

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE DESEMPENHO ELÉTRICO EM FERRAMENTAS GRÁFICAS PARA A PROSPECÇÃO DE ALTERNATIVAS DE PONTOS DE CONEXÃO PARA ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA

**RODRIGO RODRIGUES CABRAL (1); THAÍS PACHECO TEIXEIRA (1); TIAGO CAMPOS RIZZOTTO (1)
EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (1)**

RESUMO

A expansão do sistema de transmissão é um processo complexo constituídos de várias etapas. Inclui o diagnóstico de problemas, proposição de soluções e análise de custo da alternativa mais econômica. Quando relacionado a elos de corrente contínua em Alta tensão (CCAT) exige esforço humano e computacional significativo, limitando as alternativas a serem testadas. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma metodologia inovadora, utilizando índices de desempenho elétrico organizados em camadas no programa QGIS. Essa técnica, proporciona uma visão abrangente do sistema, otimizando a seleção de candidatos para conexão de novos pontos para estudos de elos de corrente contínua.

PALAVRAS-CHAVE

SCR, MIIF, Perdas elétricas, CCAT

1.0 INTRODUÇÃO

A expansão do sistema de transmissão é um processo complexo constituídos de diversas etapas. Na primeira etapa (i) é realizado um diagnóstico onde são identificados as não conformidades de operação do sistema quanto aos critérios de segurança além de possíveis violações de capacidades, na segunda etapa (ii) são propostas alternativas de expansão que solucionam os problemas de (i) e na terceira etapa (iii) é escolhida dentre as alternativas a que apresentou menor custo global.

Em geral, a etapa (i) é constituída de diversas análises elétricas para avaliação de atendimento aos critérios de segurança preconizados nos procedimentos de planejamento e operação, considerando as evoluções de topologia, demanda de energia e oferta de geração. A evolução da topologia consta nos estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e, embora seja a variável de menor incerteza, altera significativamente as conclusões das análises, não podendo ser desconsiderada. A demanda de energia é fornecida pelas distribuidoras para diversos patamares para todo horizonte decenal, apresentando variação considerável a depender da conjectura do País e, por fim, a expansão da oferta de geração surge dos resultados dos leilões regulados, dos montantes indicativos do plano decenal de expansão e da entrada de empreendimentos no mercado livre, fonte de grande incerteza nos estudos de planejamento.

Todas essas variáveis são combinadas e analisadas em programas elétricos e energéticos identificando os possíveis problemas a serem resolvidos nas etapas seguintes. Para esse trabalho, serão tratadas apenas as expansões relacionadas com interligações regionais. Com essa premissa, é possível afirmar que a etapa (ii) torna-se complexa, envolvendo excedentes expressivos de oferta de geração e longas distâncias para a solução de transmissão. Para essas condições de contorno, os investimentos tendem a ser expressivos, viabilizando a consideração, como alternativa de expansão, as tecnologias de corrente contínua em Alta Tensão (CCAT).

Na etapa (ii), são conduzidas análises elétricas em regime permanente e dinâmico, abrangendo diversos cenários operativos. Os diferentes reforços que solucionam os problemas de desempenho mapeados são combinados, compondo alternativas válidas que prosseguem para a próxima etapa.

Na etapa (iii), são levantados os custos de todos os investimentos e o custo de perdas elétricas de cada alternativa, a fim de determinar a alternativa vencedora, qual seja, aquela que apresenta o menor custo global.

Com base no exposto, é possível obter uma visão geral do fluxo de planejamento de reforços de transmissão que, todavia, apresenta algumas particularidades quando se trata de elos de corrente contínua. Nessas situações, as

etapas (ii) e (iii) exigem meses de trabalho para concepção de um conjunto limitado de alternativas. Consequentemente, a escolha inadequada da região de reforço CCAT pode resultar em ineficiência no processo e até mesmo em retrabalho. Nesse sentido, dotar-se de ferramentas que facilitem o processo de seleção dos pontos de conexão torna-se extremamente relevante.

2.0 APRESENTAÇÃO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO ELÉTRICO

O desempenho de um elo CCAT, na tecnologia LCC, está relacionado ao nível de influência que o sistema em corrente Alternada – CA exerce sobre o lado em corrente contínua – CC. Essa interação CA/CC e os problemas associados estão relacionados a robustez relativa do sistema CA em comparação a capacidade do link CC.

