



Ferramenta Computacional Integrada para Cálculo Individualizado da Capacidade de Acomodação de Geradores Distribuídos no Sistema Elétrico de Distribuição

Tema: Recursos Energéticos Distribuídos

Autores: Jonathan A. Marcelo

Co-Autores: José C. G. Andrade, Ricardo Torquato, Tiago M. Barbosa, Tiago R. Ricciardi, Fernanda C. L. Trindade, Walmir Freitas, Heliton O. Vilibor

Empresa: Universidade Estadual de Campinas

Resumo

Até novembro de 2024 foram instaladas 679 mil novas unidades de geração distribuída (GD), sendo o número de solicitações de acesso ainda maior, devido a pedidos negados. A análise eficiente da capacidade de acomodação destes geradores é uma das preocupações principais das distribuidoras, pois, atualmente, estima-se que cada solicitação demande 2 horas de estudos, sendo realizada individualmente. Portanto, foi criado um projeto em parceria entre a CPFL, UNICAMP e ERA, no âmbito do programa de P&D ANEEL, para desenvolver uma ferramenta computacional para cálculo da capacidade de acomodação de GD e reforços de redes de média e baixa tensão integrando as bases de dados técnicas, comerciais e de operação da distribuidora.

A metodologia de cálculo utiliza dados de medição dos alimentadores para definir a carga base para simulação e é considerada reserva de capacidade para as solicitações de conexões em análise ainda não instaladas. É realizada simulação de fluxo de potência considerando os dias de menor carregamento (cenário crítico) da rede. Foram avaliados 3.389 alimentadores, sendo inversão de fluxo a métrica mais restritiva. A ferramenta computacional automatiza a análise da capacidade de acomodação e análise de reforços, reduzindo o custo operacional e acelerando a avaliação das solicitações.

1. Introdução

A geração distribuída (GD) no Brasil tem crescido de forma expressiva nos últimos anos, impulsionada pelo aumento da consciência ambiental, políticas de incentivo e redução de custos dos sistemas fotovoltaicos. Atualmente, há mais de 3 milhões de mini e microgeradores instalados, distribuídos em mais de 5,5 mil municípios, totalizando uma capacidade instalada de mais de 33 GW. Apenas em 2024, até o mês de novembro, foram conectadas mais de 679 mil novas unidades de GD (ANEEL, 2024). Além disso, o número de solicitações de acesso enviadas às distribuidoras é ainda maior, uma vez existem pedidos são reprovados ou cancelados ao longo do processo (ANEEL, 2023a). Apenas no grupo CPFL Energia, o número de solicitações é aproximadamente 25% maior do que as unidades instaladas.

Este crescente número de pedidos de conexão apresenta um desafio significativo para as distribuidoras, que precisam seguir um processo rigoroso de análise técnica e comercial dentro do curto período de re-

sposta estipulado pela agência regulatória (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL). Parte crucial dessa análise envolve a determinação da capacidade de acomodação de GD (do inglês, *hosting capacity* – HC), baseada nos dados técnicos e respeitando a ordem das solicitações. A análise eficiente da capacidade de acomodação é uma das preocupações principais das distribuidoras, pois, atualmente, estima-se que cada solicitação em média tensão (MT) demande 2 horas de estudo detalhado, realizado de forma individual para cada alimentador.

Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de uma ferramenta computacional integrada automática que conecte diferentes bases de dados técnicas e comerciais. Tal ferramenta deve permitir o cálculo detalhado, por barra, da capacidade de acomodação para todas as redes da distribuidora com grande eficiência computacional, possibilitando a análise das solicitações dentro do período determinado. Além disso, a ferramenta deve ser capaz de:

- Realizar o cálculo da capacidade de acomodação de redes de média e baixa tensão;
- Atualizar os resultados do cálculo com frequência elevada, idealmente superior a 1 vez por semana;
- Considerar a existência de uma fila de prioridade dos pedidos de conexão, de forma que os pedidos sejam analisados respeitando a data de criação;
- Realizar cálculo dos custos dos reforços de rede necessários para aumentar a capacidade de acomodação da rede e permitir determinada conexão.

