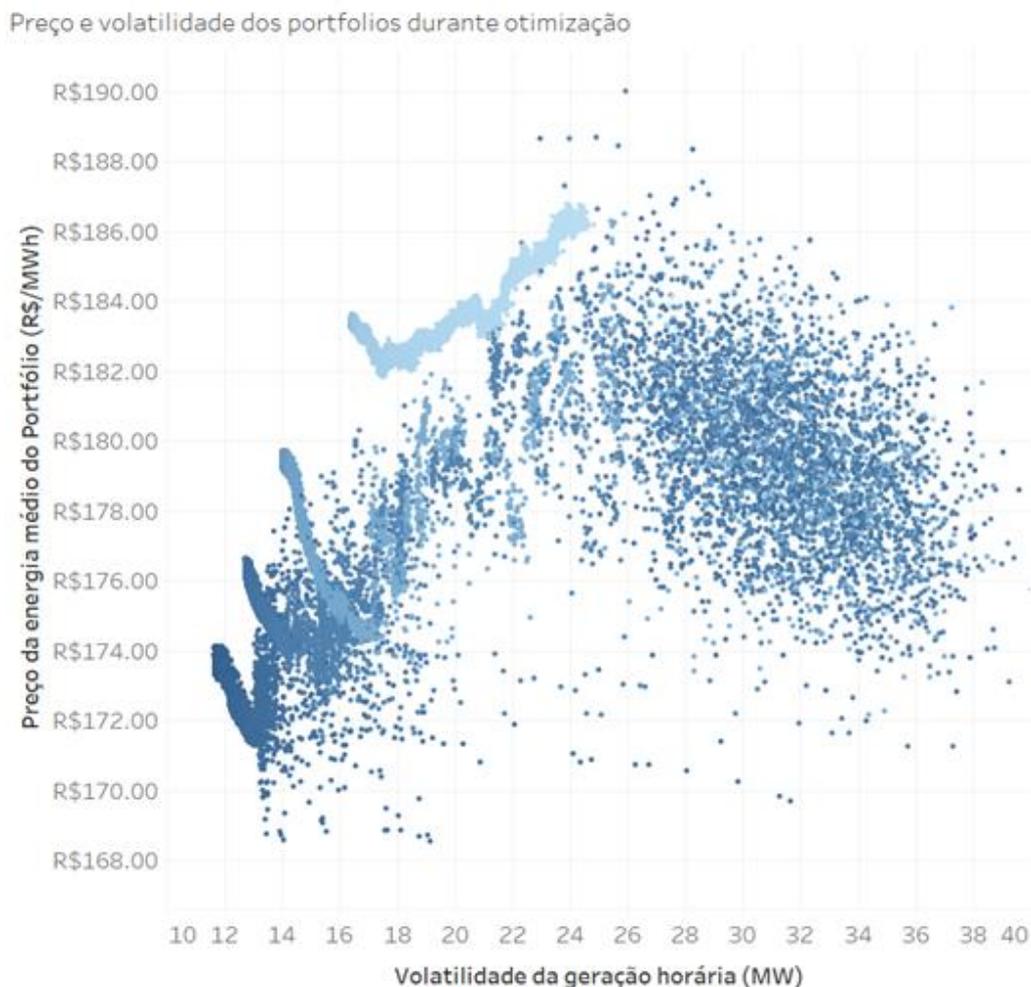


Figura 5. Portfólios simulados durante processo de otimização, escala de cores em função da evolução do processo de otimização, em torno de 87 mil iterações.



Os pontos que formam um caminho estão entre as perturbações próximas à solução atual (exploit) e pontos em nuvem dispersa como alternativas de diferenciação da solução atual (explore).

A seguir tem-se o resultado da solução ótima com a alocação de energia dos conjuntos geradores, percentual da capacidade de cada projeto, e o preço médio da energia.

