



GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

ESTIMAÇÃO DE PONTOS DE CONEXÃO PARA NOVAS SOLUÇÕES DE TRANSMISSÃO NO CONTEXTO DO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO CONSIDERANDO INCERTEZAS

RODRIGO RODRIGUES CABRAL(1);THAÍS PACHECO TEIXEIRA(1);TIAGO CAMPOS RIZZOTTO(1)
EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA - EPE(1)

RESUMO

A representação do potencial de geração eólica e solar nos estudos de planejamento da transmissão faz parte das etapas iniciais da realização dos estudos e compõem parte importante das premissas. Tradicionalmente os pontos de conexão são escolhidos por método empíricos embasados pela experiência dos analistas. O trabalho investiga uma metodologia com a finalidade de aumentar a objetividade da etapa de representação do potencial de geração para estudos de transmissão ao mesmo tempo que leva em consideração as incertezas de entrada em operação desses empreendimentos.

PALAVRAS-CHAVE

Clusterização, k-means, Geração Eólica, Expansão da Transmissão

1.0 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro – SEB sofreu, nos últimos anos, uma forte transformação da sua matriz energética, com grande destaque para a expansão das fontes renováveis eólicas e solares.

Historicamente, essa expansão vinha sendo realizada, de forma mais expressiva, por meio de leilões de energia no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), exigindo um esforço conjunto de vários órgãos do setor elétrico, desde a etapa de planejamento até a licitação de novos empreendimentos de energia. Atualmente, devido ao ganho de competitividade dessas fontes, há uma tendência de que sua expansão passe a ocorrer de forma significativa, também, através do Ambiente de Contratação Livre (ACL).

Para a realização de um leilão de energia, no ambiente regulado, é necessário o cumprimento de ritos que envolvem, por exemplo, o cadastramento e habilitação técnica dos empreendimentos candidatos, no Sistema de Acompanhamento de Empreendimentos Geradores de Energia – AEGE, de responsabilidade da Empresa de Pesquisa Energética – EPE. No processo de cadastramento, são solicitados dados do empreendimento, que compreendem o ponto de acesso à rede, potência instalada, consumo interno, potência injetável máxima, características técnicas dos geradores e equipamentos de conexão, dentre outros, que são avaliados na etapa de habilitação técnica.

O planejamento da expansão da transmissão deve possuir forte sinergia com a expansão das fontes renováveis, de modo que seja possível o pleno escoamento da potência gerada pelos parques existentes até os centros de carga, prevendo, além disso, margem para acomodar a conexão de expansões futuras. Nesse sentido, informações como: i) projeção de crescimento da carga, ii) dados de potência e conexão de empreendimentos vencedores dos leilões de energia, iii) dados de empreendimentos em operação que comercializam energia por meio do ACL, iv) dados de geração prospectiva indicados pelo Plano Decenal de Energia, entre outros, sempre foram levados em consideração nos processos de diagnóstico e estudos de expansão da transmissão.

Todavia, nos últimos anos, o tempo médio para entrada em operação de novos empreendimentos de geração renovável tem sido relativamente inferior ao estimado para a entrada em operação de novos reforços na rede de transmissão, já que este envolve prazos extensos desde o planejamento até a licitação, licenciamento, construção e efetiva implantação. Assim, como forma de evitar eventuais descasamentos entre expansão da geração e expansão da transmissão que culminem em restrições elétricas, o planejamento da transmissão vem adotando uma postura proativa na recomendação de soluções técnicas.

Este planejamento proativo envolve, porém, variáveis com graus de incerteza distintos, tais como: os montantes de geração nova a serem considerados, a data de entrada em operação dos novos empreendimentos e, principalmente, a localização da geração prospectiva. Nesse contexto, cabe ressaltar que uma alocação mal embasada da geração prospectiva, em estudos de expansão da transmissão, por exemplo, poderia direcionar investimentos para pontos

de menor eficiência. Nesse contexto, o planejamento da transmissão tem buscado, regularmente, o aperfeiçoamento de suas metodologias, visando capturar com maior precisão as tendências do mercado de geração e, assim, prover uma expansão mais otimizada da rede elétrica. Este trabalho constitui a documentação de um dos aperfeiçoamentos recém-implantados.

