

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo propõe-se a demonstrar as ferramentas e os processos tomados no cálculo da margem de estabilidade de tensão e da capacidade de hospedagem de eletropostos na rede.

Primeiramente define-se a metodologia geral, identificando a fonte dos dados necessários para o estudo, a aplicação na qual a rede é modelada, o método de análise do sistema de potência e o então o ambiente em que os dados gerados são tratados. Em seguida, cada um dos elementos apresentados é elucidado.

3.1 Método A

A Figura [3.1](#) ilustra os passos tomados na execução do estudo e produção de resultados.

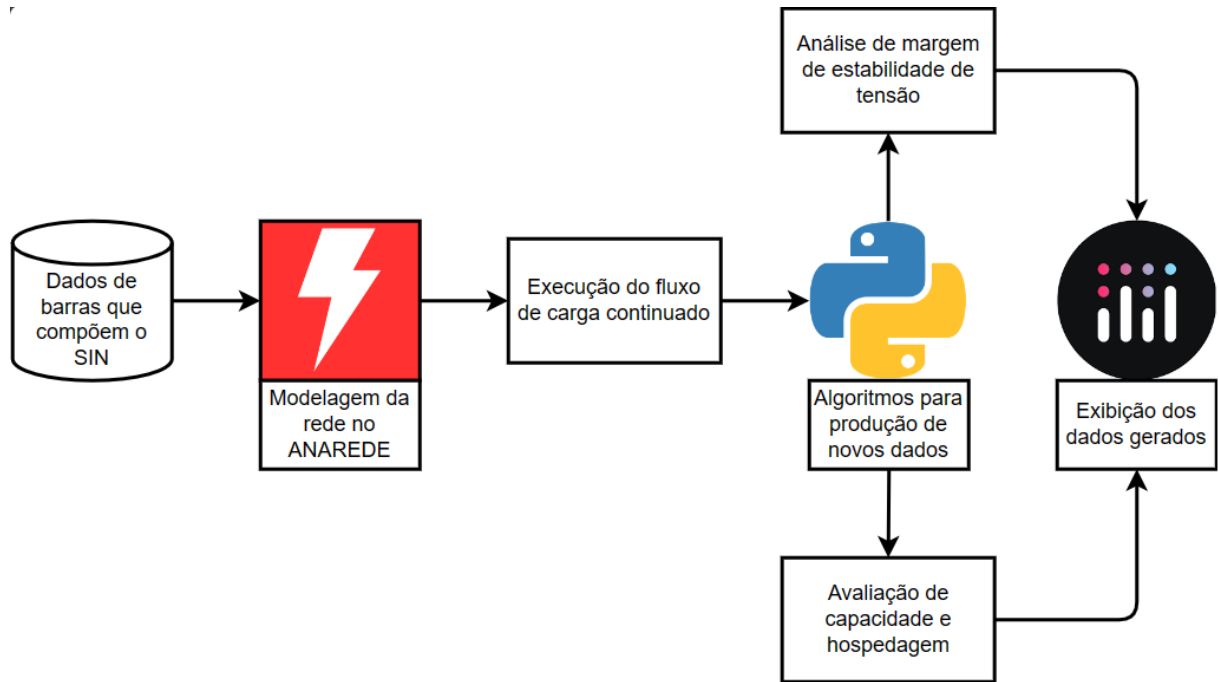


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia utilizada.

Os dados provenientes do Sistema Elétrico são extraídos do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), um documento abrangente que engloba as barras conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), destacando os dados de potências ativa e reativa geradas, potências ativa e reativa consumidas, tensão e corrente elétrica, estado da barra, grupo limite de tensão e seu código de identificação. Após a delimitação da região e a realização dos ajustes no caso base realiza-se o Fluxo de Carga Contínuo (FCC) no *software* ANAREDE. Esse processo resulta em um conjunto de curvas representativas da tensão elétrica em relação à potência ativa consumida pelo sistema, sujeitas a algoritmos de análise desenvolvidos com a linguagem *Python*, responsáveis pela determinação da margem de estabilidade e da capacidade de hospedagem. Os resultados são apresentados através da biblioteca Plotly.

3.2 Modelagem

3.2.1 ANAREDE

O ANAREDE reúne um conjunto de funções de análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente que inclui a simulação de fluxo de potência, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão, entre outras. Apresenta-se como a

escolha ideal para a modelagem da rede dada a compatibilidade com as bases de dados disponibilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

3.2.2 Modelagem da Rede

A modelagem da rede elétrica é um processo que começa pela seleção das barras que não apenas abrangem Manaus, mas também incluem regiões como Iranduba, Presidente Figueiredo e Manacapuru. Essa seleção é baseada em um amplo conjunto de barras que compõem o SIN. Nesta etapa, a área de análise é definida ao escolher barras contidas nos limites geográficos de interesse. Uma vez delimitada a região, o restante do sistema é equivalentado na barra de referência.

3.2.3 Ajuste do Caso Base

A determinação de um caso base é primordial para o estabelecimento de uma referência para todos os outros casos de estudos posteriores. Neste, os circuitos das linhas de transmissão não estão sobrecarregados, os transformadores operam dentro dos seus limites de transferência de potência e todas as barras obedecem aos seus limites de tensão para uma condição de operação segura.

A modelagem inicial do sistema apresentou subtensão nas barras 10393, 10435, 10480, 10485 e 10510, a solução encontrada foi elevar a tensão das barras 10391, 10406, 10436, 10501 e 10503 para 1.04 pu.

3.2.4 Fluxo de Carga Continuado

Com a rede modelada e um caso base determinado, o passo seguinte é do FCC, que consiste na resolução de cálculos de fluxo de potência sucessivos considerando um crescimento da carga do sistema de 0,5% a cada iteração.

O resultado do FCC é um conjunto de curvas que relacionam potência e tensão elétrica, denominadas curvas PV, correspondente a cada uma das barras do sistema. Os dados são armazenados em arquivos .csv.

3.3 Método para Avaliação dos Resultados

A avaliação dos resultados obtidos fundamenta-se em algoritmos desenvolvidos em Python. Este segmento expõe os procedimentos, técnicas e abordagens adotados com o intuito de assegurar uma avaliação precisa e consistente dos resultados obtidos.

3.3.1 Implementação no Python

Python é uma linguagem de programação amplamente reconhecida por sua sintaxe clara e legível. Esta característica torna-a útil pela fácil implementação de processos de leitura dos arquivos gerados com o FCC, desenvolvimento de algoritmos para a determinação das grandezas alvo deste estudo e a visualização de resultados de forma intuitiva e eficiente.

3.3.2 Cálculo da Potência Limite para Condição Operativa Normal

A potência limite para condição operativa normal é o valor mínimo de potência que mantém a tensão elétrica da acima ou igual a 0,95 pu. Esse valor denota a carga máxima a que a barra pode estar sujeita antes que a tensão entregue esteja fora dos limites definidos pelo ONS. Para qualquer valor entre a potência limite o ponto de máximo carregamento do sistema, a barra é capaz de garantir uma operação estável e dentro dos parâmetros aceitáveis.

3.3.3 Determinação da Margem de Estabilidade de Tensão

A margem de estabilidade de tensão é analisada sob dois paradigmas distintos. No primeiro paradigma, considerada-se uma potência de referência máxima fixa, ao passo que a potência inicial varia. O segundo, por sua vez, conta com a variação da potência inicial mas considera o ponto de máximo carregamento como a potência limite das barras do sistema. As subseções seguintes elucidam o processo de determinação da grandeza.

3.3.3.1 Margem de Estabilidade de Tensão Convencional

O processo de determinação da margem de estabilidade convencional obedece os passos definidos no fluxograma da Figura 3.2.

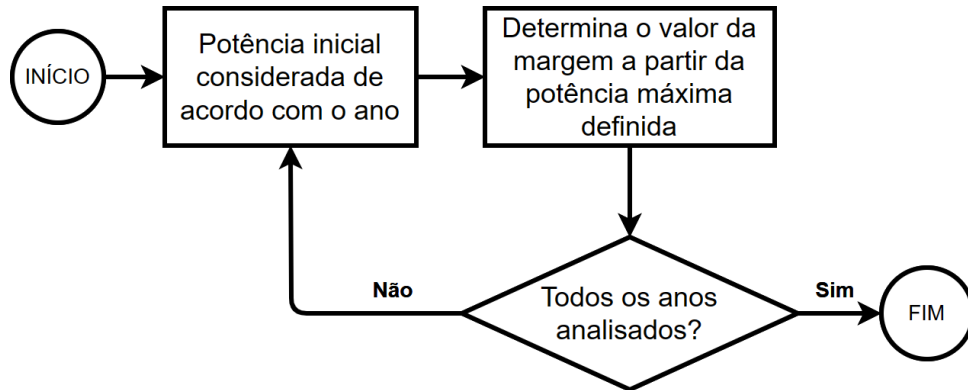


Figura 3.2: Fluxograma para determinação da margem de estabilidade convencional.

Fonte: Autor.

O processo começa com a seleção da potência elétrica correspondente ao primeiro ano de análise. Em seguida, é calculada a margem de estabilidade, levando em conta um ponto de máximo carregamento específico. Este procedimento é repetido para cada ano no conjunto de análise até que a margem de estabilidade seja determinada para todos os anos considerados.

3.3.3.2 Margem de Estabilidade de Tensão Operacional

A operação de cálculo da margem de estabilidade operacional obedece os passos definidos no fluxograma da Figura 3.3.

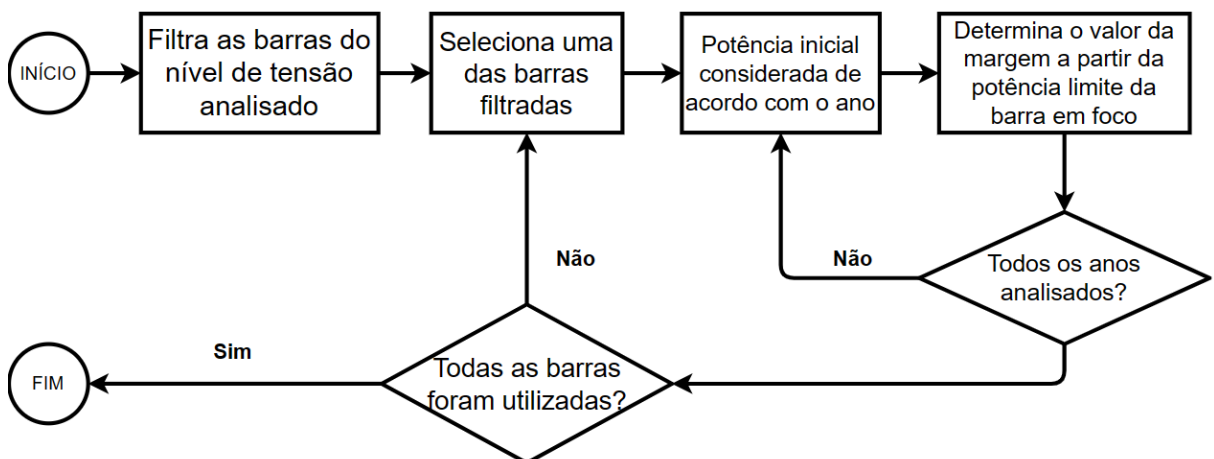


Figura 3.3: Fluxograma para cálculo da margem de estabilidade operacional.

Fonte: Autor.

O procedimento inicia com o filtração das barras que estão dentro do nível de tensão especificado. A primeira barra é então escolhida dentre as filtradas e, utilizando a potência elétrica correspondente ao primeiro ano de análise, é calculada a margem de estabilidade. O ponto de máximo carregamento considerado é a potência limite da barra selecionada. Esta margem é recalculada levando em conta as potências dos anos subsequentes. Quando todos os anos forem analisados, uma nova barra é selecionada, repetindo-se o processo até que não reste mais nenhuma.