Percebe-se uma tendência de alocação da energia demandada em conjuntos geradores com menor preço médio de energia. O portfólio de conjuntos geradores total considerado para otimização tem um preço médio ponderado pela garantia física (GF) de R\$179,59/MWh, enquanto o portfólio otimizado tem um preço médio em torno de R\$173,50/MWh. Ou seja, embora não muito significativo, o portfólio com menor custo de energia pode ser otimizado com menor volatilidade horária da geração eólica.

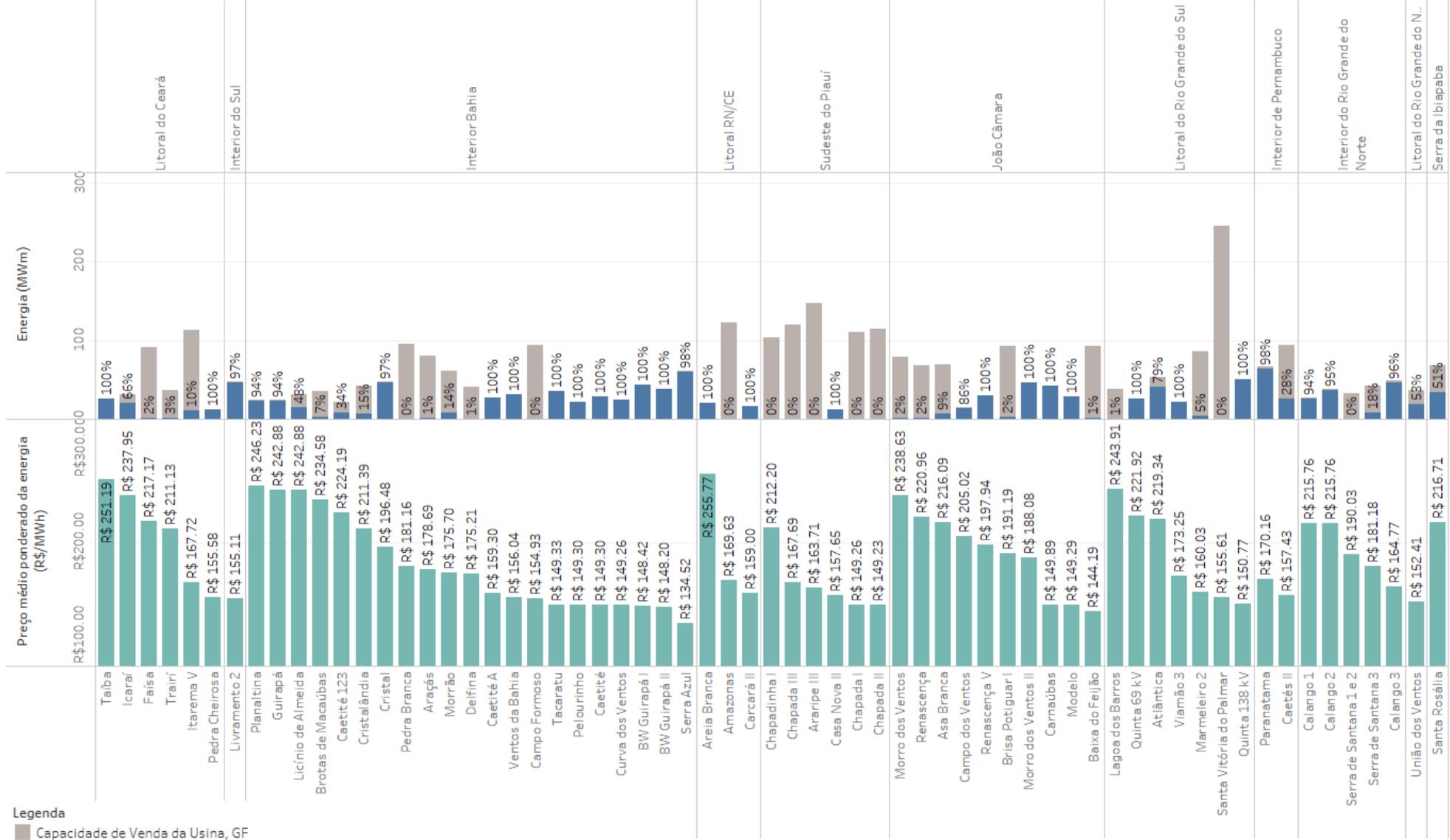


Figura 6. Composição do portfólio para demanda de 500 MWh.