2. Desenvolvimento

A seguir, são apresentados os detalhes da ferramenta computacional proposta no âmbito do Programa de P&D ANEEL, pela CPFL em parceria com a UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) e a ERA (Energy Research and Analytics), juntamente com a descrição de seus principais componentes. Primeiramente, discute-se as bases de dados da distribuidora utilizadas no processo e seus processamentos. Na sequência, é detalhada a etapa de cálculo da capacidade de acomodação de GD. Por fim, são expostos os resultados obtidos a partir da aplicação da ferramenta, demonstrando sua eficácia.

1) ARQUITETURA GERAL DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional realiza a análise automatizada da capacidade de acomodação de GDs com interface gráfica amigável ao usuário, permitindo respostas mais rápidas às solicitações de acesso. Estas informações são atualizadas periodicamente, permitindo que o técnico ou engenheiro da distribuidora tome decisões considerando o cenário atualizado. A arquitetura geral é ilustrada na Figura 1, subdividida em 5 módulos que são descritos nas subseções a seguir.

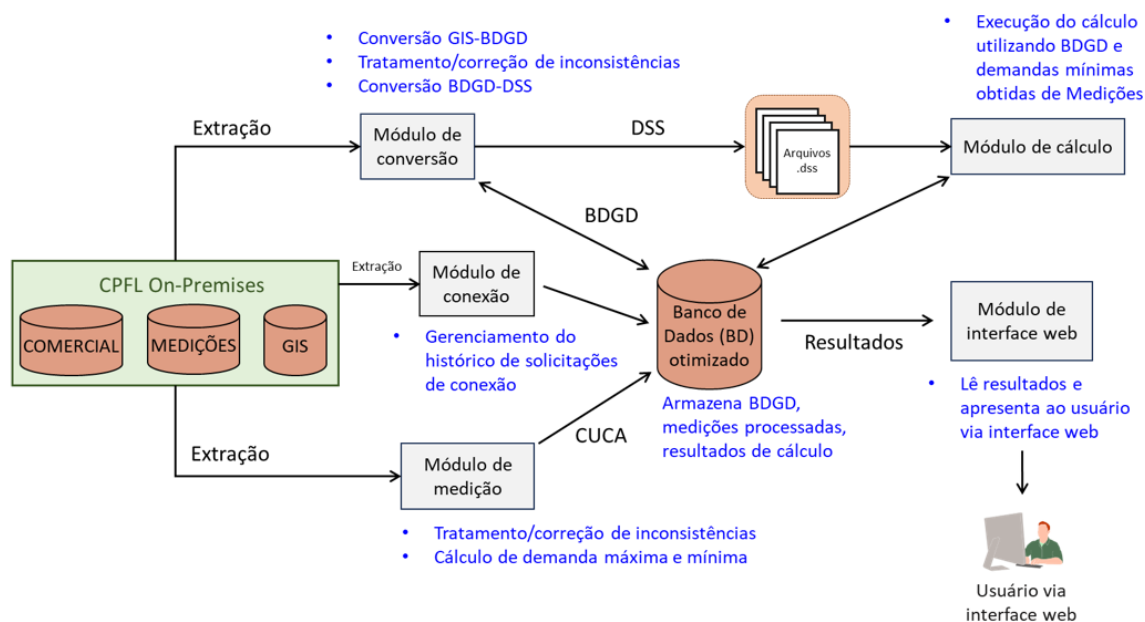


Figura 1 – Arquitetura geral da ferramenta computacional

2) BASES DE DADOS

A maioria dos dados técnicos e comerciais de interesse para o cálculo da capacidade de acomodação se encontram em tabelas estruturadas em linguagem SQL (Structure Query Language, em Oracle). Este tipo de linguagem pode armazenar dados em formato texto, numérico ou binário, sendo este último utilizado para dados geográficos.

As bases de dados utilizadas pela distribuidora são:

COMERCIAL: base com dados de consumo (importado e exportado), serviços de instalação e manutenção, além de solicitações de acesso de mini e micro GD.

MEDIÇÕES (OPERAÇÃO): base com os dados de medições diárias, como potências ativa e reativa, corrente e tensão do início dos alimentadores (subestação) e em alguns pontos intermediários dos alimentadores, em intervalos de 15 minutos.