3.3.3.3 Margem de Estabilidade de Tensão Probabilística

A metodologia para aferição a margem de estabilidade probabilística segue os passos estabelecidos no fluxograma apresentado na Figura 3.4.

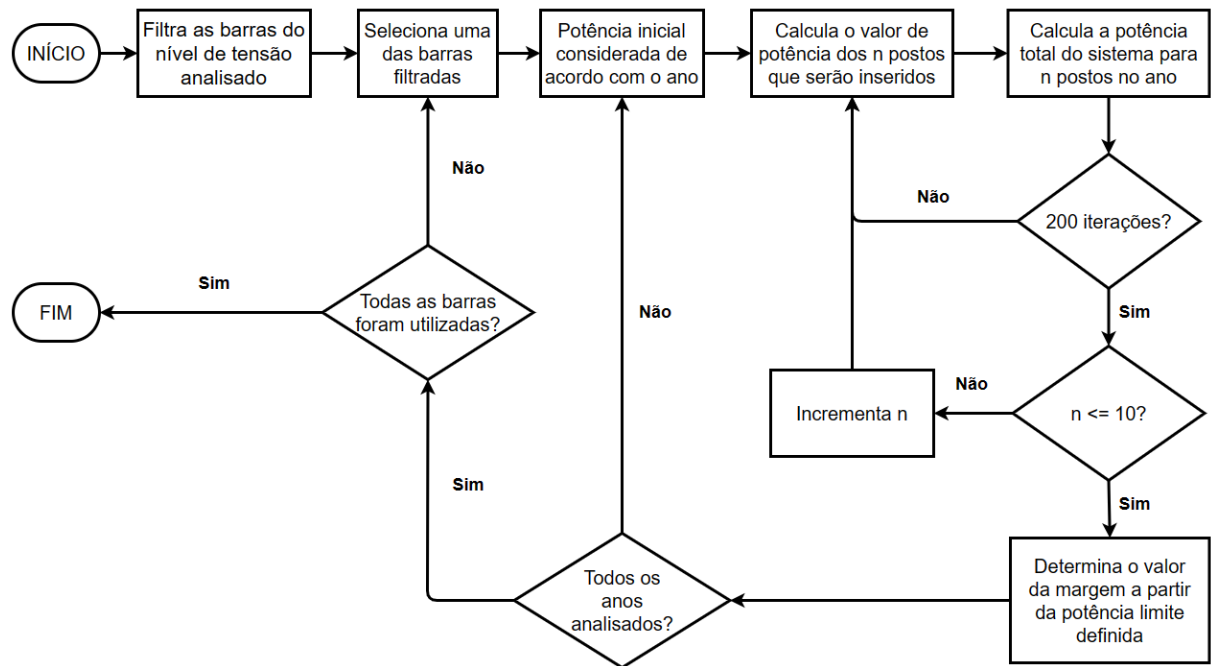


Figura 3.4: Fluxograma para aferição da margem de estabilidade probabilística.

Fonte: Autor.

A operação inicia com o filtração das barras que estão dentro do nível de tensão especificado. Em seguida, a primeira barra é selecionada dentre as barras filtradas. A potência total do sistema é calculada através da soma da potência elétrica correspondente ao primeiro ano de análise com a potência dos postos de carregamento, a quantidade inicial destes é unitária. Após 200 iterações desta etapa, o número de eletropostos é incrementado em um, até que atinja dez. A margem é calculada considerando um ponto de máximo carregamento fixo. Com todos esses valores de margem determinados, o processo é refeito

considerando os anos subsequentes. Após essa reanálise, a próxima barra é selecionada e o ciclo recomeça.

3.3.3.4 Margem de Estabilidade de Tensão Probabilística Operacional

O processo de estimação da margem de estabilidade probabilística operacional obedece os passos definidos no fluxograma da Figura 3.5:

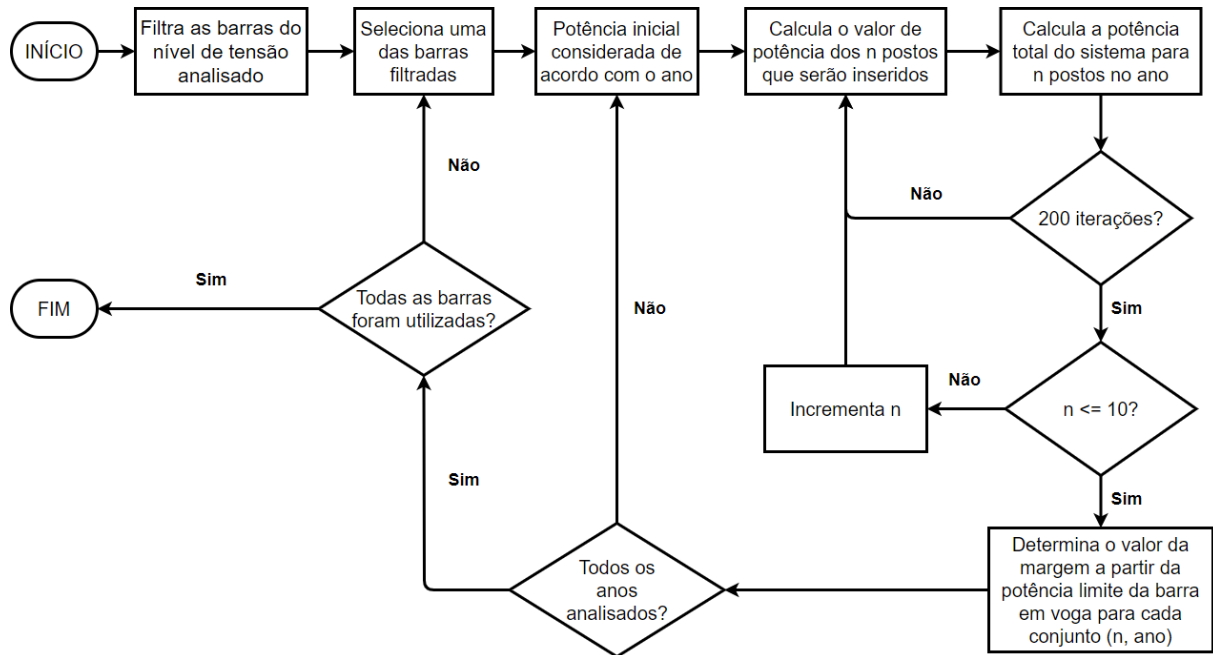


Figura 3.5: Fluxograma da estimação da margem de estabilidade probabilística operacional.

Fonte: Autor.

A operação inicia com a filtração das barras dentro do nível de tensão especificado. Em seguida, a primeira barra é selecionada dentre as filtradas. A potência total do sistema é calculada através da soma da potência elétrica correspondente ao primeiro ano de análise com a potência dos postos de carregamento, a partir de um. Após 200 iterações desta etapa, o número de eletropostos é incrementado em um, até que atinja dez. A margem de estabilidade é calculada considerando a potência limite da barra selecionada. Uma vez com os valores da margem determinados, o processo é refeito considerando os anos subsequentes. Após essa reanálise, a próxima barra é selecionada e o ciclo recomeça.

3.3.4 Capacidade de Hospedagem

A avaliação da capacidade de hospedagem segue duas perspectivas distintas, semelhantes à abordagem da margem de estabilidade de tensão. Na primeira, a potência máxima permanece constante, enquanto a potência inicial varia. Na segunda, a potência máxima é definida pela potência limite das barras do sistema, e tanto a potência inicial quanto a máxima diversificam-se.

A determinação da quantidade de eletropostos que podem ser inseridos a cada ano e número de barras consideradas na inserção obedece os processos definidos na Figura 3.6.

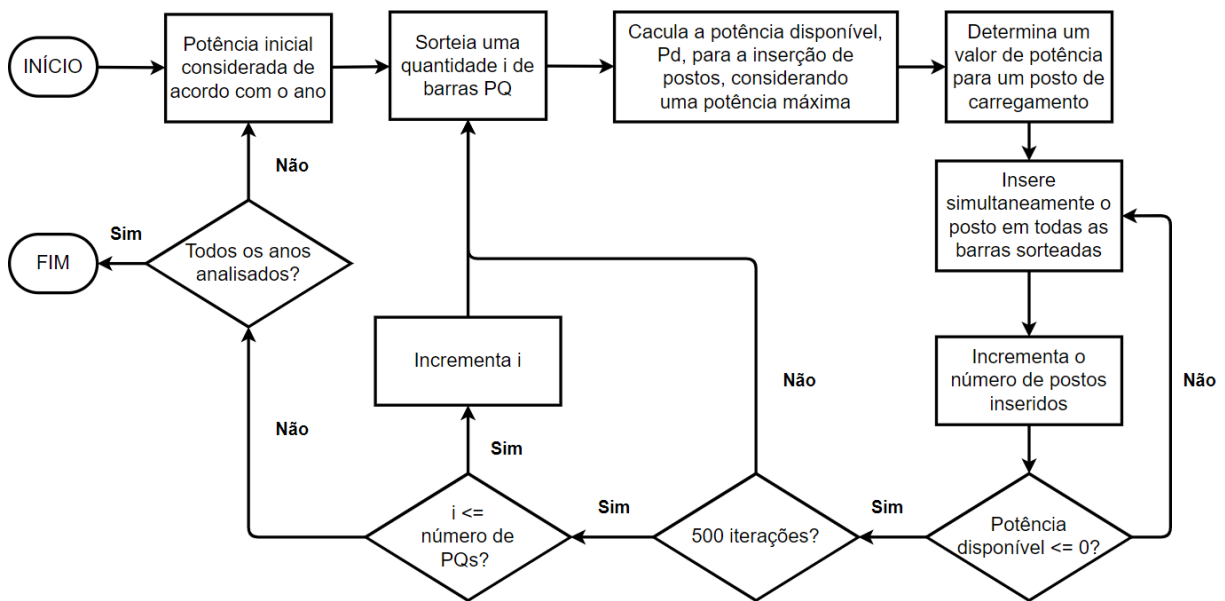


Figura 3.6: Fluxograma de análise de capacidade de hospedagem.

Fonte: Autor.

O primeiro passo é a seleção da potência inicial do primeiro ano de análise. Então, uma quantidade i de barras de carga é selecionada aleatoriamente, começando a partir de uma. Calcula-se a potência disponível, resultante da diferença entre a potência máxima fixa e a potência de carga instalada. Um dos valores possíveis para o posto de carregamento é escolhido e inserido na barra selecionada, o que implica em adicionar a potência do posto à potência de carga do sistema. Após a inserção, o número de eletropostos conectados é incrementado e reinserido na barra enquanto a potência disponível for maior que zero. Esse processo é repetido por 500 vezes. Se i for menor que a quantidade de barras de carga, o valor de i é incrementado e o processo reiniciado. Ao repetir isso para todos os anos, encerra-se o processo.

3.3.5 Capacidade de Hospedagem Operacional

O cálculo da capacidade de hospedagem operacional é feito de acordo com o fluxograma da Figura 3.7.