Portfólio Otimizado para 1500MWm

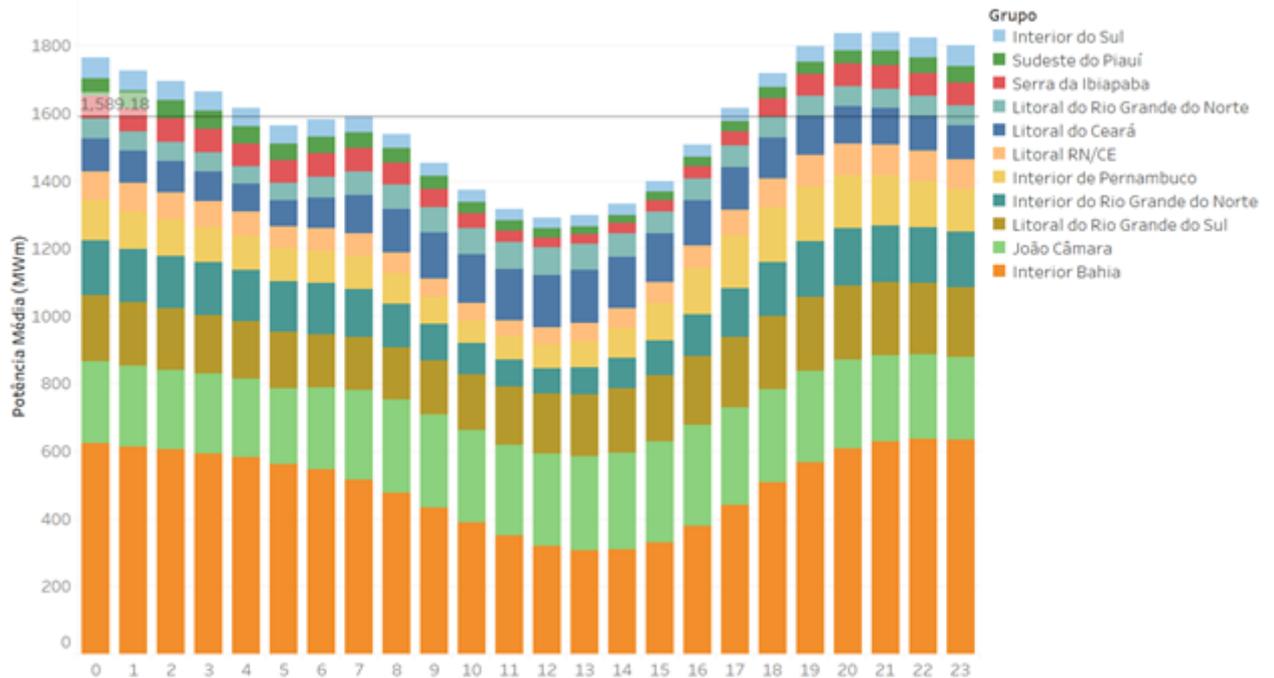


Figura 7. Perfil diurno médio do portfólio e composição dos conjuntos geradores da solução otimizada por região dos conjuntos geradores que compõe o portfólio.