Abaixo, são apresentados índices preditivos que buscam traduzir essas interações.

2.1 Short Circuit Ratio – SCR

O *Short Circuit Ratio* (SCR) é o principal índice preditivo criado para indicar a robustez do sistema e é apresentado pela relação da equação 1 [1].

$$SCR = \frac{S_{3\phi}}{P_{DC}} \quad (1)$$

Para esse índice as variáveis da equação são definidas como:

- $S_{3\phi}$ - Potência de curto-circuito trifásica na barra terminal da conversora (MVA);
- P_{DC} - Potência CC em MW;

Esse índice é utilizado para classificar o sistema quando a sua robustez, onde maiores valores indicam melhores desempenhos elétricos. Pela literatura [1], valores iguais ou superiores a três podem ser considerados satisfatório.

2.2 Multi-infeed Interaction Factor - MIIF

O índice anterior foi criado para indicar a robustez da rede em sistemas com a presença de apenas um elo CCAT, sendo, todavia, indiferente à presença de outros elos CCAT e suas possíveis interações.

Para esta finalidade foram desenvolvidos outros índices, sendo o principal deles o MIIF, definido pela equação (2). Tal índice é a relação entre a variação de tensão sentida por um elo CC (j) após a aplicação de variação de tensão em barra remota (i).

$$MIIF = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} \quad (2)$$

3.0 NOVO ÍNDICADOR BASEADO EM PERDAS ELÉTRICAS (IDP)

Na seção anterior, foram apresentados índices de desempenho elétrico que visam avaliar a robustez de um sistema de corrente alternada e o nível de interação entre sistemas em corrente contínua.

Como mencionado na introdução do artigo, a recomendação de expansões para o sistema requer não apenas que os reforços planejados possuam desempenho elétrico adequado, mas também que sejam economicamente competitivos.

Nesse sentido, buscou-se a inclusão de um novo índice que refletisse outros atributos dos pontos de conexão dos componentes de corrente contínua, com a premissa de ser fácil de ser calculado e que pudesse agregar subsídios para a análise econômica da etapa (iii).

Optou-se, assim, pela adoção do cálculo das diferenças de perdas elétricas, em simulações estáticas, como recurso. Ao contrário das variáveis anteriores, o Indicador de Diferenças de Perdas (IDP), como foi denominado, está diretamente relacionado à comparação entre alternativas e fornece outras informações complementares, que serão apresentadas na seção de resultados.

4.0 ALGORITMO DE CÁLCULO DO VALOR DE PERDAS

Neste artigo, utilizou-se uma rotina automática para o cálculo direto do SCR e MIIF, disponível no programa ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos), desenvolvido pelo CEPEL, o que otimizou a etapa de levantamento de dados.

Por fim, para completar o conjunto de variáveis de análise, foi desenvolvida uma rotina de cálculo do IDP.

Essa rotina foi dividida em três etapas (preparação dos dados, simulação das perdas e atribuição de perdas), apresentadas a seguir, e utilizou como motor de cálculo de fluxo de potência o programa ANAREDE (Análise de Redes), desenvolvido pelo CEPEL.

Script da Etapa de preparação dos dados:

1. Preparação de uma lista de barras (lista-gerencial) a serem avaliadas, incluindo suas coordenadas geográficas (latitude/longitude), nível de tensão e unidade da Federação (UF);
2. Definição dos valores nominais do novo elo, como tensão (V), potência (P_n), número de equipamentos(n) para teste e o valor da resistência em ohm/km ($R_{c_{nominal}}$);
3. Determinação da(s) região(ões) candidata(s) para a conexão dos retificadores e inversores dos elos CCAT;
4. Separação das barras candidatas de retificadora e inversora, e gerar todas as combinações possíveis de pontos de saída e pontos de chegada, respeitando o número de elos escolhidos.