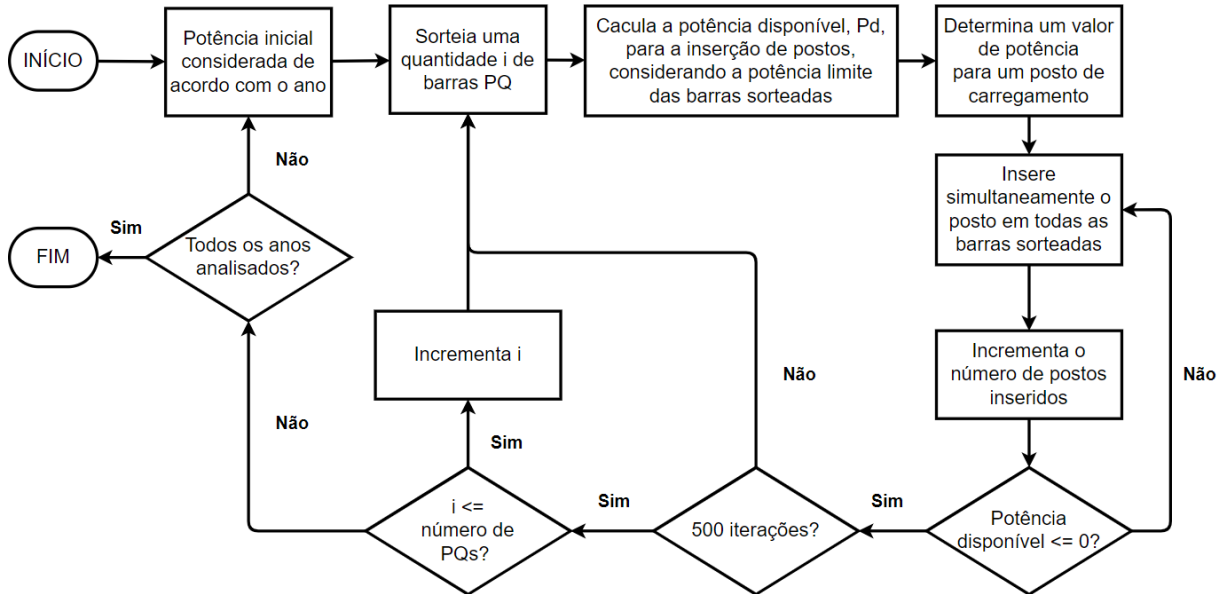


Figura 3.7: Fluxograma de cálculo de capacidade de hospedagem operacional.

Fonte: Autor.

O procedimento inicia com a seleção da potência inicial no primeiro ano de análise. Posteriormente, uma quantidade i de barras de carga é escolhida de forma aleatória, começando com uma. A potência disponível é calculada como a diferença entre a potência limite das barras selecionadas e a potência de carga instalada. Um dos valores possíveis para o posto de carregamento é então selecionado e incorporado à barra escolhida. Após essa inserção, o número de eletropostos conectados é incrementado e reintroduzido na barra enquanto a potência disponível permanecer acima de zero. Este processo é repetido por 500 iterações. Se i for menor que a quantidade de barras de carga, o valor de i é incrementado, reiniciando o processo. Ao repetir essas etapas para todos os anos, o procedimento é encerrado.

3.4 Considerações Finais

A metodologia proposta para avaliação da estabilidade de tensão e capacidade de hospedagem de eletropostos em uma rede elétrica apresenta uma abordagem detalhada, estruturada e genérica, de fácil replicação a redes de variados tamanhos. A utilização de

dados provenientes do SIN, a modelagem da rede no ANAREDE e a aplicação de algoritmos em Python para análise dos resultados demonstram uma integração entre fontes de informação, ferramentas de modelagem e linguagem de programação. As diferentes abordagens para avaliar a margem de estabilidade de tensão e capacidade de hospedagem, seja por paradigmas convencionais ou probabilísticos, oferecem uma visão ampla dos possíveis cenários operacionais do sistema diante da introdução de eletropostos. Essa metodologia permite não apenas compreender a viabilidade de integração de postos de carregamento na rede, mas também oferece uma base sólida para futuras análises e otimizações do sistema elétrico.

Capítulo 4

Análise de Resultados

O Capítulo 3 detalhou as ferramentas e processos realizados na produção dos resultados. A determinação da margem de estabilidade de tensão e a capacidade de hospedagem deve seguir métodos bem definidos e confiáveis a fim de obter valores que descrevam um comportamento preciso da rede frente ao aumento de carga tanto periódico quanto proveniente dos postos de carregamento.

Este capítulo apresenta o sistema elétrico analisado, seus limites geográficos, características físicas e elétricas. Em sequência é feita a explanação de aspectos de apoio ao estudo, como a taxa de crescimento da carga do sistema, a delimitação das barras examinadas e o valor de potência consumida pelos eletropostos. Logo em seguida, são apresentados os casos de estudo. Define-se um caso como o cálculo de uma grandeza sob determinadas condições, como ponto de máximo carregamento específico, manutenção ou não da condição de operação segura e agrupamento, ou não, de barras pertencentes a um mesmo nível de tensão. Para cada um dos casos varia-se um ou mais parâmetros dentre os apresentados.

A primeira grandeza analisada é a margem de estabilidade de tensão. Esta é estudada sob duas perspectivas, sem a conexão de eletropostos à rede, em que o crescimento periódico e o ponto de máximo carregamento são os parâmetros considerados, e com a conexão destes, em que a quantidade de postos de carregamento, a potência anual e o ponto de máximo carregamento são parâmetros relevantes.

A capacidade de hospedagem é a segunda variável em foco neste estudo e é analisada sob duas perspectivas, tal qual a margem de estabilidade de tensão. O primeiro caso considera um ponto de máximo carregamento fixo, carga instalada para cada um dos anos

e a quantidade de barras em que ocorrerá a inserção de eletropostos, enquanto no segundo caso o ponto de máximo carregamento passa a ser a potência limite para manutenção da condição de operação segura de cada uma das barras.

4.1 Rede Elétrica

A rede elétrica avaliada neste trabalho supre a demanda de energia elétrica da região metropolitana de Manaus, constituída pela capital e os municípios de Presidente Figueiredo, Iranduba e Manacapuru, como apresenta a Figura 4.1.

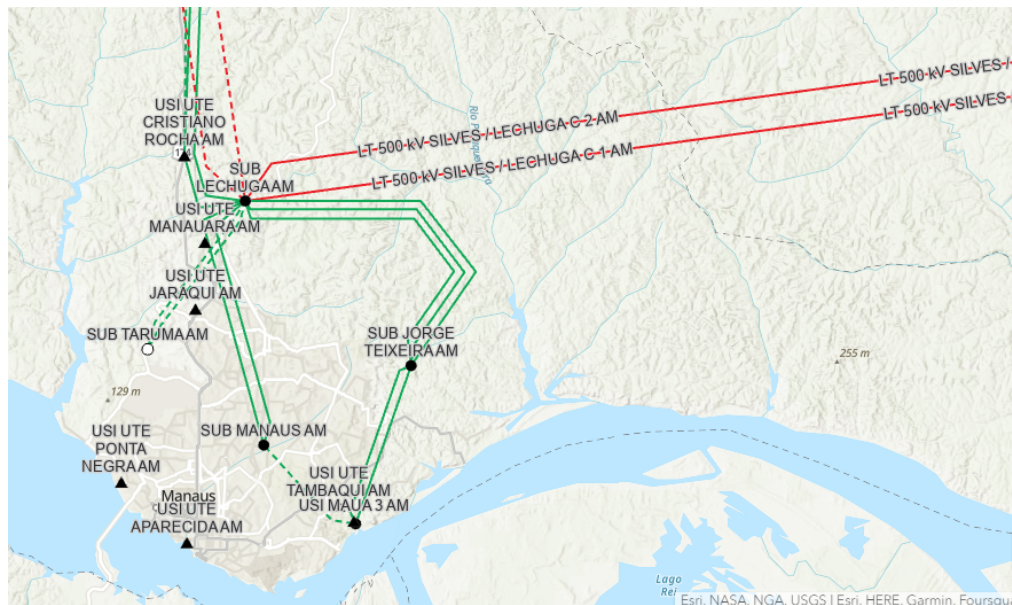


Figura 4.1: Mapa da região metropolitana de Manaus.

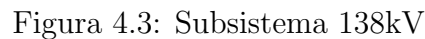
Fonte: SIN Maps, 2023.

O sistema é composto por níveis de tensão de transmissão e subtransmissão, entre eles 500kV, 230kV, 138kV e 69kV. A barra de referência pertence ao nível de tensão de 500kV e é interna à subestação de Silves, onde realiza-se a inserção do equivalente de Thévenin do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A Figura 4.2 exhibe os subsistemas de 500kV e 230kV.

Na subestação Mauá III existem duas UTEs conectadas, cuja geração é entregue à rede através de um transformador de 250MVA de capacidade e reatância de 5,6% cada. Nesta subestação a tensão também é reduzida a 138kV através de cinco transformadores reguladores de tensão de 150MVA de capacidade e reatância de 7,45%.

O subsistema de 138kV está identificado na Figura 4.3, na qual é possível ver conexões com os subsistemas de 69kV e 230kV.



A partir de Lexuga a transmissão em 138kV é direcionada para as subestações Jaraqui 2, Amazonas e Rio Preto. Em Mauá III ocorre a redução da parte dois do subsistema de 69kV, realizado por um conjunto de quatro transformadores reguladores de tensão de 150MVA e reatância de 10,45%. O mesmo ocorre na subestação Amazonas, mas as características e a quantidade dos transformadores reguladores de tensão empregados é diferente, sendo entes três de 60MVA e reatância de 20%. A conexão à Jorge Teixeira é

mantida por dois circuitos de 30km, enquanto à Manaus é feita por um circuito de 13km.

No município de Iranduba a transmissão de 138kV também é reduzida a 69kV. Emprega-se um transformador regulador de tensão de 50MVA e reatância de 0,36%.

A Figura 4.4 ilustra a parte do subsistema de 69kV cujas barras estão nas regiões oeste e sul da cidade, além dos municípios de Iranduba e Manacapuru.

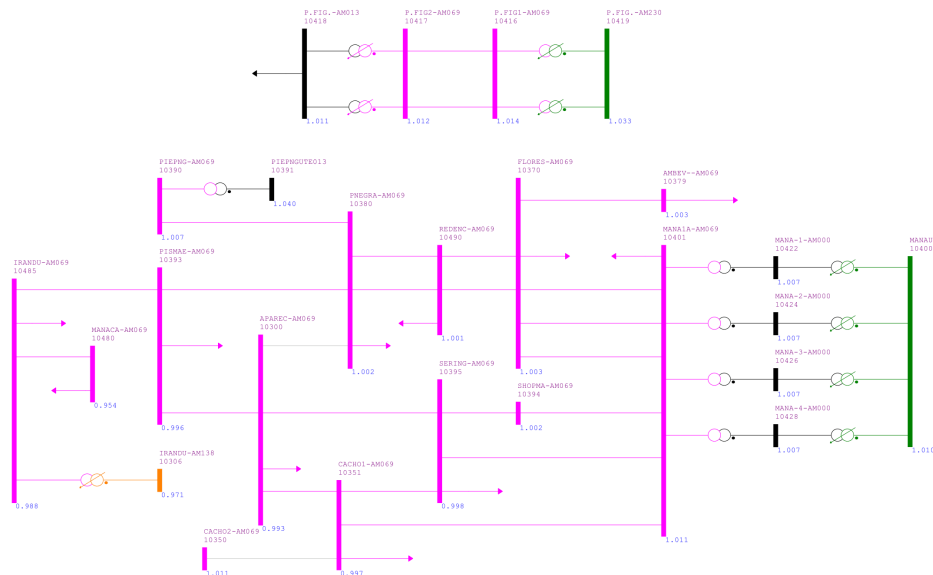


Figura 4.4: Subsistema 69kV - Zonas oeste e sul, Presidente Figueiredo, Iranduba e Manacapuru.

Fonte: Autor.