GIS: base de dados técnica da distribuidora, com dados georreferenciados das redes elétricas, como: capacitores, chaves (fusíveis, religadores etc.), reguladores de tensão de linha, condutores, transformadores, cargas e geradores.

Adicionalmente, a ferramenta computacional utiliza internamente um banco de dados (BD) otimizado para armazenar e consolidar os resultados intermediários dos módulos de conversão, medição, conexão e cálculo, fornecendo-os para a interface gráfica.

3) MÓDULO DE CONVERSÃO

O módulo de conversão é dividido em duas partes principais: conversão da base de dados corporativa para Base de Dados Geográficos da Distribuidora (BDGD) e conversão da BDGD para o formato do programa OpenDSS (DSS).

3.1) CONVERSÃO DA BD CORPORATIVA PARA BDGD

A extração de dados e conversão do formato da base de dados GIS corporativa (Oracle) para a BDGD (armazenada no BD interno da ferramenta) é realizada de forma direta, consistindo apenas em mudança da estrutura de tabelas e dados, sem tratamento para detecção e correção de inconsistências nos dados. São importados apenas os dados da rede elétrica e consumidores que são essenciais para o cálculo de capacidade de acomodação.

3.2) CONVERSÃO BDGD-DSS

Conversão dos dados do formato BDGD para o formato DSS, que é o formato de entrada do programa OpenDSS/DSS-Extensions (MEIRA & KRISHNAMURTHY, 2018), utilizado como motor do módulo de cálculo. Embora seria suficiente realizar a conversão direta da BD corporativa para DSS, este caminho não é adotado porque ao implementar este passo intermediário de montar a BDGD, a ferramenta computacional se torna mais flexível, podendo ser utilizada mais facilmente pela própria ANEEL em estudos regulatórios ou também por outras distribuidoras.

O conversor possui a opção de gerar arquivos DSS com circuitos de MT e baixa tensão (BT) integrados, bem como com os circuitos separados, ou seja, arquivos apenas com a rede de MT e a carga secundária agregada por transformador, e arquivos com a rede de BT explicitamente modelada por transformador.

O principal esforço realizado nesta etapa de conversão BDGD-DSS é o de tratar os dados de forma que seja possível realizar o estudo de cálculo de fluxo de potência. Dentre as dezenas de tratamentos para correção de inconsistências nos dados, vale destacar:

- Correção de faseamento de condutores, consumidores, transformadores, dentre outros equipamentos;
- Preenchimento de campos com dados faltantes (e.g., parâmetros de transformadores não preenchidos, material de condutor não preenchido etc.);
- Verificação de consistência entre a bitola dos condutores e a carga atendida;
- Correção de cargas e demais componentes ilhados da rede;
- Correção do status de chaves de forma a evitar *loops* no alimentador;
- Correção de conectividade entre níveis de média tensão em circuitos que possuem mais de um nível de média tensão (circuitos com classe de tensão A3a e A4);
- Correção de inconsistências entre o tipo de conexão de um banco e o número de equipamentos individuais (e.g., um banco de reguladores delta fechado deve possuir exatamente três equipamentos independentes).

4) MÓDULO DE MEDIÇÃO

Medições obtidas na cabeceira dos alimentadores são utilizadas para determinar o perfil de carregamento típico do alimentador. É aplicado um processamento com base no histórico de medição de 12 meses para excluir as medições consideradas anômalas segundo critérios estabelecidos pela distribuidora, e determinar o carregamento típico do circuito. A detecção e exclusão de anomalias é realizada por diferentes tipos de métodos estatísticos e analíticos.

Após exclusão dos dias com eventos anormais, os dias com valores mínimos e máximos de carga são selecionados para os estudos de capacidade de acomodação.

5) MÓDULO DE CONEXÃO

Para o processamento da fila de solicitações de conexão são utilizadas as bases de dados comercial e de engenharia (GIS). A base de dados GIS é usada para a seleção de todas as unidades consumidoras (UCs), verificação daquelas que já possuem gerador instalado e identificação dos vínculos de consumidores com os respectivos pontos de entrega e transformadores. A base de dados comercial é usada para a seleção das solicitações de conexão de GD e rastreamento de seu *status* (para determinar em qual passo do processo de análise se encontra a solicitação), a fim de identificar, classificar e ordenar as solicitações de conexão em aberto. Com isso é possível determinar se uma solicitação ainda está em análise (e, portanto, deve ser realizada reserva de capacidade no circuito para esta solicitação) e qual solicitação já teve sua análise concluída.