Script da Etapa de Simulação das perdas:

1. Cálculo da distância ($dist$) ponto a ponto correspondente ao elo CCAT, utilizando as coordenadas geográficas dos pontos de origem e destino;
2. Cálculo do valor referencial total da resistência da linha CC ($R_{c_{linha-cc}}$) com base no resultado anterior;
3. Cálculo, utilizando a equação (3), da potência prevista na inversora;

$$P_{inv} = P_n - dist * R_{c_{linha-cc}} \left(\frac{P_{(n-polo)}}{V} \right)^2 [MW] \quad (3)$$

4. Adição de uma carga equivalente a P_n nas barras correspondentes à retificadora e uma geração P_{inv} nas barras correspondentes à inversora, no programa ANAREDE;
5. Cálculo do valor das perdas para cada combinação, utilizando a rotina de fluxo de carga linear com consideração de perdas;
6. Armazenamento do valor das perdas do sistema.

Script da Etapa de Atribuição de perdas.

1. Busca da combinação de pontos que apresentou a menor perda (V-menor-perda);
2. Subtração de V-menor-perda de todos os casos tabelados;
3. Ordenação dos valores das perdas diferenciais obtidas no passo 2;
4. Cálculo da média dos "N" primeiros valores diferenciais de perdas;
5. Normalização dos resultados.

Após essas etapas, é obtida uma lista dos valores médios das perdas diferenciais para cada subestação. Esses valores refletem os benefícios topológicos de um ponto em relação a outro, quando usado para conexão de equipamentos em corrente contínua.

5.0 APRESENTANDO A METODOLOGIA PROPOSTA DE NOVOS PONTOS DE CONEXÃO DE ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA

Nas seções anteriores, foram descritos vários índices preditivos relevantes ao estudar elos de corrente contínua. No entanto, é importante ressaltar que essas informações são parcialmente subjetivas, dependente do cenário de análise e não substituem uma análise elétrica completa. Portanto, buscou-se um procedimento lógico que considere os diferentes índices, visando otimizar o processo inicial de seleção de alternativas envolvendo elos em corrente contínua.

Nesse sentido, deparou-se com um desafio técnico: o grande número de cenários e barras candidatas para novos pontos de conexão e a dificuldade de visualização dessas informações em tabelas. A solução encontrada foi a criação de diversas camadas gráficas no programa QGIS. Essa abordagem permitiu realizar uma série de rápidas análises pelo analista melhorando o poder de compreensão situacional do sistema.

6.0 CASOS E PREMISSAS DE ESTUDO

Foram selecionados cinco cenários de expansão do sistema para o ano de 2030. Estes cenários foram criados por meio dos casos disponibilizados pela EPE [2] e incluem todos os bipolos planejados e existentes até o momento de emissão do estudo: Bipolos Xingu - Estreito, Xingu - Terminal Rio, Porto Velho – Araraquara II, Foz do Iguaçu - Ibiúna, e o novo elo Graça Aranha - Silvânia.

A seguir, é feita uma breve descrição dos cenários utilizados neste estudo.

- **Cenário 1** – Norte seco, com patamar de carga leve, intercâmbio médio nas interligações Norte/Nordeste e intercâmbio baixo na interligação Sul/Sudeste;
- **Cenário 2** – Sazonalidade intermediária, com patamar de carga média e intercâmbio maximizado nas interligações Norte/Nordeste e Sul/Sudeste;
- **Cenário 3** – Período seco, com patamar de carga média, intercâmbio maximizado no Nordeste e intercâmbio maximizado na interligação Sul/Sudeste;
- **Cenário 4** – Sazonalidade intermediária, com patamar de carga média, intercâmbio maximizado na interligação Norte/Nordeste para Sudeste e inércia minimizada no Sudeste, além de intercâmbio baixo na interligação Sul/Sudeste;
- **Cenário 5** – Sazonalidade Seca, patamar de carga leve, intercâmbio nulo nas interligações Norte/Nordeste para Sudeste e Sul/Sudeste.

Foram consideradas as seguintes premissas para a análise:

Tabela 1 - Premissas utilizadas para levantamento de dados.

Premissas das análises	
Equipamento	Bipolo CCAT
Tecnologia	LCC
Potência	5000 MW
Tensão	800 kV
Resistência da Linha CC	0,00665 Ohm/km
Região Exportadora	Nordeste
Região Receptora	Sudeste/Sul
Valor “N” utilizado para o cálculo do IDP	10

7.0 RESULTADOS

7.1 CAMADA SCR

Este índice foi calculado para todas as barras de interesse, em todos os cenários. Após isso, os resultados foram manipulados e sintetizados em três camadas gráficas: SCR mínimo, SCR médio e SCR máximo, sendo cada uma dessas camadas relevantes para diferentes análises específicas.