2.0 REGISTROS DE EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO NOS AMBIENTES LIVRE E REGULADO

Até recentemente, a contratação de novos empreendimentos de geração era realizada, predominantemente, por meio de leilões de geração centralizada, que demandavam a participação ativa do planejamento setorial, principalmente no processo de definição de montantes e habilitação técnica, com atuação ativa da EPE.

A partir da Tabela 1, que apresenta o montante de empreendimentos e a potência instalada total dos empreendimentos habilitados, nos leilões de energia realizados entre 2015 e 2019, nota-se que os preços médios têm reduzido com os anos e a magnitude total dos projetos cadastrados vêm aumentando, o que indica a grande atratividade dos leilões e o sucesso da modalidade.

Tabela 1 - Potência instalada dos empreendimentos de geração habilitados e contratados em leilões

Ano	Número de Empreendimentos habilitados	Potência Instalada dos Empreendimentos habilitados (MW)	Número de empreendimentos contratados	Potência instalada dos Empreendimentos Contratados (MW)	Qtd. Contratada no ACR (MW Médio)	Preço Médio Contratado pelas Distribuidoras (R\$/MWh)
2015	1.753	56.314	126	5.165	2.200	250
2016	1.821	47.035	59	459	289	213
2017	1.595	58.047	87	4.516	2.957	167
2018	1.996	66.292	101	2.775	1.134	133
2019	2.701	109.393	106	3.381	1.236	164

Fonte: Sistema de Acompanhamento de Empreendimentos Geradores de Energia – AEGE

Para o planejamento da transmissão, esse aumento no cadastramento de novos empreendimentos tem aumentado a complexidade das avaliações técnicas e, consequentemente, do processo de planejamento de reforços para escoamento de geração. Dentre os principais desafios associados a esse tema, destacam-se: i) a necessidade do planejamento da transmissão de avaliar diversas condições de operação dos empreendimentos de geração, a fim de confirmar o adequado desempenho elétrico da rede em múltiplos cenários operativos; ii) as incertezas associadas à consideração da geração prospectiva nos estudos de planejamento, em função do comportamento diferenciado por fonte, durante o dia, mês e ano; iii) a complexidade de alocação da geração prospectiva nos casos de estudo, em função do elevado número de empreendimentos, dispersos por extensa região geográfica e iv) a busca do planejamento para evitar descasamento de cronogramas, face à realidade de tempos médios reduzidos para entrada em operação de empreendimentos de geração quando comparados aos tempos estimados para entrada em operação de empreendimentos de transmissão.

Nos últimos anos, o desafio tem se intensificado em função do aumento da inserção de geração nova, no sistema elétrico, também por meio do ambiente de contratação livre, com menor atuação direta do planejamento setorial, principalmente na etapa de definição de montantes a serem contratados, o que representa mais um desafio para a realização dos estudos de transmissão.

Logo, um desafio imediato do planejamento consiste em considerar e analisar a massa de dados armazenada ao longo dos processos de habilitações técnicas de leilões regulados e os dados públicos referentes às outorgas no ambiente de contratação livre, sempre equilibrando as incertezas dos montantes que serão contratados por ambas as modalidades.

Tendo em vista todos os pontos que foram destacados, torna-se evidente que as incertezas associadas à geração prospectiva e a forma como são representadas nos estudos de transmissão implicam em riscos de arrependimento no processo de planejamento, tanto por eventuais antecipações de reforços quanto por postergações que possam submeter o sistema a restrições momentâneas. Dessa forma, a busca por metodologias mais robustas e transparentes para a estimação da magnitude e dos pontos de conexão para a geração prospectiva é essencial.