A UTE Ponta Negra conecta-se à rede através deste subsistema, a geração é entregue através de um transformador elevador de tensão com capacidade de 100MVA e reatância de 4,12%. A carga do município de Presidente Figueiredo é abastecida em 13,8kV, tensão obtida através da redução realizada por dois transformadores reguladores de tensão de 30MVA e reatância de 40%.

Na Figura 4.5 está a parte do subsistema de 69kV cujas barras estão nas zonas central, norte e leste da cidade.

Tabela 4.1: Dados das barras analisadas.

| Código | Nome | Nível de Tensão (kV) | Potência Limite (MW) |
|--------|--------------|----------------------|----------------------|
| 10111 | LECHUG-AM138 | 138 | 4.362,47 |
| 10300 | APAREC-AM069 | 69 | 4.093,52 |
| 10306 | IRANDU-AM138 | 138 | 2.562,39 |
| 10308 | PARQ10-AM138 | 138 | 2.709,09 |
| 10310 | DI-4—AM138 | 138 | 4.239,90 |
| 10312 | RIOPTE-AM138 | 138 | 4.362,47 |
| 10313 | AMAZON-AM138 | 138 | 4.362,47 |
| 10320 | MAUAB1-AM069 | 69 | 3.491,50 |
| 10325 | MAUAB2-AM069 | 69 | 3.491,50 |
| 10335 | MAUA2M-AM069 | 69 | 3.501,28 |
| 10344 | CONSE1-AM069 | 69 | 3.520,84 |
| 10345 | CONSE2-AM069 | 69 | 3.061,17 |
| 10350 | CACHO2-AM069 | 69 | 3.295,89 |
| 10351 | CACHO1-AM069 | 69 | 4.239,90 |
| 10370 | FLORES-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10379 | AMBEV—AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10380 | PNEGRA-AM069 | 69 | 4.239,90 |
| 10390 | PIEPNG-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10393 | PISMAE-AM069 | 69 | 4.108,04 |
| 10394 | SHOPMA-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10395 | SERING-AM069 | 69 | 4.239,90 |
| 10401 | MANA1A-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10402 | MANAU2-AM069 | 69 | 3.061,17 |
| 10416 | P.FIG1-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10417 | P.FIG2-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10420 | DISTR1-AM069 | 69 | 3.335,01 |
| 10421 | CESPEC-AM069 | 69 | 3.286,11 |
| 10430 | CIDNOV-AM069 | 69 | 2.777,54 |
| 10440 | DISTR2-AM069 | 69 | 3.423,03 |
| 10445 | TAMBAQ-AM069 | 69 | 3.618,64 |
| 10450 | SJOSE—AM069 | 69 | 3.080,73 |
| 10451 | PLACIB-AM069 | 69 | 3.276,33 |
| 10460 | STOANT-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10466 | SIVAM—AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10480 | MANACA-AM069 | 69 | 2.024,48 |
| 10485 | IRANDU-AM069 | 69 | 2.982,93 |
| 10490 | REDENC-AM069 | 69 | 4.362,47 |
| 10492 | MARAPA-AM069 | 69 | 3.315,45 |
| 10504 | MAUA-3-AM138 | 138 | 4.239,90 |
| 10505 | MAUA-3-AM069 | 69 | 3.520,84 |
| 10509 | MUBL4M-AM069 | 69 | 3.491,49 |
| 10511 | J.TEIX-AM138 | 138 | 4.154,73 |
| 10513 | MUBL4D-AM069 | 69 | 3.481,71 |
| 10520 | MUTIRA-AM138 | 138 | 3.344,79 |
| 10530 | CGRAND-AM138 | 138 | 2.757,99 |
| 10540 | COMPEN-AM138 | 138 | 2.513,48 |
| 10545 | CENTRO-AM138 | 138 | 2.552,61 |
| 10550 | DISTR3-AM138 | 138 | 4.108,04 |
| 10700 | JARAQ2-AM138 | 138 | 4.362,47 |

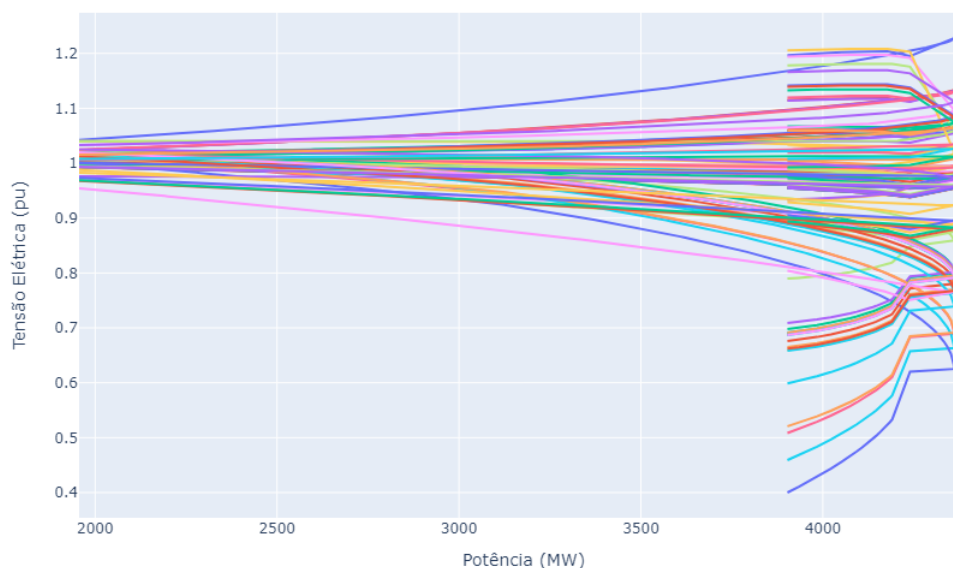


Figura 4.6: Curvas PV das barras da rede.

Fonte: Autor.

A Figura 4.6 apresenta as curvas PV de todas as 84 barras da rede. O eixo das abscissas mostra o incremento da potência do sistema a um passo de 0,5%, escolhido especificamente para este estudo, e a que tensão determina barra está submetida, no eixo das ordenadas.

4.2.1 Crescimento Periódico de Carga

A carga cresce a uma taxa média anual de 3,4%, inferior de 2,8% e superior de 4,1%, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), estudo produzido pelo ONS. A fim de avaliar o cenário de estresse intenso ao sistema elétrico, considera-se que a carga do sistema cresça de acordo com taxa superior. A análise propõe-se a ser bianual, o que implica em um aumento de 8,2% de carga entre os anos dispostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Cargas bianuais.

| Ano | Potência (MW) |
|------|---------------|
| 2026 | 1.642,69 |
| 2028 | 1.777,39 |
| 2030 | 1.923,14 |
| 2032 | 2.080,83 |
| 2034 | 2.251,46 |
| 2036 | 2.436,08 |

4.2.2 Potência Consumida pelos Eletropostos

A justificativa encontra-se na avaliação do comportamento da rede após a conexão de postos de carregamento de veículos elétricos. Para tal, os postos de recarga conectados na rede são produzidos pela WEG, empresa nacional, disponíveis em quatro modelos diferentes [WEG \(2023\)](#). A diferença entre os modelos está na potência máxima consumida da rede e na potência entregue ao usuário.

Tabela 4.3: Modelos da estação de carregamento WEG WEMOB.

| Modelo | Potência Consumida (kW) | Potência Entregue (kW) | |
|-------------|-------------------------|------------------------|----|
| | | CC | CA |
| WEMOB-S-060 | 114 | 60 | 43 |
| WEMOB-S-090 | 147 | 90 | 43 |
| WEMOB-S-120 | 180 | 120 | 43 |
| WEMOB-S-150 | 213 | 150 | 43 |

Fonte: Elaborada pelo autor com base em WEMOB Estações de Recarga para Veículos Elétricos, WEG, 2023.

A Tabela [4.3](#) demonstra os diferentes modelos de estações de carregamento, sua potência consumida e potência disponibilizada. Nota-se que a potência consumida cresce junto com a potência disponibilizada em corrente contínua, apesar da potência entregue em corrente alternada manter-se constante.

Para viabilizar a análise probabilística do efeito da conexão dos postos de recarga na margem de estabilidade e na capacidade de hospedagem, considera-se que os postos de

recarga terão três estações em operação simultânea quando inseridos no sistema. Como existem quatro modelos distintos de estações, o valor de n é igual a quatro e considerando o funcionamento simultâneo de três desses modelos, k é igual a três. Substituindo estes valores na Equação ??, tem-se:

$$C(6, 3) = \frac{6!}{3! \cdot 3!} = 20 \quad (4.1)$$

Com base na Equação 4.1, existem 20 combinações possíveis e únicas. Observou-se empiricamente que, somando os valores de potência consumida em cada uma dessas configurações possíveis, obtém-se um conjunto de dez valores distintos de potência que um posto pode consumir.

4.3 Avaliação da Margem de Estabilidade de Tensão

Os casos apresentados nesta seção não contam com a inserção de postos de carregamento na rede elétrica, permitindo, assim, analisar de maneira isolada o efeito do aumento de carga periódico na margem de estabilidade

4.3.1 Margem de Estabilidade Convencional

Esta análise não prioriza a garantia da condição de operação segura em relação à tensão elétrica, mas é útil para avaliar até que ponto a rede consegue receber carga antes que ocorra um colapso de tensão, por isso tem-se $P_{PMC} = 4.362,47\text{MW}$.

A Figura 4.7 apresenta os valores da margem com o passar dos anos.

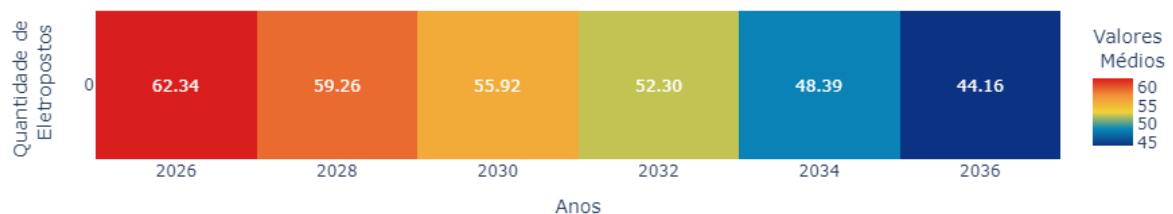


Figura 4.7: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional através dos anos.

Fonte: Autor.

O aumento da carga do sistema causa a queda da margem de 62,34%, em 2026, para

44,16%, em 2036. Este caso de análise apresenta valores da margem de estabilidade robustos e longe da margem de segurança mínima, definida entre 4% e 7%. A vultosidade da margem ocorre pela discrepância entre o PMC considerado e a potência inicial de cada um dos anos analisados.

4.3.1.1 Margem de Estabilidade Convencional para 138kV

Neste caso sistema é submetido ao ponto de máximo carregamento da barra mais fraca pertencente ao nível de tensão de 138kV. Entende-se por barra mais fraca aquela com a menor potência limite para condição de operação segura.

O ponto de máximo carregamento passa a ser potência limite da barra de código 10540, nomeada COMPEN-AM138, sendo $P_{PMC} = 2.513,49$ MW.

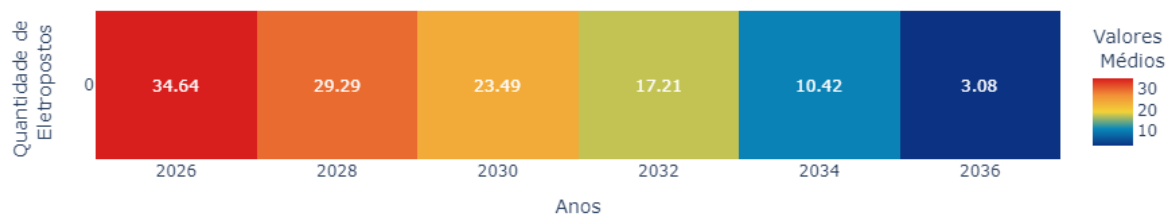


Figura 4.8: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional para 138kV através dos anos.