O estado de uma solicitação depende de quais etapas de análise do processo interno da distribuidora já foram cumpridas, e do tempo (número de dias) desde a última etapa de análise realizada. Após atribuição do estado atual de cada solicitação, a metodologia de processamento também verifica se o prazo (número de dias) entre o último evento de uma solicitação e a data atual ainda não violou o limite de dias para resposta do consumidor, estabelecido na REN 1000 (ANEEL, 2021a), que no caso dos microgeradores é 120 dias e no caso dos minigeradores é 12 meses.

As solicitações aprovadas (mas ainda não instaladas no circuito) são consideradas no cálculo da capacidade de acomodação. Isto é feito com o objetivo de reservar capacidade para as solicitações com alta probabilidade de serem instaladas.

6) MÓDULO DE CÁLCULO

A seguir são mostrados detalhes sobre a metodologia de cálculo da capacidade de acomodação de geradores em redes de MT. A metodologia compreende dois métodos principais: preparação e busca. A preparação possui métodos menores concentrados em três áreas: ajustes de carga, geração e configuração da simulação. Com isto, o método de busca utiliza simulação de cálculo de fluxo de potência considerando os dias de menor carregamento do circuito (que são os dias mais críticos para análise da conexão de GD).

6.1) VISÃO GERAL

O algoritmo de cálculo da capacidade de acomodação é ilustrado na Figura 2. O método utiliza como dados de entrada a rede elétrica, as configurações de simulação, as medições de potência e tensão e os limites das métricas analisadas. Primeiro, é realizada a preparação, na qual, em resumo, ajusta-se a simulação para ter resultados similares à medição nas condições atuais.

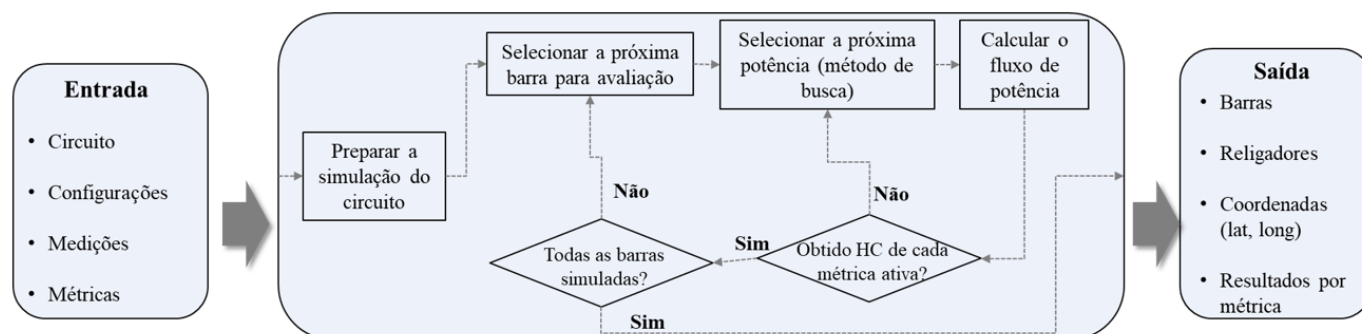


Figura 2 – Algoritmo geral de cálculo da capacidade de acomodação de geradores distribuídos em MT.

6.2) DADOS DE ENTRADA

O conjunto de dados de entrada é composto por quatro blocos descritos a seguir:

Circuito: dados técnicos e geográficos dos elementos do circuito, como linhas, cargas, geradores etc. Estes são fornecidos pelo conversor da BD corporativa para BDGD detalhados no respectivo módulo;

Configurações: conjunto de informações que são utilizadas para preparar e simular o circuito. Estas incluem, por exemplo, número de processos paralelos, método de busca etc.;

Medições: valores da base de dados de medição, processados pelo respectivo módulo;

Métricas: valores limites utilizados na verificação das métricas, detalhados na Seção 6.5.