3.0 PROPOSTA METODOLÓGICA

Neste trabalho são propostas duas abordagens distintas para a estimação de pontos de conexão de novas usinas assim como suas magnitudes. Essas abordagens são baseadas em métodos computacionais de clusterização.

3.1 Introdução aos métodos de Clusterização de Dados

Quando se trabalha com grandes conjuntos de dados, torna-se necessária alguma forma de rotulação ou agrupamento dos dados de forma categorizada. Uma das alternativas para realizar esta tarefa é por meio do emprego de técnicas de aprendizado de máquina não supervisionados. Uma dessas abordagens é o método de *Clustering*, ou, em português, clusterização de Dados ou método de Análise de Agrupamentos.

A clusterização consiste na técnica de mineração de dados multivariados que, através de métodos computacionais numéricos e de informações contidas nos próprios dados, agrupa automaticamente, por aprendizado não supervisionado, os 'n' casos da base de dados em 'k' grupos, geralmente disjuntos, denominados clusters ou agrupamentos.

Neste trabalho foi dada ênfase a um dos métodos mais simples, baseado em clusterização por centroide, mais especificamente o método *k-means*.

3.2 Método *k-means* aplicado à representação de geração

O método de clusterização *k-means* ou k-médias é um dos mais simples algoritmos não supervisionados, utilizados em mineração de dados com a finalidade de agregar conjuntos de dados com características afins. O algoritmo identifica 'k' números de centroides e aloca cada ponto dentro do cluster mais próximo, ao mesmo tempo que mantém o número de centroides o menor possível. Para exemplificar o problema, é apresentada a Figura 1.



Figura 1 - Representação gráfica de empreendimentos de geração.

Na Figura 1 podem ser observados múltiplos empreendimentos de geração representados nas projeções geográficas de Mercator por pontos com coordenadas latitude e longitude. Essa representação torna possível a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina e clusterização, que aproximam os pontos em um plano bidimensional (x,y) cujos centroides tem correspondência direta com coordenadas geográficas.

4.0 ALGORITMOS UTILIZADOS

Neste trabalho foi avaliado, no programa *python* [1], duas formas de clusterização de dados, o primeiro sendo o método *k-means* simples e o segundo um método alternativo baseado no próprio *k-means*.

Antes de apresentar as metodologias, torna-se necessário discutir como determinar o valor ótimo 'k', a ser utilizado. De fato, existem várias formas de definir esse valor, como: requisitos de negócio, algoritmos e outros. Um dos métodos que se propõe a resolver este problema, e que foi utilizado neste trabalho, é o método do cotovelo ou "*Elbow Method*".

4.1 Método do Cotovelo

Esse método testa a variância dos dados em relação ao número de grupos, ou seja, 'até quando aumentar o valor de "k" resulta em ganhos de representatividade do conjunto. A figura 2 apresenta o método do cotovelo aplicado ao problema de representação gráfica dos empreendimentos de geração, em estudo recentemente publicado pela EPE [2].

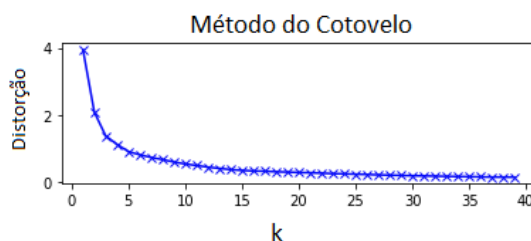


Figura 2- Método do Cotovelo aplicado ao problema de número de grupos para representação de empreendimentos de geração

Inicialmente, concluiu-se que cinco grupos seriam suficientes para a representação do conjunto de dados de geração (ponto de inflexão a partir do qual o aumento do número 'k' não implicaria em significativa redução da distorção dos dados, conforme exibido na Figura 2). Todavia, durante a realização do estudo em que a metodologia foi aplicada,

observou-se que a utilização de valores pequenos de 'k' resultava em concentrações desequilibradas de dados, o que não era interessante para o objetivo do estudo. Dessa forma, por restrições de negócio, foi realizado o ajuste no valor de 'k' para quatorze, tendo sido obtidos resultados mais satisfatórios.