É possível verificar, que o perfil diurno médio do portfólio é bem menos volátil que as variações dos perfis diurnos médios de geração dos conjuntos isolados. Esse efeito portfólio representa sinergia e redução de custos relativos a adequação da geração eólica ao sistema interligado nacional. Observa-se alguma complementaridade mais acentuada aos demais conjuntos geradores de usinas situadas no litoral do Rio Grande do Norte, sendo quase toda a garantia física disponível alocada, apesar de menos capacidade instalada que outras regiões.

Mesmo com um perfil diário médio mais constante, é possível perceber que ainda permanece uma característica forte da geração eólica noturna, especialmente pela grande proporção no portfólio dos projetos no interior da Bahia. Verifica-se então uma oportunidade para portfólios mistos com outras fontes, especialmente usinas solares fotovoltaicas, que estão em momento de grande expansão de oferta, devido ao aumento da competitividade de seu custo de energia. A verificação de portfólios mistos ficou como sugestão para trabalhos futuros.



CONCLUSÃO

Apresentou-se uma abordagem para composição de portfólios de geração eólica, um tema complexo de negócio, atual e com fundamental importância para expansão da geração de eletricidade por fontes renováveis. Apesar de não avaliada a inserção de novos projetos na matriz de geração eólica existente, o problema de otimização pode ser adaptado de maneira a considerar as séries horárias de geração existentes e os respectivos pesos de seus conjuntos geradores e, desta forma, otimizar um portfólio de novos projetos a serem inseridos no sistema de maneira ótima, subsidiando uma formulação matemática para a definição de complementaridade no longo prazo.

Entre outras abordagens sugeridas para trabalhos futuros, estão:

- Criar um modelo de precificação da energia de novos projetos de geração
- Incluir outras fontes ao portfólio de geração. Já é conhecida a complementaridade horária entre as fontes solar e eólica, de modo que é possível investigar onde essa correlação é mais negativa. Normalmente regimes de ventos em serras apresentam maior geração a noite, sendo uma boa oportunidade de associação com a geração solar.
- Precificar a volatilidade da geração horária, com as séries temporais do portfólio de geração e histórico de preços no mercado à vista de energia. Através dessa precificação, será possível estabelecer pontos de equilíbrio econômico-financeiro para usinas com sistemas de armazenamento de energia, auxiliando a viabilização desses sistemas e identificando oportunidades em projetos específicos de geração de energia elétrica.
- O estudo de portfólio foi feito com projetos em localizações muito distantes, como nordeste e sul do país. Pode ser interessante fazer a análise se restringindo às usinas de uma determinada região, pois podem existir restrições à expansão devido à infraestrutura do sistema de transmissão.



REFERÊNCIAS

- ANEEL. (2018). *Ambiente de Contratação Regulada (ACR)*. Fonte: <http://www.aneel.gov.br/ambiente-de-contratacao-regulada-acr>
- CEPEL. (2018). *Modelo Ventos*. Fonte: <http://www.cepel.br/produtos/ventos-previsao-e-geracao-de-cenarios-de-ventos.htm>
- EPE. (2018). *Matriz Energética e Elétrica*. Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
- IRENA. (2017). *Planning for the Renewable Future*. Fonte: http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Planning_for_the_Renewable_Future_2017.pdf
- MME. (2018). *PORTARIA No 121, DE 4 DE ABRIL DE 2018*. Fonte: http://www.mme.gov.br/documents/10584/52444163/Portaria_n_121-2018/7ccaf512-b5ae-43df-beaa-ed7ef687c374;jsessionid=B4148CCABB45CBA6B4F7EA448FE56E23.srv155

BIOGRAFIA

João Caldas – Natural de Recife/PE e nascido em 03 de julho de 1987, formou-se em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo ITA (2012). Trabalhou com modelagem CFD para turbinas à gás na Alstom Power Switzerland. Possui MBA em *BigData* e *Analytics* pela FGV. Com sete anos trabalhando no setor eólico, acumula experiência em prospecção *greenfield* de recursos eólicos e projeto de parques eólicos na Casa dos Ventos.