A seguir, na Figura 1(a), é apresentado o resultado para a camada SCR mínimo.

A fim de aprimorar a visualização de informações, foi adotada, para esta camada, uma classificação em 3 níveis. Sendo:

- Azul para valores maiores de 3;
- Vermelha para valores acima de 2 e
- Amarela para valores maiores que 1,5.

Na Figura 1(a), é exibida uma visão geral do principal centro de carga do Brasil, qual seja, região Sudeste na fronteira com a região Sul. Já na Figura 1(b), é dada ênfase à região de carga central de São Paulo e Rio de Janeiro.

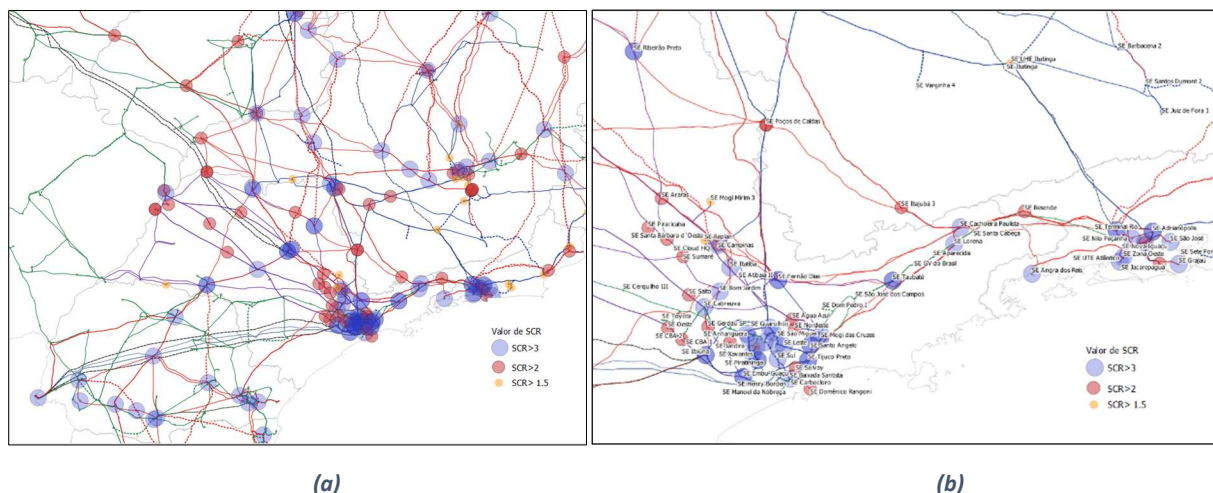


Figura 1 - Nível mínimo de SCR para o sistema Sul/ Sudeste(a) e foco no sistema São Paulo/Rio de Janeiro(b).

A partir das figuras 1 (a) e (b), é possível observar que a maioria das subestações do sistema receptor apresenta valores mínimos de SCR acima do recomendado em literatura, círculo azul. A partir da Figura 2, estende-se a conclusão anterior para as barras da região Sul.

Logo, é possível inferir que há muitos pontos candidatos, com robustez suficiente para conexão de novos elos nessas regiões.

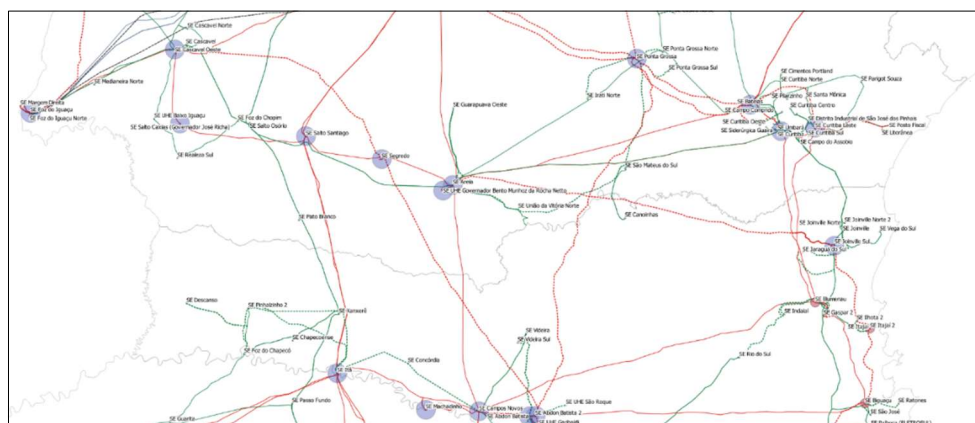


Figura 2 – SCR mínimo de 3 para elos de 5.000 MW-foco região Sul.