4.2 - Método k-means simples

O método *k-means* simples aplicado a estimação de pontos de conexão no sistema de transmissão pode ser definido pelos seguintes passos:

1. Define-se o valor "k" de *clusters*.
2. Lê-se o conjunto de dados de empreendimentos de geração contendo as informações de potência instalada e coordenadas geográficas latitude/longitude.
3. Cria-se "k" centroides considerando como coordenadas x,y as latitudes/longitudes dos "k" primeiros dados do conjunto.
4. Cria-se uma matriz de dados que representa as distâncias euclidianas entre a coordenadas dos pontos e os k centroides.
5. Associa-se, considerando a matriz de distâncias euclidianas, cada dado a um centroide.
6. Minimiza-se as inércias dos *clusters*, recalculando os centroides por meio do critério de minimização da soma dos quadrados.
7. Repete-se os passos de quatro a sete até que não haja mais alteração de associação de dados aos *clusters*.

Após a convergência do método, é obtida a posição geográfica dos "k" agrupamentos de dados para a representação dos empreendimentos de geração em estudos de transmissão. Um ponto que deve ser observado neste momento é que as posições geográficas dos agrupamentos são definidas matematicamente e podem estar localizadas em qualquer ponto do mapa, o que configura um problema para a aplicação desejada, dado que só faz sentido, em estudos de transmissão, a representação de empreendimentos de geração conectados a subestações. Assim, constatou-se que esse algoritmo necessitava de uma segunda etapa de processamento, para refinamento do resultado obtido.

O pós-processamento necessário pode ser definido da seguinte forma:

1. Define-se um conjunto de pontos candidatos a serem os novos centroides. Para o estudo, os pontos escolhidos foram pontos coincidentes com as coordenadas geográficas de subestações de rede básica em 500 kV.
2. Define-se uma matriz de distâncias entre cada centroide da etapa inicial a cada um dos pontos candidatos.
3. Unifica-se o conjunto de dados onde os centroides foram aproximados para a mesma subestação, se houver.

O resultado do pós-processamento é um conjunto de centroides viáveis a serem utilizados pelo planejamento. Por fim, soma-se a potência instalada dos empreendimentos agrupados em cada *cluster* e divide-se pela potência total do conjunto de dados. Logo, obtêm-se duas informações, as coordenadas geográficas dos *clusters*, que são os pontos de conexão da geração indicativa e o percentual de potência nele alocada, em relação ao conjunto total.

4.3 Método Alternativo

O método alternativo foi desenvolvido de forma a aproveitar a característica finita e discreta das coordenadas viáveis dos centroides, viabilizado pelo pós-processamento do método *k-means* simples. Diferente do método anterior, onde precisa ser definido, *a priori*, o valor 'k' de *clusters*, o método alternativo foi construído de forma a possibilitar outras condições de convergência, dentre elas: i) o valor 'k' de grupos e/ou ii) uma condição de valor mínimo percentual da potência instalada de cada cluster em relação a potência total do conjunto de dados, ou seja, a partir desse método, pode ser definido que dentre os grupos da amostra, todos terão pelo menos x% de potência instalada do conjunto total.

O método alternativo pode ser definido pelos seguintes passos:

1. Define-se: o valor 'k' de clusters, o percentual mínimo de potência instalada por cluster, ou ambos.
2. Lê-se o conjunto de dados de empreendimentos de geração contendo as informações de potência instalada e coordenadas geográficas latitude/longitude.
3. Lê-se os 'n' pontos candidatos a coordenadas dos centroides.
4. Cria-se uma matriz de dados que representa as distâncias euclidianas entre a coordenadas dos pontos e os 'n' pontos candidatos.
5. Associa-se, considerando a matriz de distâncias euclidianas, cada dado ao centroide candidato mais próximo.
6. Elimina-se o centroide candidato em que a soma das potências instaladas do conjunto for a menor.
7. Repete-se os passos quatro a seis até que uma das condições de parada estabelecidas no passo um tenha sido atingida.