Fonte: Autor.

Através da avaliação da Figura 4.8, nota-se que os valores da margem da rede diminuem de 36,64%, em 2026, a 3,08%, em 2036. Este caso apresenta valores da margem de estabilidade baixos e próximos de um colapso de tensão nos anos finais de análise, visto que a margem do sistema já está fora do intervalo de segurança no último ano, o que indica a necessidade de reforços na rede, a fim de que mais cargas possam ser alocadas e a diminuição da margem seja atenuada.

4.3.1.2 Margem de Estabilidade Convencional para 69kV

O sistema é exposto ao ponto de máximo carregamento da barra mais fraca pertencente ao nível de tensão de 69kV. O ponto de máximo carregamento, portanto, corresponde à potência limite da barra de código 10480, nomeada MANACA-AM069, sendo $P_{PMC} = 2.024,48$ MW.



Figura 4.9: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional para 69kV através dos anos.

Fonte: Autor.

Ao observar a Figura 4.9, nota-se que a margem continua a diminuir, chegando a 18,86% em 2026, e atingindo valores nulos a partir de 2032, indicando um colapso de tensão no sistema.

Este caso revela margens de estabilidade muito baixas, o que se deve ao emprego de um ponto de máximo carregamento muito próximo das potências de operação anuais. Em 2032 a potência de operação da rede já ultrapassa o ponto de máximo carregamento considerado.

4.3.1.3 Comparativo entre Valores Margem de Estabilidade

Através dos três casos apresentados nesta seção, nota-se o impacto do ponto de máximo carregamento sobre os valores da margem de estabilidade. A comparação ano a ano mostra uma queda brusca nos resultados encontrados. A Tabela 4.4 ilustra a diminuição dos valores da margem com o ponto de máximo carregamento.

Tabela 4.4: Margem de estabilidade de tensão percentual por ano e PMC.

| Ano | Convencional (%) | 138kV (%) | 69kV (%) |
|------|------------------|-----------|----------|
| 2026 | 62,34 | 34,64 | 18,86 |
| 2028 | 59,26 | 29,29 | 12,21 |
| 2030 | 55,92 | 23,49 | 5,01 |
| 2032 | 52,30 | 17,21 | 0 |
| 2034 | 48,39 | 10,42 | 0 |
| 2036 | 44,16 | 3,08 | 0 |

O ano de 2026 não apresenta problemas em nenhum dos três casos, com valores da

margem de 62,34% para PMC convencional, 34,64% para PMC em 138kV e 18,86% para o PMC em 69kV. Apesar dos valores naturalmente menores em 2028, as margens obtidas ainda estão longe de valores alarmantes, com 59,26%, 29,29% e 12,21%, respectivamente. Em 2030, o sistema entra no intervalo de segurança da margem de estabilidade, com 5,01% em 69kV, 55,92% e 23,49% para os outros dois casos. Em 2032 a margem convencional cai pouco, atingindo 52,30%, 17,21% e margem nula. Em 2034 vê-se 48,39%, 10,42% e margem nula para PMC de 69kV. Em 2036 os valores da margem são 44,16%, 3,08% e nulo.

A queda nos valores da margem com o passar dos anos ocorre pelo o aumento da potência inicial P_0 , conforme a Equação ???. Isso decorre do crescimento do consumo de potência da rede elétrica pela carga. A queda dos valores caso a caso, por outro lado, acontece pela variação do parâmetro $P_{\text{máx}}$, modificado para avaliar o comportamento da rede sob pontos de máximo carregamento característicos dos grupos de tensão selecionados, junto do aumento de consumo de energia elétrica.

Em 2032, um colapso de tensão poderia causar um efeito cascata, começando por Manacapuru e afetando o restante do sistema. Isso ocorre porque a barra 10480, que fornece energia elétrica em 69kV para o município, tem uma potência limite menor que a potência de operação do ano em questão e, quando considerada como PMC no terceiro caso desta subseção, apresenta o valor nulo para a margem.

4.3.2 Margem de Estabilidade Operacional

A análise dos valores da margem de estabilidade operacional visa determinar a margem a partir do agrupamento de barras de mesmo nível de tensão, conforme mostra a Figura 3.3. Dessa maneira, é possível entender como os subsistemas reagem ao incremento de carga. O ponto de máximo carregamento passa a ser o valor de potência limite que garante condição de operação segura para a barra selecionada.

4.3.2.1 Margem de Estabilidade Operacional para 138kV

Nesse nível de tensão existem 14 barras, com limites de potência entre 2.513,49 e 4.362,47 MW. O limite inferior é definido pela barra 10540, COMPEN-AM069, e o limite superior corresponde à potência limite das barras 10111, 10312, 10313, e 10700.

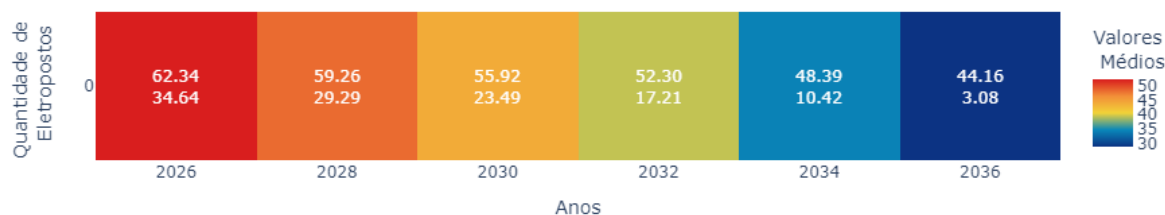


Figura 4.10: Evolução da margem de estabilidade de tensão operacional para 138kV através dos anos.

Fonte: Autor.

A margem de estabilidade de tensão segue a tendência de reduzir com o passar dos anos, conforme a Figura 4.10. Em 2026 os valores da margem estão entre 62,34% e 34,64%. Em 2036 a margem estará entre 44,16% e 3,08%, o que é preocupante, visto que neste ano o sistema estaria fora da margem de segurança e perigosamente próximo de um colapso de tensão.

4.3.2.2 Margem de Estabilidade Operacional para 69kV

Nesse nível de tensão existem 35 barras, com limites de potência entre 2.024,48MW e 4.362,47MW. O limite inferior é definido pela barra 10480, MANACA-AM069, e o limite superior corresponde à potência limite das barras 10370 a 10490. A consideração da potência limite da barra 10480 como um ponto de máximo carregamento possível tem impactos significativos nos cálculos realizados.

A Figura 4.11 mostra o comportamento para margem operacional das barras em 69kV em queda ao longo dos anos e registra menores valores em comparação ao nível de tensão de 138kV.

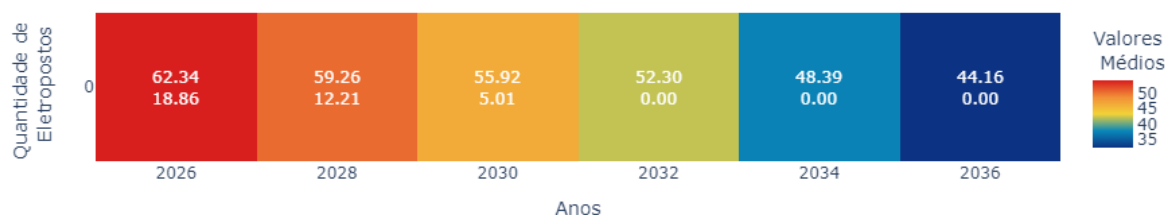


Figura 4.11: Evolução da margem de estabilidade de tensão operacional para 69kV através dos anos.

Fonte: Autor.

Em 2026 os valores da margem estão entre 62,34% e 18,86%. Em 2030 tem-se margens entre 55,92% e 5,01%, indicando barras do sistema no intervalo de segurança. A partir de 2032 há barras com margem nula, simbolizando um colapso de tensão.

4.3.2.3 Comparativo entre Valores da Margem de Estabilidade Operacional

Os dois casos apresentados nesta subseção mostra que o sistema, quando analisado barra a barra, estará submetido a diferentes valores da margem de estabilidade. A comparação ano a ano mostra a degradação dessa grandeza.

Tabela 4.5: Margem de estabilidade de tensão operacional percentual por ano e PMC.

| Ano | 138kV (%) | | 69kV (%) | |
|------|-----------|--------|----------|--------|
| | Máxima | Mínima | Máxima | Mínima |
| 2026 | 62,34 | 34,64 | 62,34 | 18,86 |
| 2028 | 59,26 | 29,29 | 59,26 | 12,21 |
| 2030 | 55,92 | 23,49 | 55,92 | 5,01 |
| 2032 | 52,30 | 17,21 | 52,30 | 0 |
| 2034 | 48,39 | 10,42 | 48,39 | 0 |
| 2036 | 44,16 | 3,08 | 44,16 | 0 |

Na Tabela 4.5 vê-se que o ano de 2026 não apresenta problemas em nenhum dos dois casos, com valores da margem entre 62,34% e 34,64% para o subsistema de 138kV e 18,86% para o subsistema de 69kV. Em 2028 as margens obtidas ainda estão longe de valores alarmantes entre 59,26%, 29,29% para 138kV e 12,21%. Em 2030 o subsistema de 69kV entra no intervalo de segurança da margem de estabilidade, com 5,01% como limite inferior da margem, enquanto ainda tem-se 23,49% como limite inferior em 138kV. A partir de 2030, o subsistema de 69 kV entrará em colapso de tensão.

Os valores máximos de margem coincidem, isso porque nos dois grupos de tensão há barras com potência limite de 4.362,47MW. Os valores mínimos são provenientes da potência limite das barras 10540 e 10480, em 138kV e 69kV, respectivamente.

Na ocorrência de um colapso de tensão os problemas seriam observados primeiramente na região de Manacapuru, visto que a barra 10480 tem a menor potência limite e fornece a energia elétrica para a região.

O encolhimento da margem com o passar dos anos ocorre pelo aumento da potência inicial P_0 , de acordo a Equação ???. Isso decorre do crescimento do consumo de potência da rede elétrica pela carga. A queda dos valores caso a caso, por outro lado, acontece pela variação do parâmetro $P_{\text{máx}}$, modificado para avaliar o comportamento dos subsistemas da rede perante o aumento de consumo de energia elétrica.

4.4 Avaliação Probabilística da Margem de Estabilidade de Tensão

A análise probabilística dos valores da margem de estabilidade visa determinar a margem do sistema após a inserção de eletropostos na rede. A natureza variável da potência consumida, apresentada na Subseção 4.2.2, junto da variação da quantidade de eletropostos conectados permite que a margem assuma uma gama variada de valores.

A Figura 3.4 mostra o passo a passo realizado para obtenção dos dados analisados nesta seção.

4.4.1 Margem de Estabilidade Probabilística

Para este caso considera-se $P_{\text{PMC}} = 4.362,47\text{MW}$, o máximo valor de potência antes de um colapso de tensão. Assim como na Subseção 4.3.1, o objetivo é avaliar a capacidade de recebimento de carga da rede sem a garantia da condição de operação segura. A Figura 4.12 apresenta o comportamento da rede com o passar dos anos e o aumento do números de eletropostos conectados.