6.3) PREPARAÇÃO

Antes de determinar a capacidade de acomodação é necessário ajustar os parâmetros da simulação. Os três principais pontos são descritos a seguir.

6.3.1) MEDIÇÃO

Os dados de medição processados são utilizados para ajustar a simulação para que seu resultado atual seja o mais próximo possível dos valores medidos. Para realizar o ajuste, são utilizados os dados de potência ativa, reativa, tensão e corrente para o dia de menor demanda identificado para cada alimentador. Com estes valores, primeiro atualiza-se a tensão, utilizando o valor obtido via medição. Caso não exista medição de tensão para este instante, mantém-se o valor padrão definido de acordo com as práticas da distribuidora. De forma análoga, são ajustadas as demandas de potência ativa e reativa das cargas do circuito de forma que o perfil de carregamento do alimentador se assemelhe ao dia obtido dos dados de medição. Vale

ressaltar que este processo de ajuste deve considerar também a presença da GD já existente no circuito e do novo gerador cuja solicitação está sendo analisada.

6.3.2) GERADORES

Os geradores do circuito são divididos em dois grupos: existentes e em fila. Os elementos do primeiro grupo estão presentes na base de dados georreferenciada e estão em operação ao coletar as medições. Neste grupo, apenas é necessário considerar que os geradores injetam potência de acordo com sua capacidade instalada (ou seja, o estudo considera um dia de geração máxima, com dia limpo, no caso de geração fotovoltaica). O segundo grupo corresponde aos geradores presentes na fila de espera (não instalados), com estado aprovado ou em aberto. Para a simulação, estes elementos são instalados em seus respectivos locais seguindo as mesmas regras dos geradores existentes.

6.3.3) SIMULAÇÃO

É realizada simulação de cálculo de fluxo de potência utilizando a DSS-Extensions (MEIRA & KRISHNAMURTHY, 2018) (implementação alternativa do programa OpenDSS) para cálculo da capacidade de acomodação. A simulação considera 3 dias (dia útil, sábado e domingo) com resolução temporal de 1 hora, ajustadas para que o carregamento do alimentador seja consistente com a medição para cada tipo de dia (i.e., para que a carga simulada seja compatível com a medição do dia útil com carga mais leve, medição do sábado com carga mais leve, medição do domingo com carga mais leve).

6.4) MÉTODO DE BUSCA

O método mais comum existente na literatura é o método de busca linear (KNUTH, 1998), em que a potência do gerador é incrementada gradualmente (com passos pré-definidos) até que um ou mais limites técnicos sejam violados. Nos estudos, é considerado que a potência dos microgeradores pode variar entre zero e 75 kW, enquanto a potência dos minigeradores pode variar entre zero e 5 MW. O passo de aumento da capacidade do gerador durante a busca pode ser definido de acordo com as características da distribuidora, sendo definidos passos distintos para redes MT e BT.

6.5) MÉTRICAS

São utilizadas três métricas técnicas no cálculo da capacidade de acomodação de geradores em redes de MT, descritas a seguir:

Magnitude de tensão: avaliar se todas as barras e nós do sistema apresentam valor dentro do estabelecido como adequado no Módulo 8 do PRODIST para a faixa adequada (ANEEL, 2021b), e.g., 1,05 pu. Não é avaliado o limite inferior, caso o gerador seja trifásico;

Sobrecarga de condutor: avaliar se todos os condutores apresentam magnitude de corrente inferior a 100% da respectiva capacidade nominal;

Inversão de fluxo de potência ativa: avaliar se há fluxo de potência ativa do alimentador para a subestação (injeção) no disjuntor do alimentador (ANEEL, 2023b).