7.2 Camada MIIF

O índice MIIF, assim como o índice SCR, foi calculado para os cinco cenários e apresentado em duas camadas: MIIF máximo e MIIF médio. O MIIF máximo representa os valores mais altos encontrados em cada ponto do sistema entre os cinco cenários, enquanto o MIIF médio é uma média ponderada das ocorrências.

A camada de MIIF máximo é mostrada na Figura 3. Esses dados fornecem informações que sugerem quais subestações apresentam interações máximas entre corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), o que pode ser usado como critério para eliminar pontos candidatos à conexão de novos elos CCAT.

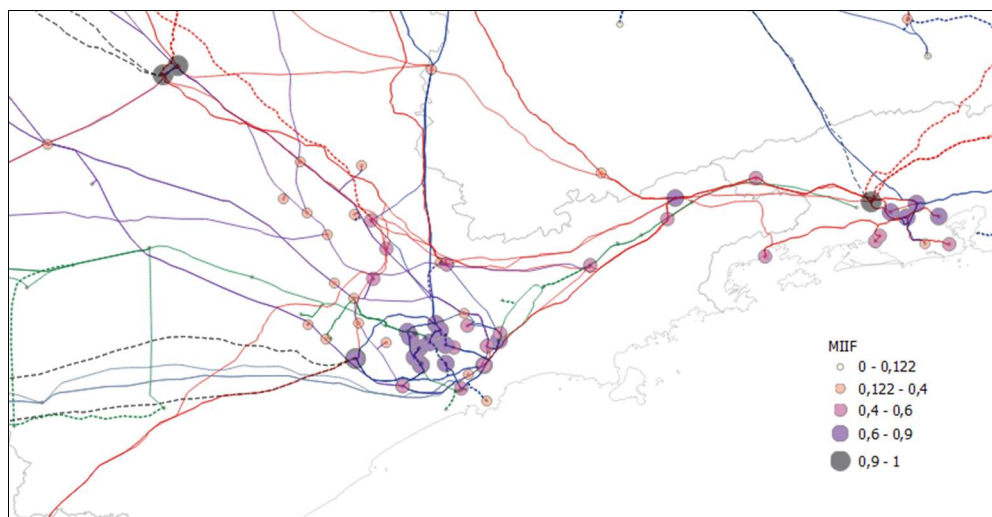


Figura 3 - Valores Máximos de índices MIIF na região Sudeste.

Na Figura 3 observam-se valores máximos para as subestações que já possuem elos, com uma redução significativa à medida que se afasta delas. Valores elevados de MIIF máximo, acima de 0,6, são encontrados apenas no anel de 345 kV de São Paulo e na malha em 500 kV do Rio de Janeiro, enquanto o restante do sistema apresenta valores menores que 0,6.

Já a Figura 4 mostra uma visão geral do sistema de São Paulo para a camada de MIIF médio. Essa camada indica as subestações do sistema com os maiores indícios de interação considerando todos os cenários simulados. Essas informações podem ser utilizadas adicionalmente para a seleção de subestações críticas para aplicação de defeitos, nas etapas de análises de transitórios eletromecânicos.