Após a convergência do método, de forma análoga ao primeiro método, soma-se a potência instalada dos empreendimentos de cada *cluster* e divide-se pela potência total do conjunto de dados. Assim, obtêm-se duas informações, as coordenadas geográficas dos *clusters*, *que são os pontos de conexão da geração indicativa* e o percentual de potência nele alocada, em relação ao conjunto total.

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de aplicação do método alternativo.

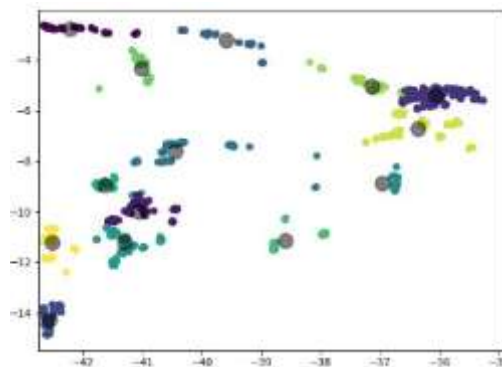


Figura 3 - Exemplo de resultado do método Alternativo

Cabe ressaltar que, os métodos recebem uma quantidade elevada de dados e a soma total das potências instaladas desse conjunto, como visto na tabela de habilitação técnica dos empreendimentos nos últimos leilões, é muito superior aos valores efetivamente contratados em leilão ou que entram em operação via ambiente de contratação livre. Essa é a razão pela qual adotou-se como dados de saída das metodologias propostas, as coordenadas geográficas dos centroides, ou seja, os pontos de conexão da geração indicativa, e os percentuais de geração de cada centroide em relação ao todo.

Dessa forma, a metodologia proposta neste trabalho resolve, especificamente, o problema de alocação da geração prospectiva na rede de transmissão, devendo ser feita, externamente ao método, pelo planejamento, a análise das incertezas associadas aos montantes de geração prospectivos, para determinação do valor de potência indicativa a ser efetivamente considerada nos estudos.

5.0 FONTES DE DADOS UTILIZADAS NO TRABALHO

As metodologias propostas neste artigo visaram fornecer alternativas para a estimativa de pontos de conexão para geração prospectiva, em estudos de transmissão. Uma aplicação prática da proposta será demonstrada para a região Nordeste, onde se concentram inúmeros empreendimentos eólicos e fotovoltaicos geograficamente dispersos.

Para o objetivo deste artigo, focou-se nos empreendimentos de geração eólica e foram utilizadas as informações disponíveis nas bases de dados dos leilões de geração, constantes no sistema AEGE, de responsabilidade da EPE, e, adicionalmente, os dados do Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL, gerenciado pela ANEEL.

5.1 Dados do Sistema AEGE

Foram considerados todos os dados de geração eólica do sistema AEGE da EPE focando nas informações de coordenadas geográficas e potência instalada habilitada. Como o objetivo é identificar potenciais pontos para conexão da geração *prospectiva*, foram realizadas validações no conjunto de dados, de forma a remover as repetições e os empreendimentos vencedores.

O resumo dos dados é apresentado abaixo:

- Existem 28.895 empreendimentos cadastrados no sistema;
- 18.051 dados são referentes à fonte eólica;
- 11.288 dados são referentes a usinas não vencedoras;
- 13.79 dados únicos e válidos;
- 1.141 dados estão no submercado Nordeste.
- Potência instalada total = 33.140 GW

5.2 Dados do Sistema SIGEL

Os dados do sistema SIGEL são todos públicos. Para o foco do trabalho foram considerados as coordenadas geográficas latitude/longitude, potência instalada e fase da usina.