7) MÓDULO DE INTERFACE WEB

Consiste principalmente na interface gráfica para visualização georreferenciada dos resultados de capacidade de acomodação. A interface inclui os seguintes elementos:

Mapa: visualização georreferenciada colorida dos resultados de capacidade de acomodação, ilustrado na Figura 3. É possível aproximar no mapa para visualizar com mais detalhes cada circuito e selecionar um elemento para inspeção;

Informações do elemento selecionado: tipo de segmento, valor individual da capacidade de acomodação, dados de medição, entre outros, de um elemento selecionado pelo usuário no mapa, conforme ilustrado na Figura 4;

Fila de solicitações: tabela com a fila de solicitações de conexão de novos geradores (considerando geradores aprovados e em análise). Possui também a data e a potência do gerador, conforme ilustrado na Figura 5;

Fatores limitantes: seleção de limitante técnico (métrica) é utilizado para calcular a capacidade de acomodação. Por padrão, o mapa ilustra o resultado da mínima potência permissível considerando todos os limitantes técnicos descritos na Seção 6.5, conforme ilustrado na Figura 6;

Filtro de alimentadores: opção para filtrar alimentadores a serem mostrados na interface gráfica;

Características do mapa: seleção do mapa de fundo.

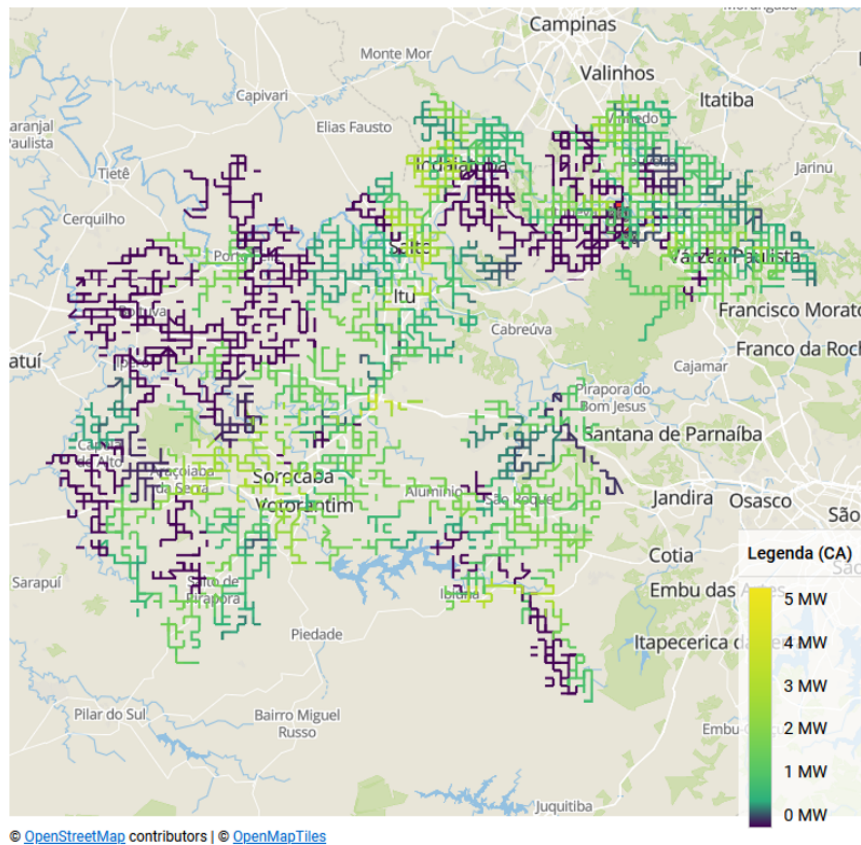


Figura 3 – Mapa da interface gráfica da ferramenta computacional.

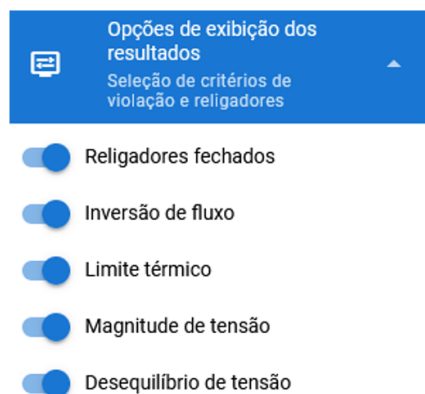


Figura 6 – Métricas na interface gráfica da ferramenta computacional.

8) DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados são analisados a nível micro e macro. Desta forma, são discutidos primeiro os resultados para um alimentador específico, e, na sequência, são analisados os resultados para todos os alimentadores das distribuidoras do grupo CPFL Energia.