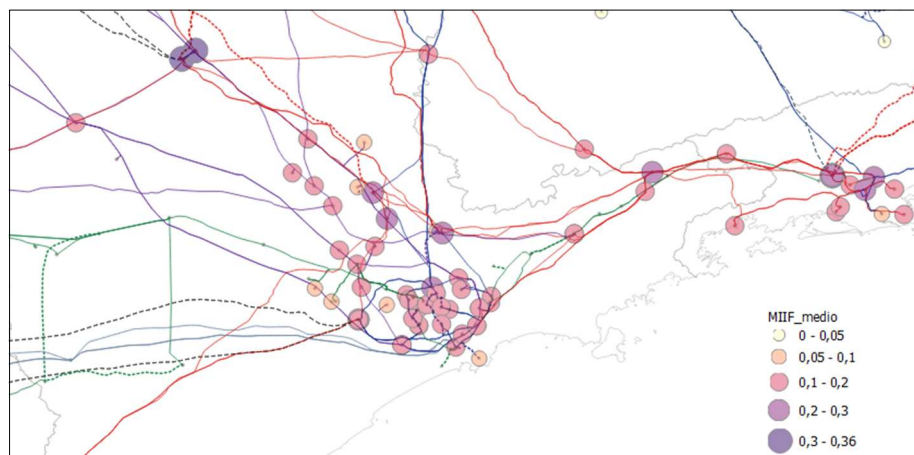


Figura 4 - Valores Médios do índice MIIF na região Sudeste.

Diferente da Figura 3, a Figura 4 mostra uma maior uniformidade do índice no sistema receptor de São Paulo reduzindo ao se afastar dessa região. O valor máximo ficou em 0,37 em subestações situadas entre os elos existentes, demonstrando uma menor interação nas subestações localizadas ao Sul de São Paulo. Essas conclusões distintas da figura anterior ressaltam a importância de considerar várias camadas de índices durante as análises de prospecção de pontos de conexão de elos CCAT.

7.3 CAMADA IDP

Após todo o levantamento de dados foi obtido, como resultado da metodologia de cálculo do IDP, seis camadas gráficas, sendo uma para cada um dos cinco cenários analisados e uma para a ponderação final.

Neste artigo foi aplicada uma ponderação unitária que, todavia, em estudos oficiais, deve ser alterada de forma a adequar a representatividade anual de cada cenário.

Para a visualização deste índice, foi adotado um sistema graduado variando tamanho e cor, sendo as cores mais escuras representações dos pontos com menores valores de IDP e as mais claras pontos com maiores valores de IDP. Em suma, menores valores são considerados melhores.

A fim de apresentar a visão geral da camada IDP, foi selecionada uma camada exemplo de IDP ponderada, apresentada na Figura 5.

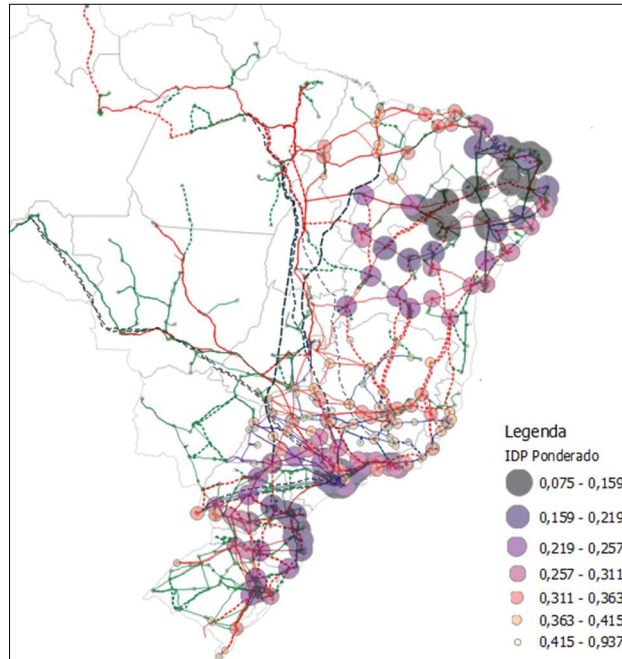


Figura 5 – IDP do Brasil na camada de resultados IDP ponderado.

Na Figura 6, é possível observar na camada IDP ponderado que o índice atinge seus menores valores no extremo nordeste da região Nordeste e região Sul do País, o que sugere a existência de um fluxo passante entre essas regiões que se beneficia com a criação de um novo eixo expresso entre as regiões.

A seguir, nas Figura 6 e Figura 7, é apresentado um foco maior nas regiões emissoras e receptoras na camada IDP.