Cabe mencionar que a fase da usina indica a etapa processual em que a usina se encontra, dentre elas: Despacho de Requerimento de Outorga – DRO, construção não iniciada, construção/operação. Como o objetivo é identificar potenciais pontos para conexão da geração prospectiva, para este trabalho, foram consideradas as usinas em fase de DRO e construção não iniciada.

O resumo dos dados obtidos em 31/03/2021 são apresentados abaixo:

- Existem 1.694 dados de empreendimentos eólicos;
- 1.059 dados após remoção dos dados existentes no sistema AEGE, tratados em etapa anterior;
- 776 dados estão no submercado Nordeste;
- Potência instalada total = 28.735 MW

6.0 CASOS ESTUDADOS

Neste trabalho foram considerados 4 conjuntos de dados para validação e comparação dos resultados. Os casos estudados são apresentados abaixo:

1. Base de dados de empreendimentos eólicos AEGE;
2. Base de dados de empreendimentos eólicos SIGEL (usinas em fase de DRO e construção não iniciada);
3. Base de dados de empreendimentos eólicos AEGE + SIGEL (usinas em fase de DRO e construção não iniciada);
4. Base de dados de empreendimentos eólicos SIGEL (usinas em todas as fases: DRO, construção não iniciada e construção iniciada/operação).

Os pontos de conexão dos centroides, assim como o percentual de geração que eles representam do conjunto total, após aplicação dos métodos *k-means* simples e Método Alternativo são apresentados a seguir, na Tabela 2, na Tabela 3, na Tabela 4 e na Tabela 5, para o Caso 1, Caso 2, Caso 3 e Caso 4, respectivamente.

Tabela 2 - Resultados dos algoritmos para o caso 1

Método <i>k-means</i> simples				Método Alternativo			
Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)
SE Acaraú III	2,88	SE Juazeiro III	6,51	SE Açú III	11,20	SE Morro do Chapéu II	4,01
SE Açú III	7,54	SE Olindina	2,93	SE Campina Grande III	5,51	SE Olindina	3,22
SE Curral Novo do Piauí II	5,66	SE Ouroilândia II	11,02	SE Curral Novo do Piauí II	5,66	SE Ouroilândia II	9,32
SE Garanhuns II	2,14	SE Parnaíba III	6,10	SE Gentio do Ouro II	5,17	SE Parnaíba III	6,10
SE Gentio do Ouro II	5,26	SE Queimada Nova II	5,39	SE Igaporã III	5,68	SE Queimada Nova II	5,23
SE Igaporã III	5,68	SE Santa Luzia II	7,99	SE João Câmara III	23,24	SE Santa Luzia II	2,95
SE João Câmara III	25,51	SE Tianguá II	5,39	SE Juazeiro III	4,46	SE Tianguá II	8,27

Tabela 3 - Resultados dos algoritmos para o caso 2

Método <i>k-means</i> simples				Método Alternativo			
Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)
SE Acaraú III	7,17	SE Olindina	3,43	SE Acaraú III	7,17	SE Ouroilândia II	15,46
SE Curral Novo do Piauí II	4,03	SE Ouroilândia II	19,00	SE Açú III	6,12	SE Paulo Afonso IV	5,27
SE Garanhuns II	1,91	SE Parnaíba III	1,90	SE Gentio do Ouro II	14,49	SE Queimada Nova II	13,26
SE Gentio do Ouro II	15,20	SE Queimada Nova II	10,35	SE João Câmara III	21,89	SE Santa Luzia II	5,90
SE Jaguaruana II	2,32	SE Santa Luzia II	10,42	SE Juazeiro III	3,05	SE Tianguá II	5,06
SE João Câmara III	21,11	SE Tianguá II	3,16	SE Morro do Chapéu II	2,33		