8.1) ALIMENTADOR ESPECÍFICO

Os resultados de capacidade de acomodação para a métrica de magnitude de tensão são apresentados na Fig. 7. Com relação aos resultados, nota-se que quanto mais afasta-se da subestação, menor é a capacidade de acomodação. Quanto à sobrecarga, esta depende de dois fatores: ampacidade (bitola) dos condutores e carregamento do circuito. De forma análoga, quanto mais afasta-se da subestação, menor é a capacidade de acomodação, principalmente devido a redução da ampacidade do condutor (condutores mais distantes têm menor bitola).

Por fim, a inversão de fluxo é a métrica mais restritiva para os locais mais próximos das subestações (locais mais distantes tendem a ser limitados por magnitude de tensão). Diferentemente dos resultados para as métricas anteriores, quanto mais distante da subestação, maior a capacidade de acomodação (ligeiramente). Isto ocorre pois o gerador pode injetar mais potência para compensar as perdas técnicas no trajeto até a subestação, portanto, quanto mais distante, maior a potência. Porém, ressalta-se que esta variação do limite de injeção potência para não ocorrer inversão de fluxo é pequena ao longo do alimentador. É possível dizer, com boa aproximação, que o limite por inversão de fluxo é praticamente constante ao longo do alimentador.

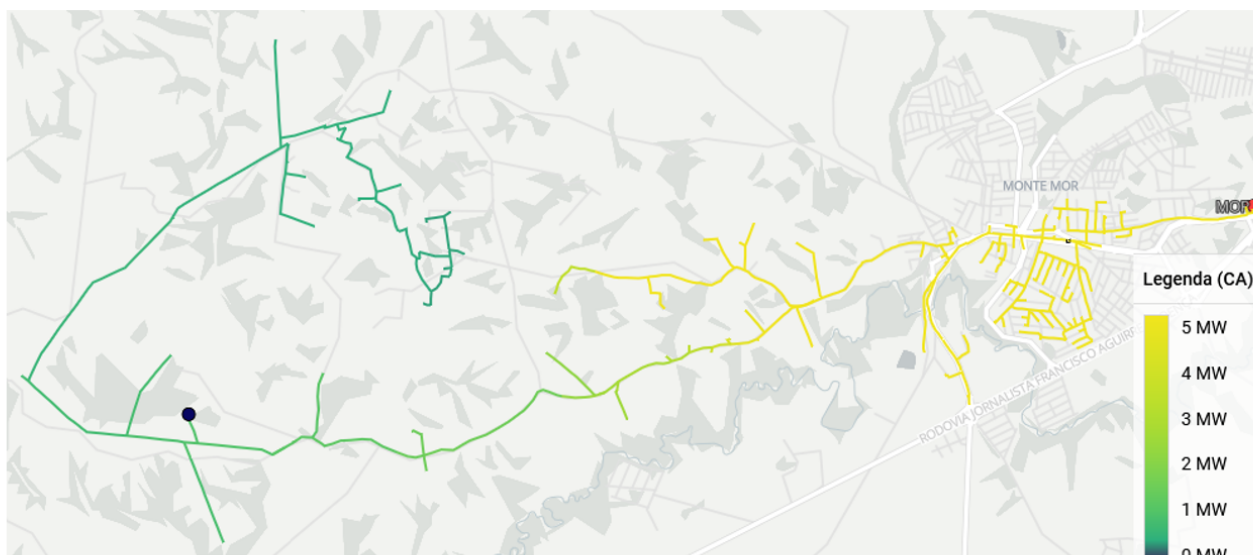


Figura 7 – Capacidade de acomodação georreferenciada para magnitude de tensão em alimentador específico.

8.2) RESULTADOS AGREGADOS

A metodologia de cálculo é aplicada a 3.389 alimentadores da CPFL Energia, sendo totalmente executada em menos de meio dia. O tempo demandado permite que a capacidade de acomodação seja atualizada integralmente com periodicidade diária (por exemplo durante as noites), principalmente, considerando que é improvável que exista um pedido de conexão para cada alimentador no mesmo dia. Em relação à capacidade de acomodação, é notável que a inversão do fluxo de potência é a métrica mais restritiva, conforme ilustrado na Figura 8. A segunda métrica mais restritiva é a magnitude de tensão, seguida da sobrecarga de condutor.