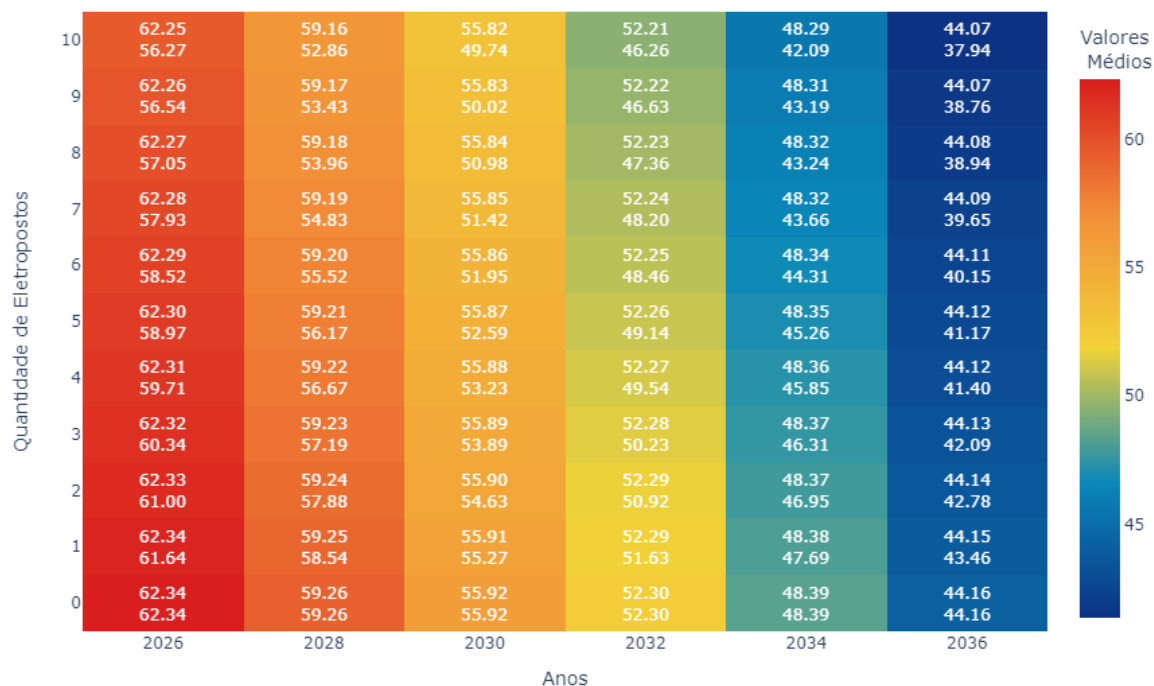


Figura 4.12: Evolução da margem de estabilidade de tensão probabilística com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

A tendência de queda mantém-se neste caso. Considerando os valores da margem com pelo menos um posto incluído tem-se, em 2026, os maiores valores da margem, indo de 62,34% a 56,27%. Os valores continuam a cair até 2036, cuja margem máxima é de 44,15% e mínima é 37,94%. Este caso de análise apresenta valores da margem de estabilidade robustos e longe da margem de segurança mínima.

4.4.1.1 Margem de Estabilidade Probabilística para 138 kV

Agora o sistema é submetido ao ponto de máximo carregamento da barra mais fraca pertencente ao nível de tensão de 138kV. A referência de potência é retirada da barra de código 10540, $P_{PMC} = 2.513,49\text{MW}$.

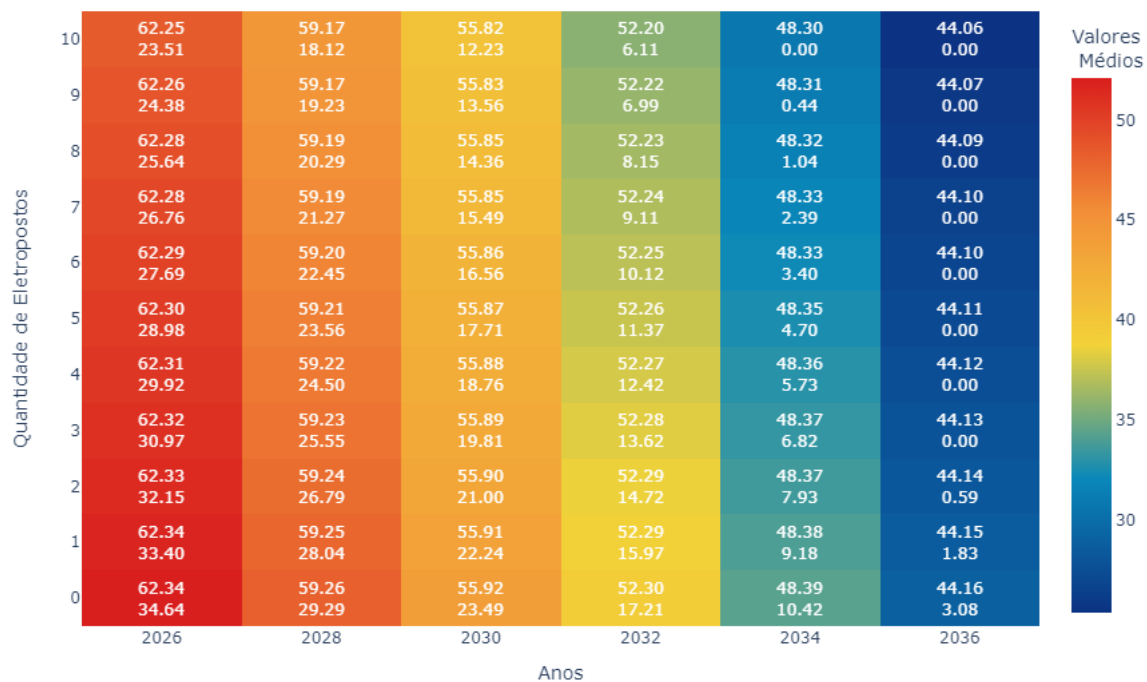


Figura 4.13: Evolução da margem de estabilidade de tensão probabilística para nível de tensão de 138kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

Através da avaliação da Figura 4.15, considerando a inclusão de ao menos um posto, nota-se que os valores da margem da rede diminuem. Em 2026 os valores da margem vão de 62,34% a 23,51%. Em 2034 o sistema entra na margem de segurança mínima quando três postos são incluídos em cada uma das barras de carga, atingindo 6,82%. Ainda neste ano as margens continuam a cair até que ocorre o colapso para dez eletropostos por barra. O ano de 2036 registra margens em um intervalo de 44,15% a zero, o que denota novamente um colapso de tensão em uma barra do subsistema.

Este caso de análise apresenta valores da margem de estabilidade robustos e longe da margem de segurança mínima para algumas das barras, enquanto no mesmo subsistema existem barras a beira, ou efetivamente em colapso de tensão.

4.4.1.2 Margem de Estabilidade Probabilística para 69kV

A rede é submetida ao ponto de máximo carregamento da barra mais fraca pertencente ao nível de tensão de 69kV. A referência de potência é retirada da barra número 10480, $P_{PMC} = 2.024, 48\text{MW}$.

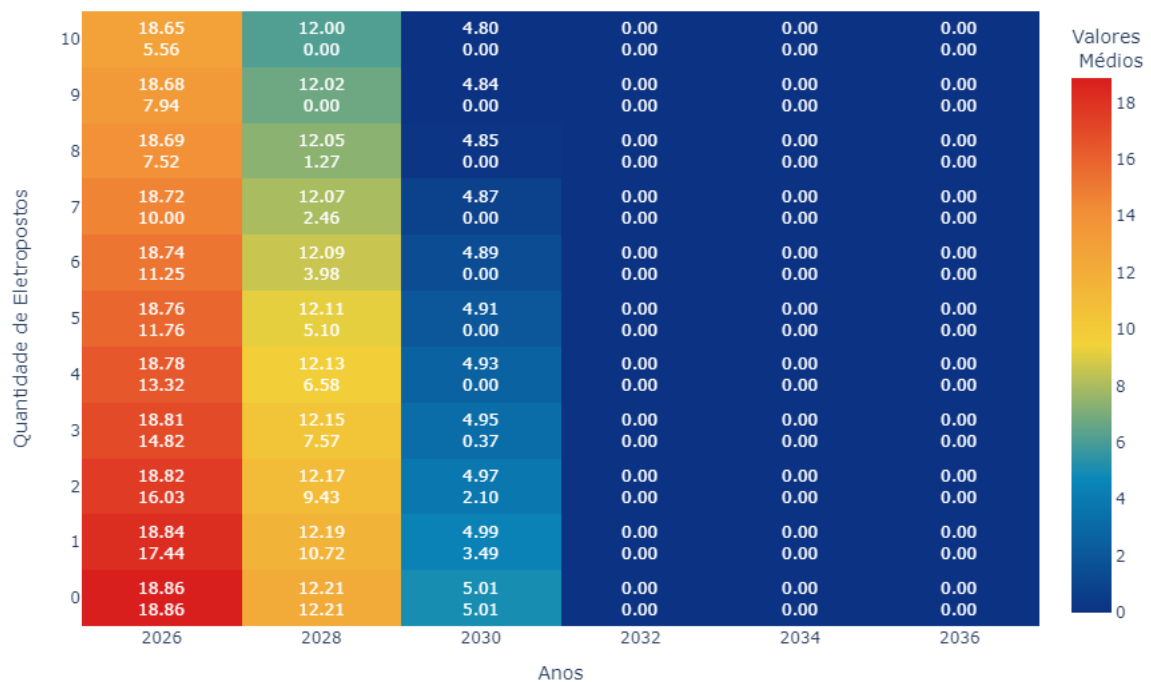


Figura 4.14: Evolução da margem de estabilidade de tensão probabilística para nível de tensão de 69kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

Observando a Figura 4.14, nota-se que as margens continuam reduzindo com o aumento de eletropostos conectados. Em 2026 os valores da margem vão de de 18,84% a 5,56%. Em 2028 o sistema já poderia sair do intervalo de segurança, a partir de seis eletropostos alocados, com 3,98% da margem. Em 2030 o sistema estaria à beira da instabilidade, a partir de três postos de recarga alocados, com um valor máximo de 4,93% e mínimo de zero. Com a alocação de quatro eletropostos, o colapso do sistema seria iminente.

4.4.2 Margem de Estabilidade de Tensão Probabilística Operacional

Nos casos a seguir a grandeza alvo é, mais uma vez, determinada a partir do agrupamento de barras em um mesmo nível. O ponto de máximo carregamento passa a ser o valor de potência que garante a condição de operação segura para a barra selecionada, como ilustra a Figura 3.4.

4.4.2.1 Margem de Estabilidade Probabilística Operacional para 138kV

A margem de estabilidade de tensão segue a tendência de diminuir com o passar dos anos, consoante a Figura 4.15.