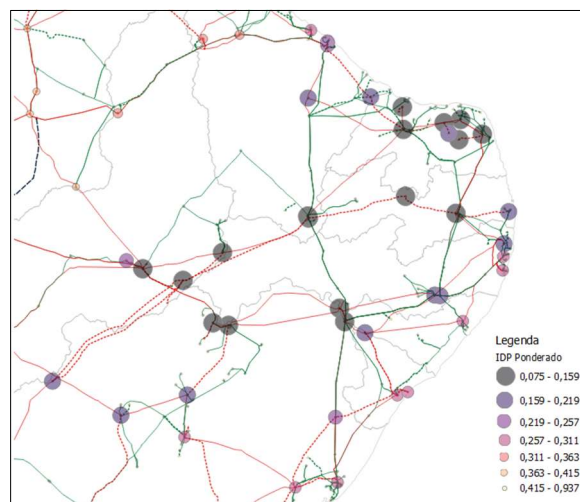


Figura 6 - IDP da região Nordeste na camada de resultados IDP ponderado.

Por fim, a Figura 7, apresenta a camada IDP com foco nas regiões do estado de São Paulo e parte Norte da região Sul do país. Essa figura mostra os melhores índices de IDP em subestações do Anel de 345 kV de São Paulo.

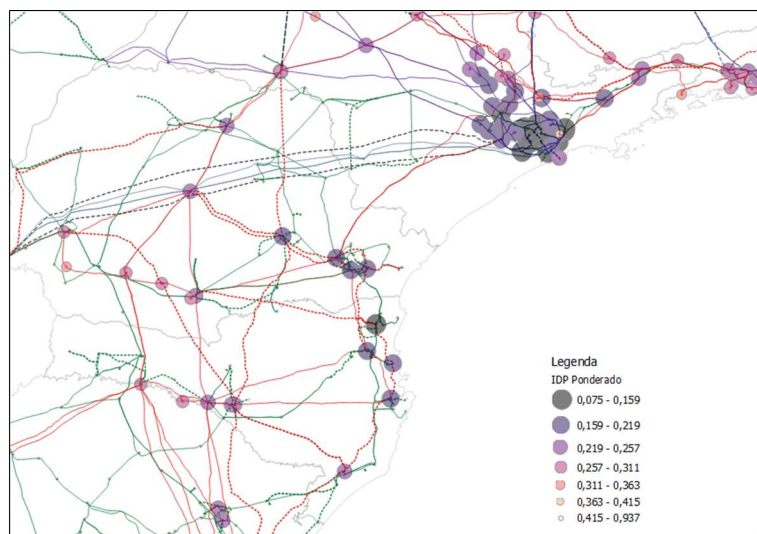


Figura 7 - IDP na região Sul/Sudeste camada de resultados IDP ponderado.

8.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia inovadora que utiliza índices de desempenho elétrico de forma sistemática, os quais são comumente aplicados em análises de elos de corrente contínua. Além disso, introduziu um novo índice chamado Índice de Diferença de Perdas (IDP), organizado em camadas de dados para visualização em ferramentas gráficas como o QGIS. Os resultados obtidos demonstraram uma melhoria significativa na compreensão da situação do sistema.

Foram apresentadas graficamente as camadas de SCR mínimo, MIIF máximo, MIIF médio e IDP ponderado. A partir desses dados, foi possível obter diversas informações relevantes para orientar as escolhas do órgão planejador em relação aos pontos mais eficientes do sistema. No entanto, cabe ao analista combinar essas camadas e outras para definir efetivamente os pontos que serão objeto de estudo.

Por fim, fica evidente os benefícios da utilização dessa metodologia, pois ela oferece uma visão mais abrangente e precisa, permitindo a redução de critérios subjetivos na prospecção de pontos promissores. Isso auxilia na tomada de decisão mais informada e eficaz no planejamento e expansão do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. McGraw-Hill Professional.
- [2] EPE: 2022, disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/bases-de-dados-de-simulacao>>

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 (COPPE-UFRJ) 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 Mestre em Engenharia Elétrica pela UFRJ, com especialização em Gerenciamento de Projetos pela PUC Minas. Atua há dez anos no setor elétrico, tendo trabalhado em empresa de projetos de engenharia, no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e, atualmente, na Empresa de Pesquisa Energética (EPE), coordenando os grupos de Base de Dados e Estudos de Interligações Regionais.

(3) TIAGO CAMPOS RIZZOTTO Tiago Campos Rizzotto, engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal e 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 realiza estudos de desempenho elétrico voltados para o planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica com ênfase em estabilidade eletromecânica.