Tabela 4 - Resultados dos algoritmos para o caso 3

Método <i>k-means</i> simples				Método Alternativo			
Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)
SE Acaraú III	4,84	SE Olindina	2,78	SE Acaraú III	4,84	SE Juazeiro III	3,12

SE Curral Novo do Piauí II	4,30	SE Ouroilândia II	19,05
SE Garanhuns II	1,45	SE Parnaíba III	4,81
SE Gentio do Ouro II	9,69	SE Queimada Nova II	8,94
SE Igaporã III	3,70	SE Santa Luzia II	8,68
SE Jaguaruana II	5,27	SE Tianguá II	4,21
SE João Câmara III	22,27		

SE Açú III	8,56	SE Olindina	2,97
SE Campina Grande III	4,26	SE Ouroilândia II	16,12
SE Curral Novo do Piauí II	4,23	SE Parnaíba III	4,81
SE Gentio do Ouro II	9,69	SE Queimada Nova II	8,82
SE Igaporã III	3,70	SE Santa Luzia II	3,42
SE João Câmara III	21,25	SE Tianguá II	4,21

Tabela 5 - Resultados dos algoritmos para o caso 4

Método k-means simples				Método Alternativo			
Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)	Centroide	(%)
SE Acaraú III	7,72	SE Olindina	2,22	SE Acaraú III	5,20	SE Morro do Chapéu II	3,69
SE Curral Novo do Piauí II	3,89	SE Orolândia II	15,11	SE Açú III	7,81	SE Orolândia II	13,82
SE Garanhuns II	2,62	SE Parnaíba III	2,17	SE Curral Novo do Piauí II	4,05	SE Parnaíba III	4,58
SE Gentio do Ouro II	9,62	SE Queimada Nova II	8,96	SE Gentio do Ouro II	9,62	SE Pecém II	2,87
SE Jaguaruana II	4,98	SE Santa Luzia II	9,52	SE João Câmara III	25,33	SE Queimada Nova II	8,48
SE João Câmara III	24,74	SE Tianguá II	2,41	SE Juazeiro III	6,24	SE Santa Luzia II	8,31
SE Morro do Chapéu II	6,03						

7.0 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao analisar os resultados de aplicação dos métodos *k-means* simples e do método alternativo observa-se poucas diferenças. No Caso 2 e no Caso 4 o método alternativo resultou na redução do número de clusters, enquanto no Caso 3 resultou em um cluster a mais. Os percentuais de geração correspondentes a cada grupo também foram, de forma geral, parecidos.

Uma diferença significativa reside na existência de percentuais de geração muito baixos em alguns clusters formados pelo método *k-means* (elevada variância), o que não ocorre no método alternativo, em função do estabelecimento do requisito de percentual mínimo de potência instalada por cluster, o que pode ser considerado um ponto favorável na utilização do método alternativo.

Assim, é possível concluir que a aplicação de qualquer um dos métodos atende às necessidades de identificação de pontos de conexão para geração prospectiva nos estudos de transmissão, sendo, dessa forma, prerrogativa do analista a escolha de um ou de outro.

Na Figura 4 é apresentada a representação gráfica dos empreendimentos de geração e pontos de conexão resultantes da aplicação do método alternativo para o Caso 4. Os empreendimentos que compõem cada cluster foram diferenciados por cores, conforme exibido na legenda, ao redor de seus centroides, representados por círculos na cor amarela.