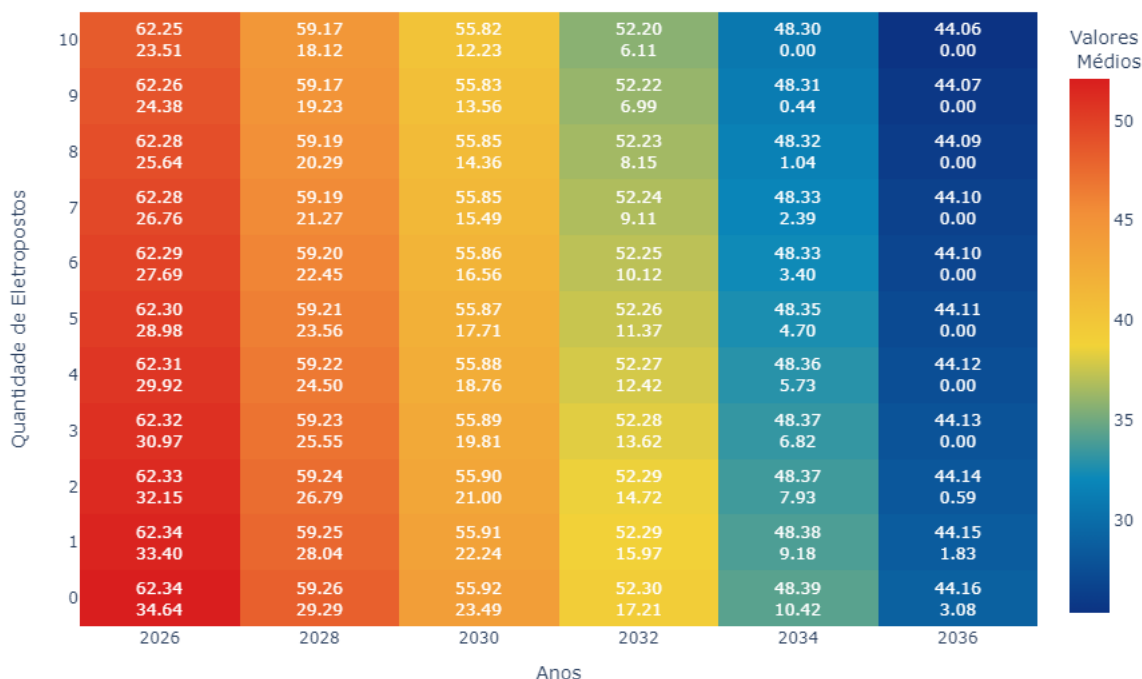


Figura 4.15: Evolução da margem de estabilidade de tensão probabilística operacional para nível de tensão de 138kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

Em 2026 os valores da margem são maiores, variando de 62,33% a 53,43%. Em 2032 o sistema entra no intervalo de segurança, com valores da margem entre 52,22% e 6,99% quando nove postos de carregamento são conectados em cada uma das barras. Em 2034 vê-se a tendência de redução dos valores da margem e para dez eletropostos conectados à rede, ocorre um colapso de tensão. Em 2036 os valores da margem vão de 44,15% a zero. O colapso de tensão acontece quando três eletropostos são inseridos em cada uma das barras.

4.4.2.2 Margem de Estabilidade Probabilística Operacional para 69kV

A Figura 4.11 apresenta o comportamento do subsistema de 69kV.

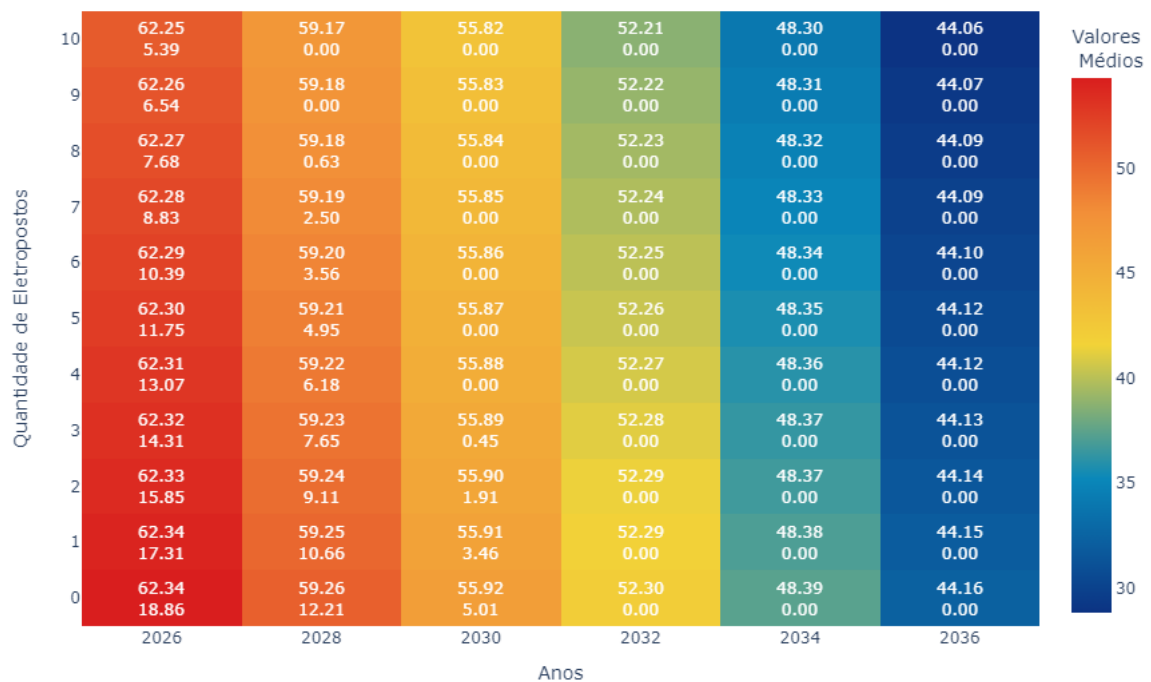


Figura 4.16: Evolução da margem de estabilidade de tensão probabilística operacional para nível de tensão de 69kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

Com a inserção de eletropostos na rede, os valores da margem ficam entre 18,84% e 5,56% em 2026. A margem pode sair do intervalo de segurança em 2030, com dois postos de recarga conectados. Ainda neste ano, a depender dos valores que os pontos conectados assumirem o sistema entra em colapso, quando quatro destes são conectados. Em 2032 o sistema é completamente inábil de receber postos de carregamento.

4.4.2.3 Comparativo entre Valores da Margem de Estabilidade Probabilística Operacional

Os dois casos apresentados nas duas subseções anteriores mostra que as cada uma das barras do sistema apresenta um valor para a margem de estabilidade e comparação ano a ano evidencia a redução da grandeza. A Tabela 4.6 apresenta os valores máximos e mínimos para cada ano e nível de tensão estudado.

Tabela 4.6: Margem de estabilidade de tensão probabilística operacional percentual por ano e nível de tensão.

| Ano | 138kV (%) | | 69kV (%) | |
|------|-----------|--------|----------|--------|
| | Máxima | Mínima | Máxima | Mínima |
| 2026 | 62,34 | 23,51 | 62,34 | 5,39 |
| 2028 | 59,25 | 18,12 | 59,25 | 0 |
| 2030 | 55,91 | 12,23 | 55,91 | 0 |
| 2032 | 52,29 | 6,11 | 52,30 | 0 |
| 2034 | 48,38 | 0 | 48,38 | 0 |
| 2036 | 44,15 | 0 | 44,15 | 0 |

No ano de 2026 os valores da margem de estabilidade de tensão são altos e não denotam um colapso de tensão iminente, apesar da margem mínima em 69kV já estar dentro do intervalo de segurança. O limite superior é de 62,34%, enquanto o limite inferior é 23,51% para o subsistema de 138kV e 5,39% para o subsistema de 69kV. Em 2028 as margens obtidas apresentam estados diferentes para cada um dos subsistemas. Em 138kV tem-se valores altos entre 59,25% e 18,12%, enquanto em 69kV o limite inferior é de zero, o que indica a possibilidade de um colapso de tensão nesse ano. Os anos de 2030 e 2032 mimetizam o comportamento de 2028, com o subsistema de 138kV com margens positivas e a possibilidade de colapso em 69kV. Os anos de 2034 e 2036 têm margem máxima de 48,28% e 44,15%, respectivamente, a margem mínima é nula, o que apresenta a possibilidade de colapso de tensão para os dois subsistemas.

Os valores máximos de margem coincidem, isso porque nos dois grupos de tensão há barras com potência limite de 4.362,47MW. Os valores mínimos são provenientes de cálculos realizados com a potência limite das barras 10540 e 10480, em 138kV e 69kV, respectivamente.

A partir de 2028 existe a possibilidade de um colapso de tensão no subsistema de 69kV. Os problemas seriam observados primeiramente na região de Manacapuru, visto que a barra 10480 tem a menor potência limite e fornece a energia elétrica para a região. Para 2034 e 2036, a mesma região seria a primeira a sofrer danos visto que entre as barras de carga, a de menor potência limite entre os subsistemas está em Manacapuru.

4.4.3 Capacidade de Hospedagem de Eletropostos

A capacidade de hospedagem do sistema baseia-se na quantidade de eletropostos possíveis de serem alocados no intervalo de potência disponível a partir do ponto de operação até o ponto de máximo carregamento considerado, como mostra a Figura ??

4.4.3.1 Capacidade de Hospedagem Convencional

Para este caso considera-se $P_{PMC} = 4.362,47\text{MW}$, o máximo valor de potência que o sistema suporta antes de um colapso. Exatamente como na Subseção 4.3.1, avalia-se a capacidade do sistema de receber carga, sem a garantia da condição de operação segura.

Na Figura 4.17 demonstra a quantidade de eletropostos que podem ser incluídos a cada ano e pela quantidade de barras consideradas.

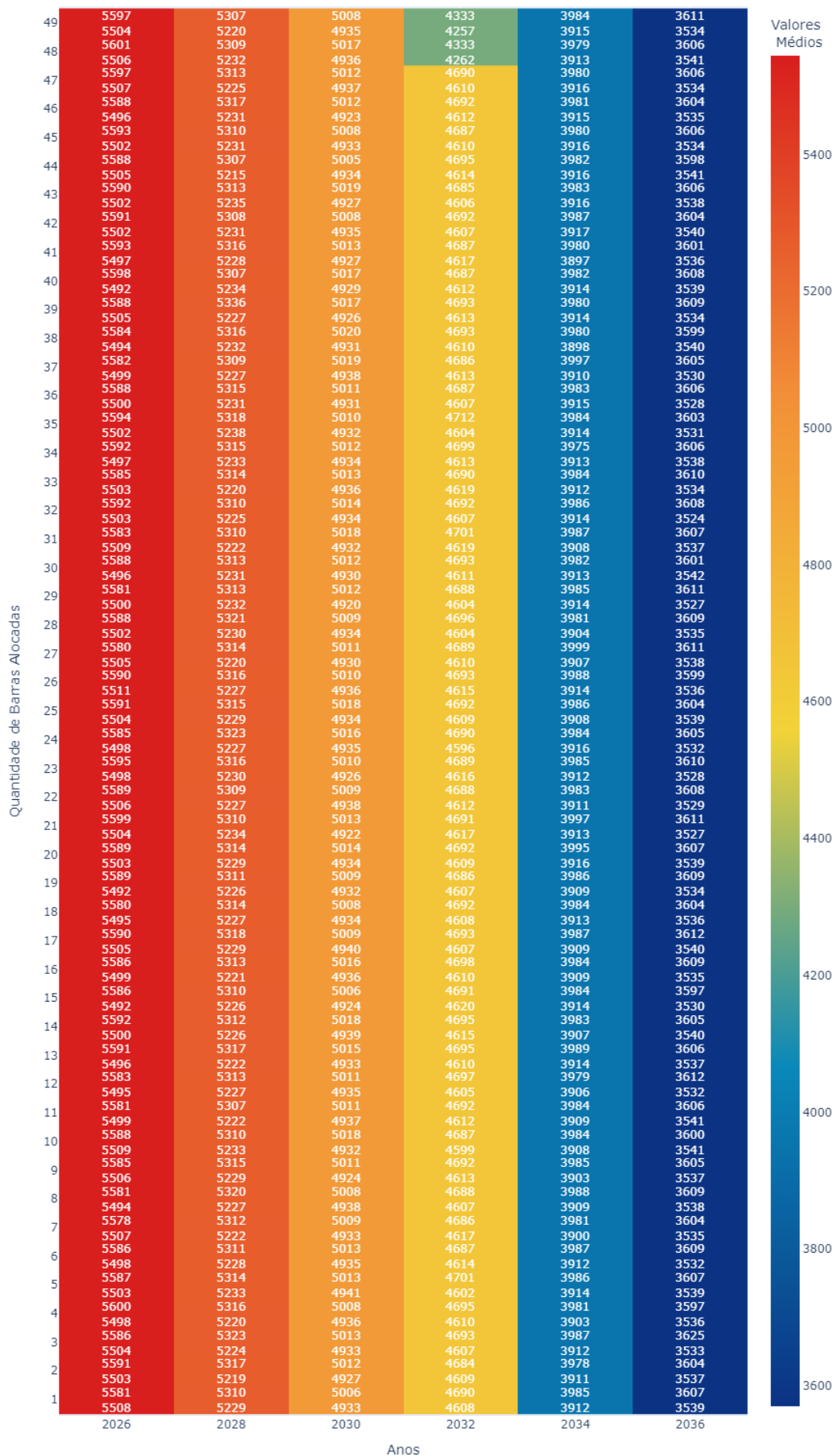


Figura 4.17: Evolução da capacidade de hospedagem convencional com o número de barras alocadas através dos anos.

Fonte: Autor.

Observa-se que, quando analisado de maneira isolada, o número de barras alocadas tem pouca influência na capacidade de hospedagem, uma vez que os valores máximos e mínimos para cada caso são muito próximos uns dos outros. Por outro lado, é notável a diminuição da capacidade ao longo dos anos, mas apesar dessa tendência, é importante ressaltar que os valores alcançados ainda são consideráveis em quantidade.

4.4.3.2 Capacidade de Hospedagem para Condição de Operação Segura

A grandeza em questão é calculada para cada uma das barras consideradas no estudo. O ponto de máximo carregamento passa a ser o valor de potência que garante a condição de operação segura para a barra selecionada, como ilustra a Figura ??.

Na Figura 4.18 vê-se a quantidade de postos de carregamento que a rede suporta com o passar dos anos e o aumento de barras alocadas.

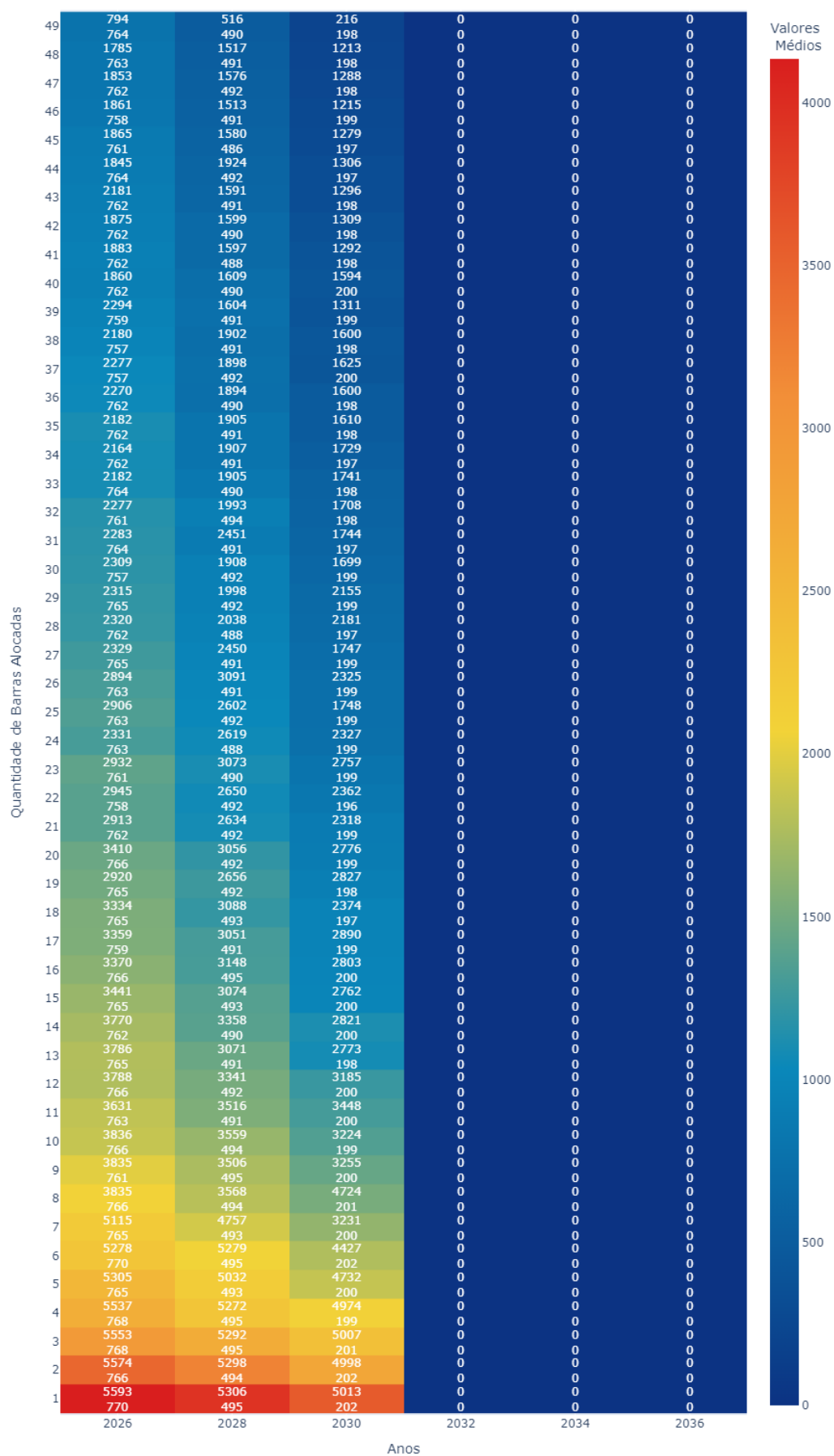


Figura 4.18: Evolução da capacidade de hospedagem para condição de operação segura com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

É no ano de 2026 que a quantidade de eletropostos que o sistema pode receber é maior, entre 5593, para uma barra selecionada, e 764, para 49 barras. Em 2028, a quantidade de eletropostos fica entre 5306 a 490. O ano de 2030 é o último em que o sistema ainda é capaz de receber postos de carregamento, indo de 5013 com um barra selecionada, até 198 com 49 delas. Em 2032 o sistema já não é capaz de receber nenhuma estação de carregamento, isso acontece pois no ano mencionado, o ponto de operação inicial já é maior que o potência limite da barra 10480, o que implica na inoperabilidade do sistema e a subsequente incapacidade de receber novas estações.

4.4.4 Considerações Finais

O crescimento anual de consumo de energia elétrica acarreta um aumento de carga a qual a rede elétrica, apresentada na Seção 4.1, é submetida. Esse aumento de consumo afeta o comportamento do sistema elétrico, à medida em que mais consumidores, residenciais, comerciais ou industriais, elevam a demanda por energia.

Aumentar a carga na rede elétrica significa aumentar a potência inicial P_0 e deslocar o ponto de operação do sistema para mais perto do ponto de máximo carregamento, causando diminuição da diferença de potência entre a o ponto de máximo carregamento e o ponto de operação. Quanto menor esta diferença, menores os valores obtidos para a margem de estabilidade, que são os níveis de segurança que garantem que a rede elétrica possa lidar com flutuações e contingências imprevistas.

A amplificação anual do consumo também impacta a potência disponível para a alocação de outros recursos, como postos de carregamento de carros elétricos, alvo desta pesquisa. Portanto, o crescimento do consumo de energia elétrica não apenas afeta a estabilidade do sistema elétrico, mas também influencia a capacidade de expandir e acomodar novas tecnologias.

Capítulo 5

Conclusões

Visando um futuro mais sustentável e com menor grau de poluição, os veículos elétricos emergem como uma alternativa eficaz para promover a mobilidade urbana e reduzir a dependência de combustíveis convencionais. Por operarem com baterias como fonte de energia elétrica, a recarga desses veículos é mandatória, sendo mais convenientemente realizada através da conexão à rede. Para viabilizar esse processo, é imperativo que o sistema elétrico esteja capacitado para fornecer a energia necessária ao recarregamento das baterias.

O trabalho em questão proporcionou uma análise da resposta da rede elétrica de Manaus e suas adjacências diante do aumento da demanda e da integração de postos de recarga para veículos elétricos, avaliando também a capacidade de hospedagem desses pontos.

A análise dos dados obtidos de potência e tensão, obtidos através da simulação do fluxo de carga continuado no *software* ANAREDE, revela como a margem de estabilidade de tensão é afetada negativamente pelo incremento de carga e a conexão dos postos de carregamento. Essa tendência é observável em todos os cenários propostos. Além destes, o que se demonstra como elemento mais impactante na margem de estabilidade é o ponto de máximo carregamento considerado. Quanto menor for esse valor de potência, menores serão as margens, como esperado. É vital para a saúde do sistema considerar pontos que atendam necessidade específicas, como os casos de garantia de operação segura.

A capacidade de hospedagem é significativamente impactada pelo aumento de demanda, mas é pouco influenciada pelo número de barras de carga consideradas na alocação. Isso ocorre pois o algoritmo desenvolvido para essa inspeção seleciona barras aleatórias e

realiza os incrementos de carga. Entretanto, quando a barra 10480 é selecionada, não é possível realizar nenhum incremento, visto que sua potência limite para operacionabilidade é menor que a potência do sistema prevista para o ano de 2032.

O cenário determinante para a designar a situação futura do sistema encontra-se na subseção 4.3.3, neste é possível avaliar o sistema quando submetido a um ponto de máximo carregamento que garante a entrega de uma tensão disponível mínima de 0,95pu. Se essa condição deseja ser mantida o sistema encontraria problemas com a inserção de eletropostos logo em 2030, com margens máximas variando entre 4,99% e 4,80% e margens mínimas indo de 3,49% a zero.

Conclui-se que para incentivar e promover a comercialização e produção de carros elétricos, é imperativo fortalecer a infraestrutura da rede elétrica de transmissão, a fim de atender as demandas identificadas em sua completude.

5.1 Trabalhos Futuros

O entendimento da saúde da rede e as condições de recebimento de eletropostos para carregamento de veículos elétricos pode ser aprimorada a partir de futuros trabalhos complementares a este. Há dois estudos possíveis: avaliação do carregamento dos condutores de linhas de transmissão com base nas premissas da Margem de Estabilidade de Tensão (MET) e da MET Operacional, e o desenvolvimento de estratégias para a alocação de postos de recarga com diferentes valores de potência, visando atender o valor $P_{PMC} - P_o$, com uma análise de sensibilidade específica para cada barra.

No que diz respeito à avaliação do carregamento dos condutores, é interessante explorar implicações das premissas da MET e MET Operacional. Isso envolve a consideração de diferentes cenários de operação, variações na demanda e a influência de fatores externos na estabilidade da tensão. Aprofundar essa análise contribuirá para um entendimento mais abrangente das condições de operação da rede elétrica, permitindo a identificação de pontos críticos e a implementação de medidas preventivas eficazes.

No que se refere ao desenvolvimento de estratégias para alocar postos de recarga com diferentes valores de potência, é necessário criar abordagens que atendam de maneira eficiente à relação $P_{PMC} - P_o$. Isso implica não apenas em distribuir postos de recarga de forma estratégica, mas também em considerar a variação de potência em cada barra

específica. Uma análise de sensibilidade detalhada para cada barra permitirá ajustes precisos na alocação dos postos, levando em conta as características específicas de cada ponto da rede elétrica.

Dessa forma, a exploração desses tópicos em futuros trabalhos aprimorará não apenas a capacidade de prever e gerenciar as condições de operação das linhas de transmissão de 138kV e 69kV, mas também desenvolver estratégias mais refinadas para a expansão e otimização da infraestrutura de recarga, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência do sistema de mobilidade elétrica.