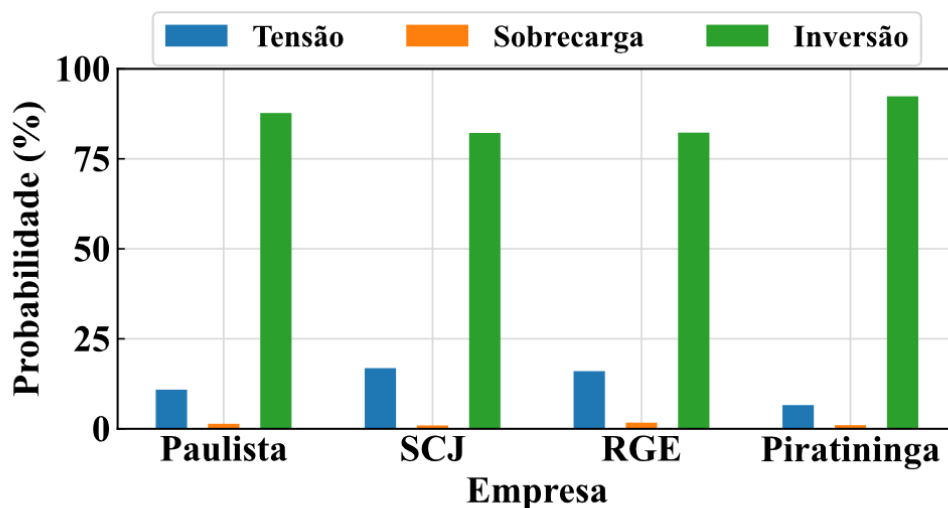


Figura 8 – Métrica mais restritiva da capacidade de acomodação para os alimentadores da CPFL Energia

3. Conclusão

Neste trabalho técnico foram mostrados detalhes sobre a ferramenta computacional integrada para o cálculo da capacidade de acomodação de geradores em redes de MT em desenvolvimento pela CPFL no contexto do Programa de P&D ANEEL. A ferramenta considera as bases de dados técnicas e comerciais da distribuidora. Verificou-se a abrangente aplicabilidade prática da ferramenta computacional para o cálculo de capacidade de acomodação, tanto em relação à eficiência do tempo de processamento quanto à clareza na visualização gráfica dos resultados.

Em relação à capacidade de acomodação, é notável que a inversão do fluxo de potência é a métrica mais restritiva atualmente. A segunda métrica mais restritiva é a magnitude de tensão, seguida da sobrecarga de condutor. É importante ressaltar que as distribuidoras precisam avaliar a reserva de capacidade para solicitações de conexões já aprovadas ou em aberto.

Por fim, destaca-se que a ferramenta está em contínuo desenvolvimento, com foco na sua expansão para redes de baixa tensão e inclusão do cálculo automatizado de reforços de rede (MT e BT), baseado no critério de menor custo, para atender pedidos de conexão que excedam a capacidade de acomodação atual. Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento dessa ferramenta computacional, espera-se ganhos significativos para a distribuidora, com a redução de homens-hora necessários para análise das solicitações de acesso, redução de custos com transgressões de tensão e redução de custos com perdas da rede, porém também vislumbra-se benefício aos consumidores com uma resposta mais rápida e consistente da solicitação.

4. Referências bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021”. 2021a. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acessado em: dezembro, 2024.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021”. 2021b. [On-line]. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>>. Acessado em: dezembro, 2024.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Atendimento a pedidos de conexões MMGD - Mini e Microgeração distribuída - pós Lei 14300”. 2023a. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/atendimento-mmgd-mini-e-micro-geracao-distribuida>> Acessado em: dezembro, 2024.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023”. 2023b. [On-line]. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>>. Acessado em: dezembro, 2024.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Unidades com Geração Distribuída”. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>>. Acessado em: dezembro, 2024.

Knuth D. *The Art of Computer Programming*. Vol. 3, 2ª ed, 1998. Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-201-89685-5.

Meira P. C. M.; Krishnamurthy D., DSS-Extensions. 2018. Disponível em: <<https://dss-extensions.org/>>. Acesso em: dezembro, 2024.