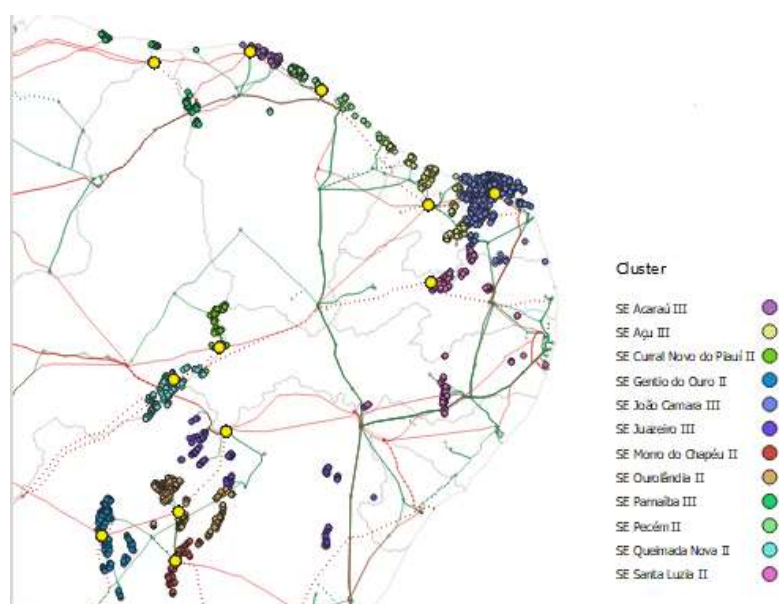


Figura 4 - Representação gráfica dos clusters no sistema elétrico nacional.

8.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi discutida a problemática envolvida na estimação de pontos de conexão para a consideração de geração prospectiva nos estudos de expansão da transmissão. Tradicionalmente, esse processo envolvia laboriosa análise de dados pelos analistas e, embora o tratamento manual fosse satisfatório, tornava o processo pouco transparente.

Como propostas de aprimoramento, foram apresentadas duas metodologias automatizadas, baseadas em algoritmos de aprendizado de máquina, não supervisionados. Os resultados da aplicação dos métodos mostraram-se promissores e estão sendo considerados nos estudos de planejamento, em fase de desenvolvimento, pela EPE.

Um ponto importante a salientar é que as metodologias propostas constituem novas ferramentas de trabalho, facilitadoras da gestão de grandes volumes de dados, porém, não substituem o papel crítico do analista, que deve sempre avaliar e eventualmente contestar a qualidade dos resultados, fazendo os ajustes e adaptações necessários para que se disponha de uma representação consistente e que subsidie uma expansão proativa e de mínimo arrependimento da rede de transmissão, considerando todas as incertezas associadas ao processo de planejamento.

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Scikit-Learn – Documentação Técnica de Biblioteca Python, 2021, User Guide Disponível em: https://scikit-learn.org/stable/user_guide.html

[2] EPE. Nota Técnica EPE-DEE-NT-072/2021-r0 – Expansão das Interligações Regionais – Diagnóstico Inicial, 2021, disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-expansao-das-interligacoes-regionais-diagnostico-inicial->

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) RODRIGO RODRIGUES CABRAL

Rodrigo Rodrigues Cabral engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal Fluminense em 2011; mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2015. É Analista de Pesquisa Energética desde 2013 na Empresa de Pesquisa Energética – EPE onde desempenha atividades relacionadas ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia.

(2) THAÍS PACHECO TEIXEIRA

Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela UFRJ. Atuou na área de modelagem computacional de sistemas elétricos, entre 2012 e 2015, em empresa de consultoria e, ao longo de 2015, no ONS. Iniciou suas atividades na EPE em dezembro de 2015, como Analista de Pesquisa Energética, desempenhando atividades relacionadas ao planejamento da expansão do sistema de transmissão, dentre as quais: estudos elétricos de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade eletromecânica, bem como análise técnico-econômica de alternativas de expansão da transmissão. Atua desde 2020 como Consultora Técnica, na EPE, coordenando os grupos de Base de Dados e Interligações regionais.

(3) TIAGO CAMPOS RIZZOTTO

Tiago Campos Rizzotto, engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal de Uberlândia em 2007; mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2016. É Analista de Pesquisa Energética desde 2008 na Empresa de Pesquisa Energética – EPE onde desempenha atividades relacionadas ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia.