

Capítulo 4

Análise de Resultados

O Capítulo 3 detalhou as ferramentas e os processos realizados na produção dos resultados. A determinação da margem de estabilidade e da 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 periódico de carga e proveniente dos postos de carregamento.

Neste capítulo, é feita a análise do sistema elétrico analisado, abordando seus limites geográficos, características físicas e elétricas, além de explorar os cenários de estudo. Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada anteriormente são minuciosamente examinados e discutidos.

4.1 Rede Elétrica

A rede elétrica avaliada neste trabalho abastece a região metropolitana de Manaus, constituída pela capital e os municípios de Presidente Figueiredo, Iranduba e Manacapuru, como apresenta a Figura 4.1. O sistema é composto por níveis 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, responsável pela equivalência do Sistema Interligado Nacional (SIN) como um todo.

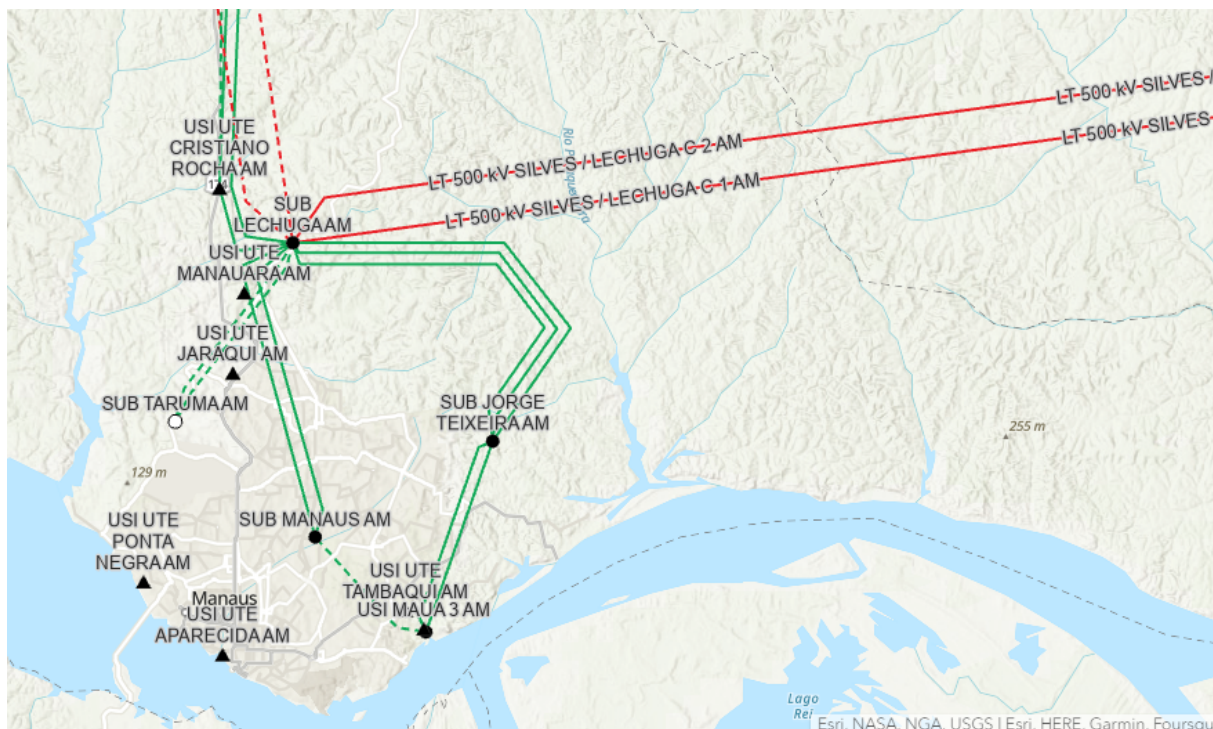


Figura 4.1: Mapa da região metropolitana de Manaus.

Fonte: SIN Maps, 2023.

A Figura 4.2 mostra os subsistemas de 500kV e 230kV. A conexão de entre a barra de referência e a subestação Lexuga é feita a dois circuitos de 500kV com comprimento de 244km para que a tensão seja entregue e então reduzida a 230kV através de quatro reguladores de tensão com capacidade de 600MVA e reatância de 1,16% e para 138kV, por um de reguladores de tensão de 150MVA e reatância de 8,99%.

Na mesma subestação existe as conexões à Usina Hidrelétrica (UHE) de Balbina, feita a um circuito de 160km, cuja geração é conectada à rede por cinco transformadores elevadores de tensão de 62MVA cada e reatância de 20,75%, e à Usina Termoeletrica (UTE) Cristiano Rocha, feita a um circuito de 5km, cuja geração é inserida na rede através de dois transformadores elevadores de tensão de 75MVA cada. Estão, então, conectam-se à barra do município de Presidente Figueiredo.

A partir de Lexuga a transmissão em 138kV é direcionada para as subestações Jaraqui 2, Amazonas e Rio Preto. A energia transmitida em 230kV é direcionada para as principais subestações da cidade, entre elas Jorge Teixeira e Manaus que se conectam à subestação Mauá III, formando um anel.

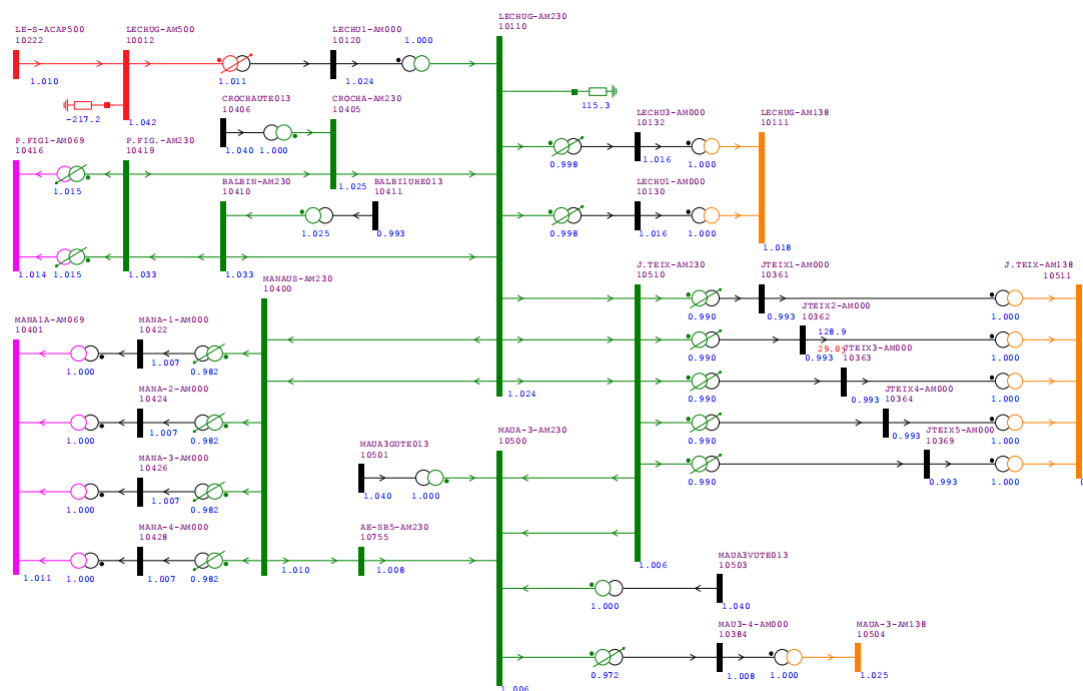


Figura 4.2: Subsistemas de 500kV e 230kV.

Fonte: Autor.

A subestação Jorge Teixeira conecta-se a Lexuga por três circuitos de 30km e, através de um conjunto de cinco reguladores de tensão com capacidade de 150MVA e reatância de 6,83%, abastece em 138kV barras nos bairros Distrito Industrial, Parque 10, Centro, Compensa e o município de Iranduba.

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 reguladores de tensão de 150MVA de capacidade e reatância de 7,45%.

A subestação Manaus está conectada a Lexuga por dois circuitos de 20km. Um conjunto de quatro reguladores de tensão de 150MVA e reatância de 12,01% é responsável pela redução da tensão e o abastecimento de parte do subsistema de 69kV.

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



Figura 4.5: Subsistema 69kV - Zonas norte, central e leste.

Fonte: Autor.

As UTEs Jaraqui, Tambaqui e Manaus entregam a potência gerada à rede através do subsistema de 69kV. A UTE Manaus conta com um transformador elevador de 70MVA e reatância de 12,15%. As UTEs Jaraqui e Tambaqui elevam a tensão através de um transformador de 70MVA e reatância de 6,47% cada.

O diagrama do sistema elétrico completo está disponibilizado na seção de anexos deste trabalho.

Com a rede devidamente apresentada, o trabalho propõe-se a avaliar a resposta das 49 barras de carga pertencentes aos níveis de tensão de 138kV e 69kV à inclusão de eletropostos, por isso, é pertinente discriminá-las acompanhadas de informações essenciais. A Tabela 4.1 apresenta tais barras.

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

4.2 Cenários de Estudo

O alicerce do estudo está no fluxo de carga continuado executado no *software* ANA-REDE. O conjunto de curvas que relacionam a potência ativa, em MW, com a tensão elétrica em pu é fundamental para enxergar o comportamento do sistema com o aumento de carga. Essas curvas estão disponíveis na Figura [4.6](#).

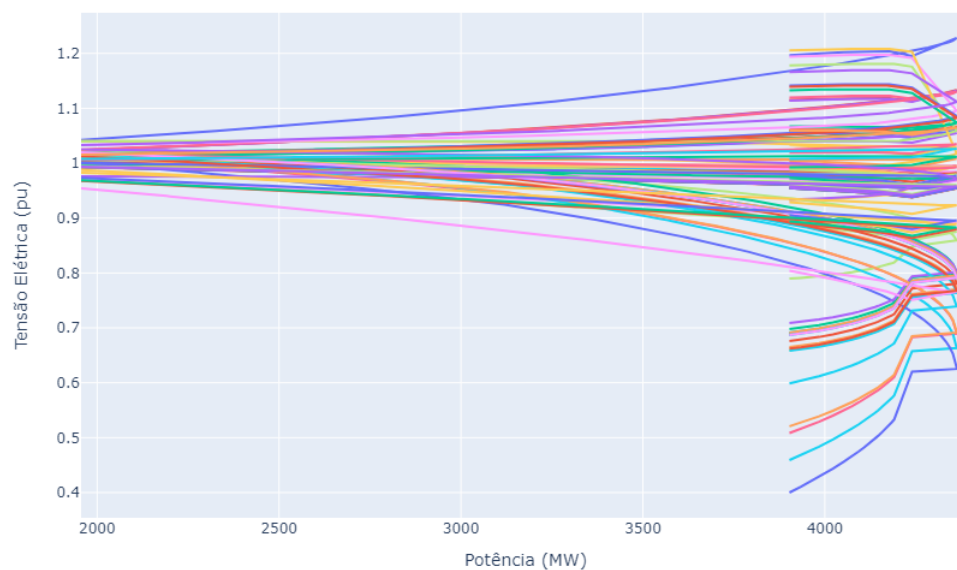


Figura 4.6: Curvas PxV das barras da rede.

Fonte: Autor.

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 incluídos na rede são produzidos pela WEG, empresa nacional, disponíveis em quatro modelos diferentes. A diferença dos 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 uma análise probabilística do efeito da conexão dos postos de recarga na margem de estabilidade e na capacidade de hospedagem, considera-se que os postos conectados terão três estações operando simultaneamente 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 3.1, tem-se:

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

Com base na Equação 4.1, há um total de 20 configurações únicas que as estações em funcionamento podem adotar. 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 na rede elétrica, permitindo, assim, analisar o efeito do aumento de carga periódico na margem de estabilidade de maneira isolada.

4.3.1 Margem de Estabilidade Convencional

Essa análise não prioriza uma condição de operação segura em relação à tensão elétrica, mas é útil para avaliar a quanto estresse a rede pode ser submetida antes de um colapso. A falta de garantia de uma operação segura decorre do aumento da potência inicial do sistema a cada ano analisado. Isso ocorre porque, em algumas das barras que compõem a rede, a potência inicial excede o valor máximo que a barra pode receber e ainda entregar 0.95 pu de tensão elétrica para as cargas conectadas.

A margem convencional é calculada considerando o ponto de máximo carregamento do sistema, $P_{PMC} = 4.362,47$ MW.

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

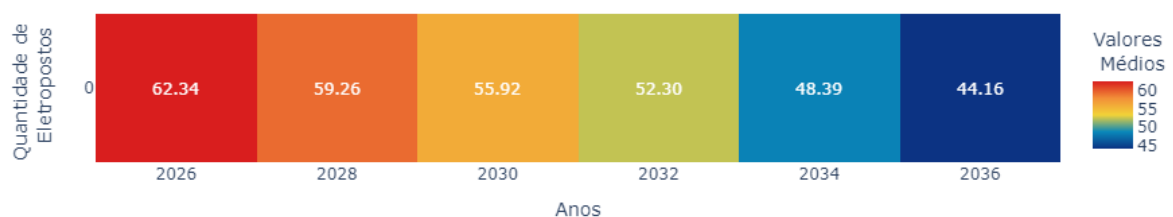


Figura 4.7: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional através dos anos.

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 de margem de estabilidade robustos e longe da margem de segurança mínima, que é de 4% a 7%.

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 10540, $P_{PMC} = 2.513,49$ MW.

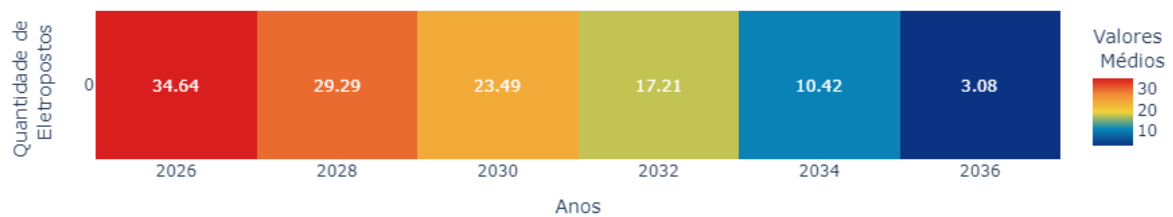


Figura 4.8: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional para 138kV através dos anos.

Fonte: Autor.

Através da avaliação da Figura 4.8, nota-se que os valores de margem da rede diminuem de 36,64%, em 2026, a 3,08%, em 2036. Este caso apresenta valores de 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.

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 10480, 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 diminuindo, atingindo 18,86% em 2026, e chegando a valores nulos a partir de 2032, indicando um colapso de tensão no sistema. Esse cenário de análise revela margens de estabilidade baixas, o que se deve ao emprego de um ponto de máximo carregamento também baixo.

4.3.1.3 Comparativo entre Valores Margem de Estabilidade

Através dos três casos apresentados nesta seção nota-se o impacto que o ponto de máximo carregamento considerado tem sobre os valores de margem de estabilidade. A comparação ano a ano a ano mostra uma queda brusca nos valores de margem de estabilidade dos casos apresentados.

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

Na Tabela 4.4 enxerga-se a diminuição dos valores de margem com o ponto de máximo carregamento. O ano de 2026 não apresenta problemas em nenhum dos três casos, com valores de 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%, e apresenta 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 de margem são 44,16%, 3,08% e nulo.

A queda nos valores de margem com o passar dos anos ocorre pelo o aumento da potência inicial P_0 , conforme a equação 3.3. Isso decore 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 avaliados, junto do aumento de consumo de energia elétrica.

Na ocorrência de um colapso de tensão, evento que poderia ocorrer sob as condições do terceiro caso, os problemas iniciariam no município de Manacapuru, visto que a barra mais fraca, usada como PMC do caso, é o ponto de abastecimento da região em 69kV.

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 3.4. 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.

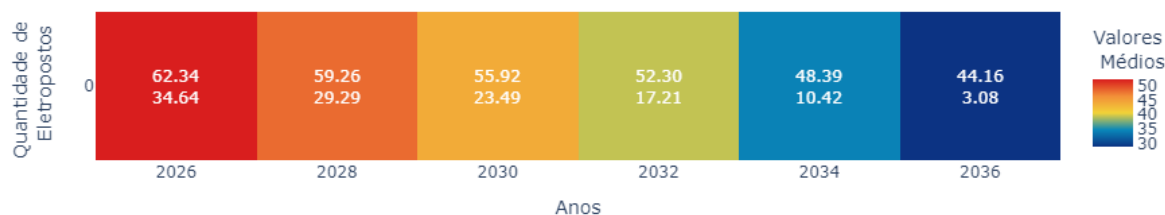


Figura 4.10: Evolução da margem de estabilidade de tensão operacional para 138kV através dos anos.

Fonte: Autor.

A margem de estabilidade de tensão segue a tendência de diminuir com o passar dos anos, como é possível enxergar na Figura 4.10. Em 2026 os valores de margem estão ente 62,34% e 34,64%. Em 2036 a margem estaria 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 primeiro valor mostrado é o menor valor de potência registrado para todas as barras em análise. A consideração desse valor como um ponto de máximo carregamento possível tem impactos significativos nos cálculos realizados.

A Figura 4.11 mostra que o comportamento para margem operacional das barras em 69kV segue em queda ao longo dos anos e registra os menores valores em comparação ao caso anterior.

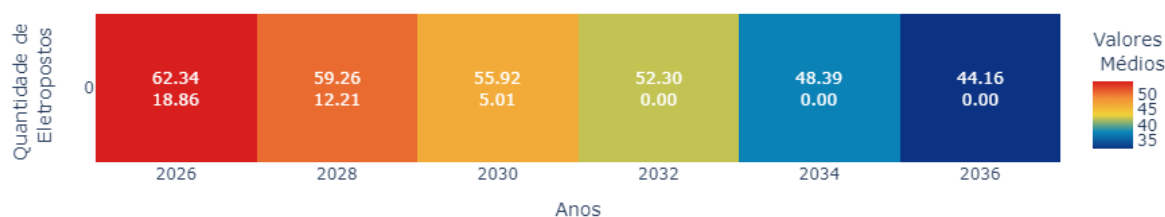


Figura 4.11: Evolução da margem de estabilidade de tensão operacional para 69kV através dos anos.

Fonte: Autor.

Sem que haja a inserção de eletropostos na rede, os valores de margem ficam entre 54,60%, em 2026, e 32,86%, em 2036.

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

4.3.2.3 Comparativo entre Valores Margem de Estabilidade Operacional

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

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 de 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 de margem, enquanto ainda tem-se 23,49% como limite inferior em 138kV. A partir deste ano o subsistema de 69kV entraria em colapso de tensão.

Os valores de margem máxima coincidem, isso porque nos dois grupos de tensão há barras cuja potência limite é de 4.362,47MW. Os valores mínimos são provenientes da potência limite das barras 10540 e 10480, as barras mais fracas em 138kV e 69kV.

Na ocorrência de um colapso de tensão os problemas seriam vistos primeiramente na região de Manacapuru, visto que a barra mais fraca o ponto de abastecimento da região

em 69kV.

A diminuição dos valores de margem com o passar dos anos ocorre pelo o aumento da potência inicial P_0 , de acordo a Equação 3.3. Isso decore 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

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

A Figura 3.5 mostra o passo a passo realizado para obtenção dos dados analisados nesta seção.

4.4.1 Margem de Estabilidade Probabilística Convencional

Para este caso considera-se $P_{\text{PMC}} = 4.362,47$ MW. A Figura 4.12 apresenta o comportamento da rede com o passar dos anos e o aumento do números de postos incluídos.

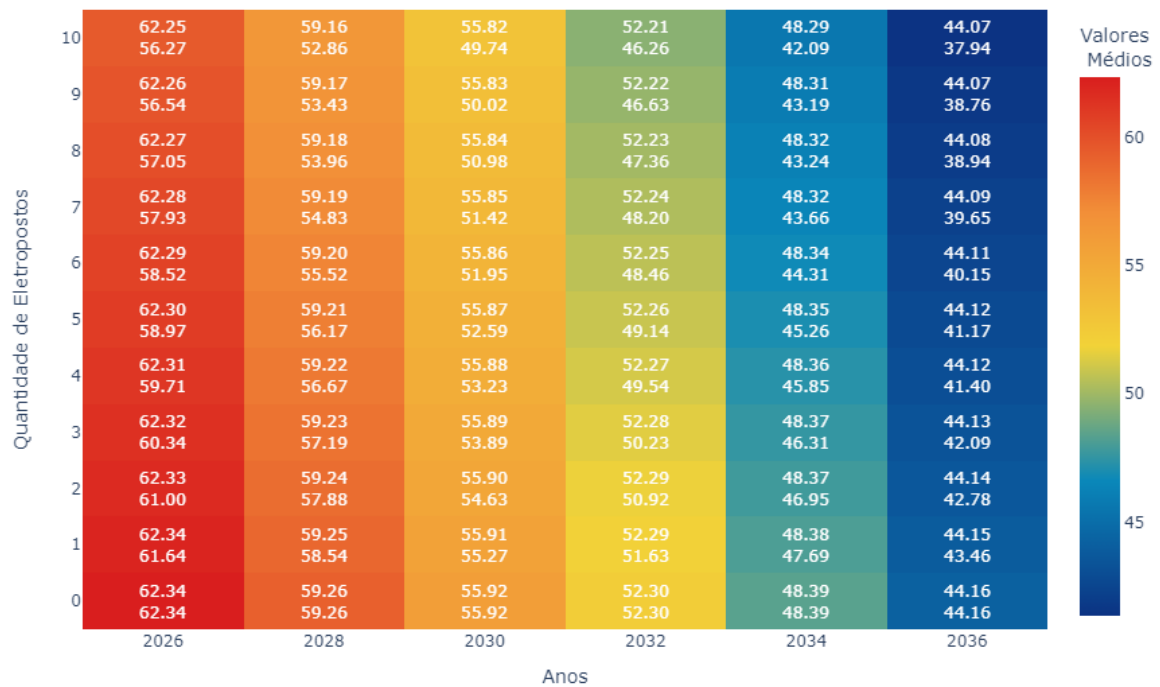


Figura 4.12: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

A tendência de queda mantém-se neste caso. Considerando os valores de margem com pelo menos um posto incluído tem-se, em 2026, os maiores valores de margem, indo de 62,34% a 37,94%. 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 de 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 número 10540, $P_{PMC_{138}} = 2.513,49$ MW.

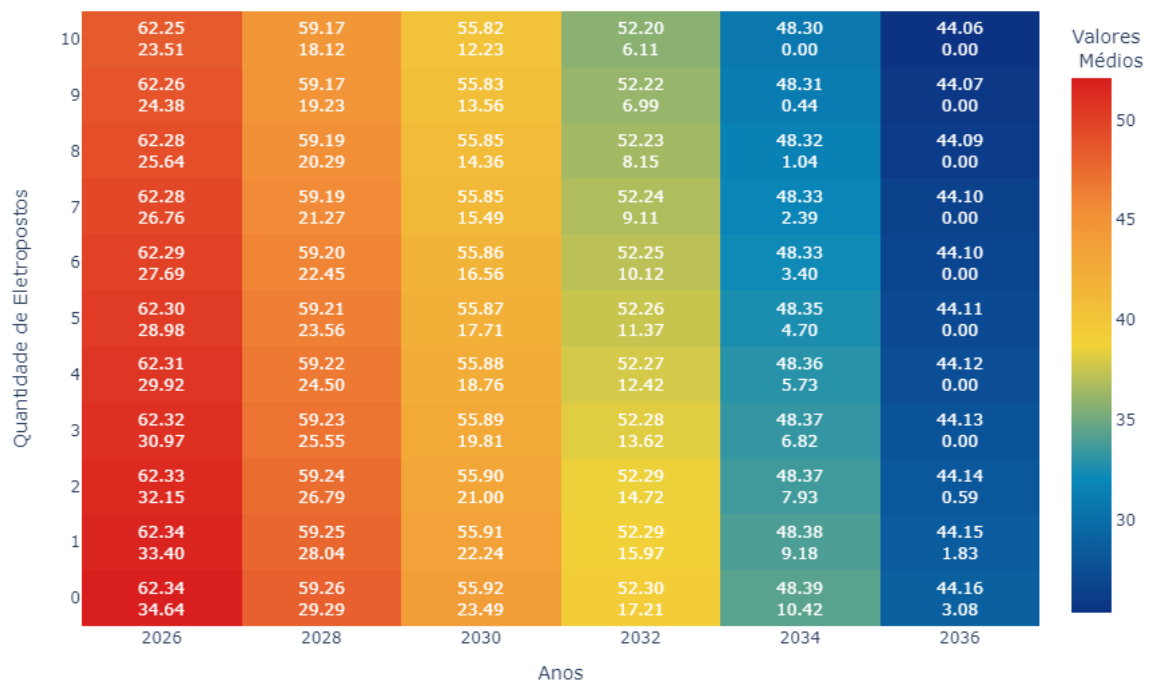


Figura 4.13: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional para nível de tensão de 138kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

Através da avaliação da Figura 4.15, considerando a inclusão de ao menos um posto, nota-se que os valores de margem da rede diminuem. Em 2026 os valores de 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% de margem. Ainda neste ano as margens continuam a cair até que ocorre o colapso para dez pontos por barra. Em 2036 registra margens em um intervalo de 44,15% a zero. Este caso de análise apresenta valores de margem de estabilidade robustos e longe da margem de segurança mínima.

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, $P_{PMC_{138}} = 2.024, 48$ MW.

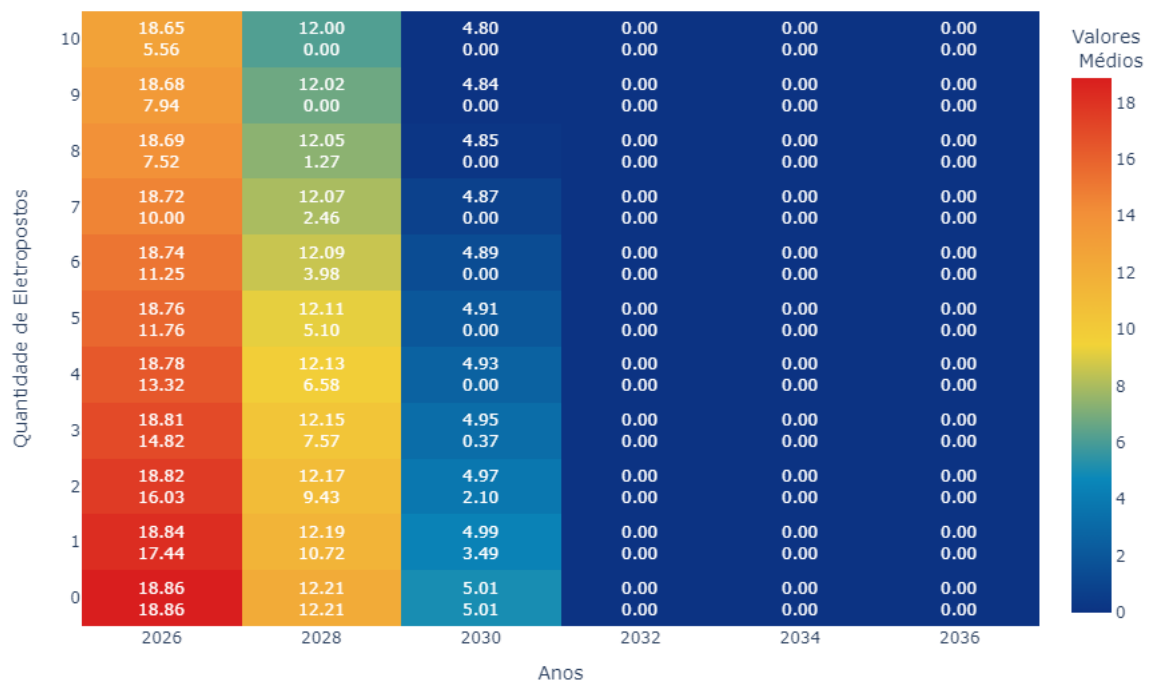


Figura 4.14: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional para nível de tensão de 69kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

Observando a Figura 4.14, nota-se que as margens continuam diminuindo com o aumento de eletropostos conectados. Em 2026 os valores de margem vão de 18,84% a 5,56%. Em 2028 o sistema já poderia sair do intervalo de segurança, a partir de seis postos alocados, com 3,98% de margem. Em 2030 o sistema estaria à beira da instabilidade, a partir de três postos 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 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 3.5.

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, como é possível enxergar na Figura 4.15. Em 2026 os valores de margem são maiores, variando de 62,33% a 53,43%. Em 2036 os valores de margem vão de 44,15% a 35,25%.

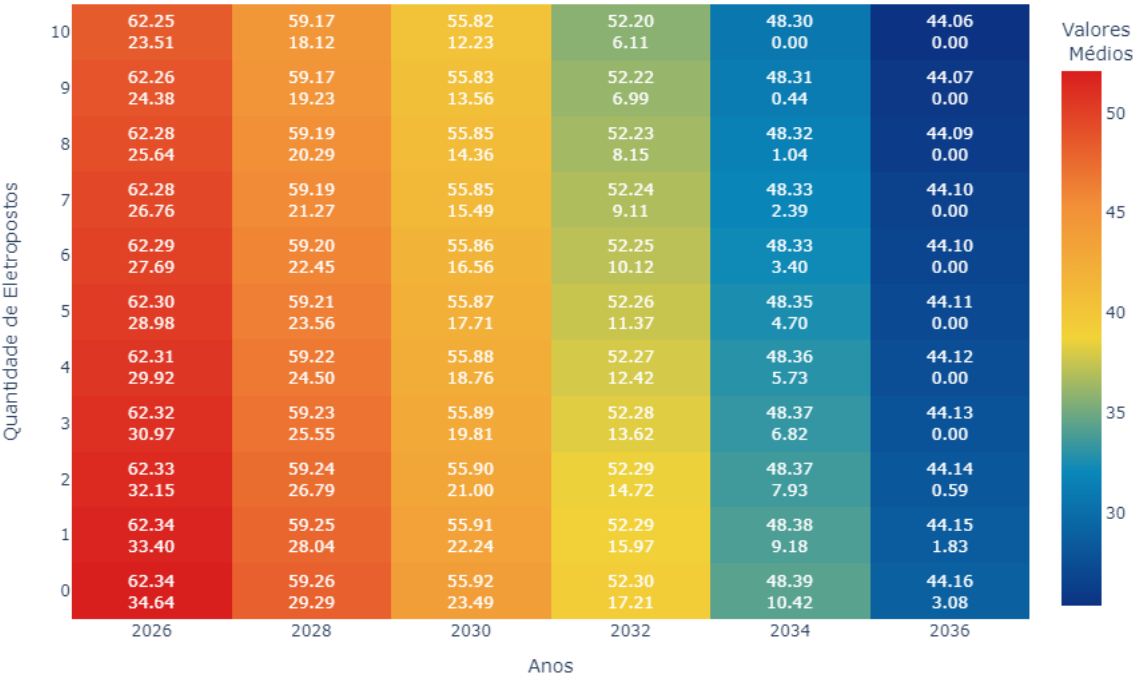


Figura 4.15: Evolução da margem de estabilidade de tensão operacional para nível de tensão de 138kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

4.4.2.2 Margem de Estabilidade Probabilística Operacional para 69kV

A Figura 4.11 mostra que o comportamento para 69kV segue como visto em casos prévios.

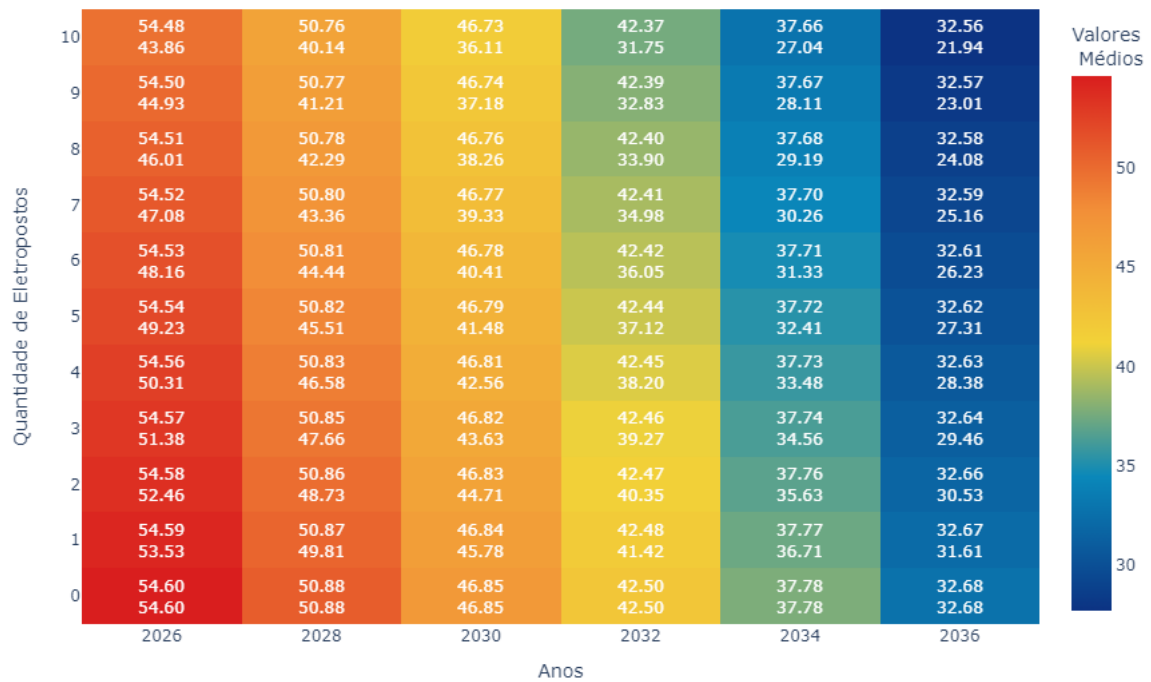


Figura 4.16: Evolução da margem de estabilidade de tensão operacional para nível de tensão de 69kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

Com a inserção de eletropostos na rede, os valores de margem ficam entre 18,84% e 5,56% em 2026. A margem pode sair do intervalo de segurança em 2030, com dois postos 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.

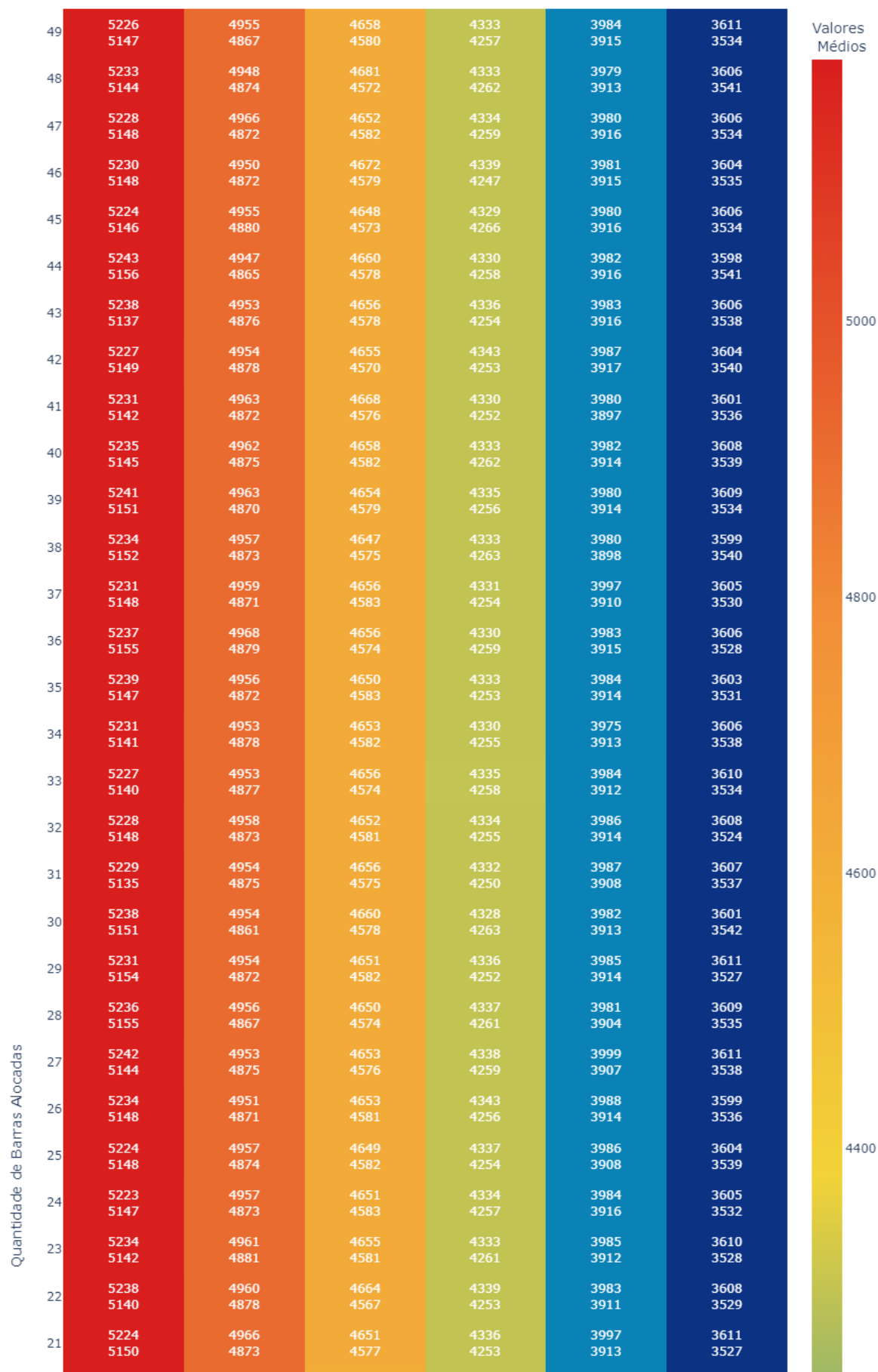
4.4.3 Capacidade de Hospedagem dos Eletropostos

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 3.6

4.4.3.1 Capacidade de Hospedagem Convencional

Para este caso tem-se $P_{PMC} = 4.362,47$ MW, dessa forma é possível determinar quantos eletropostos o sistema pode receber antes de um colapso.

Na Figura 4.17 fica evidente 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.



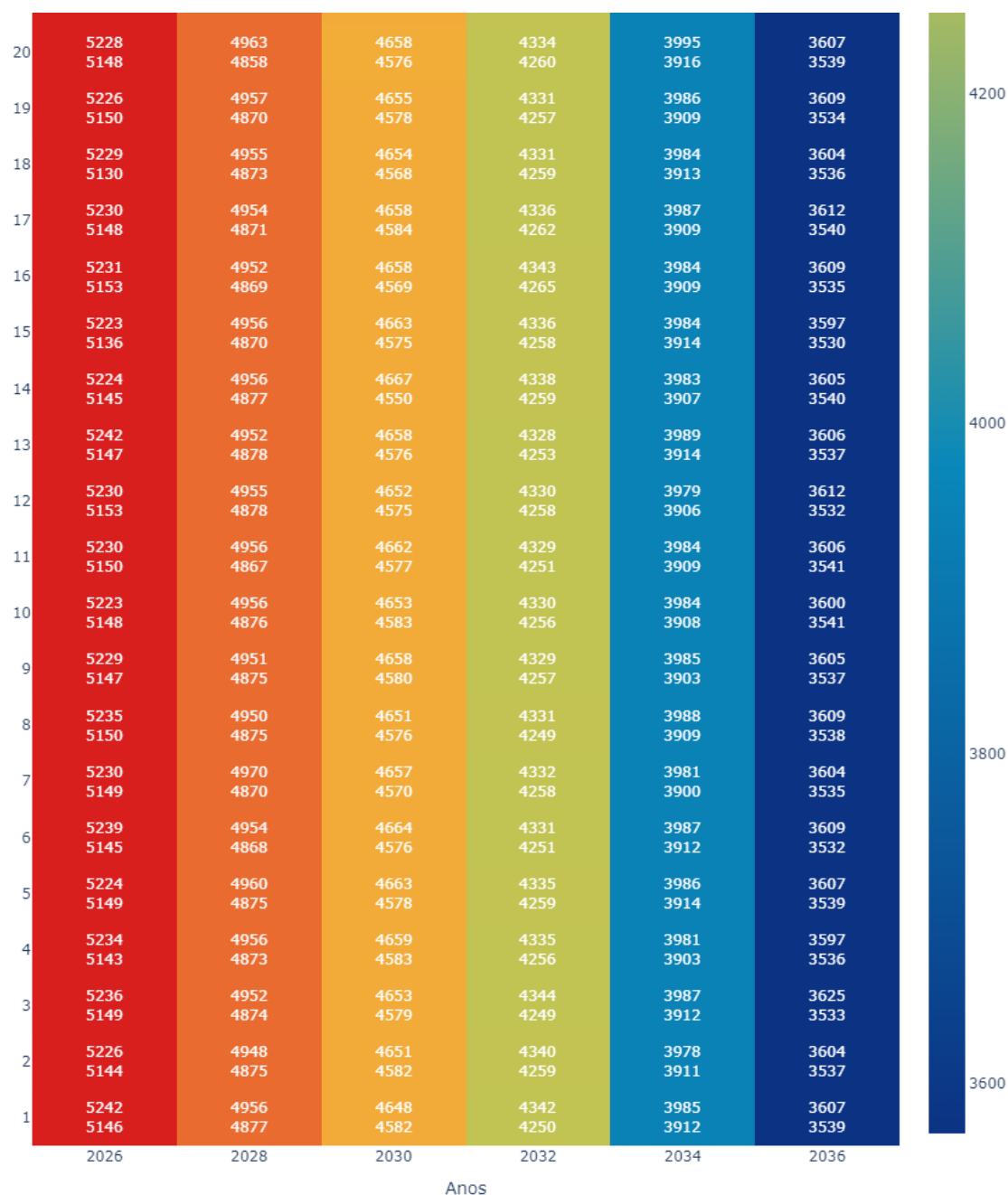


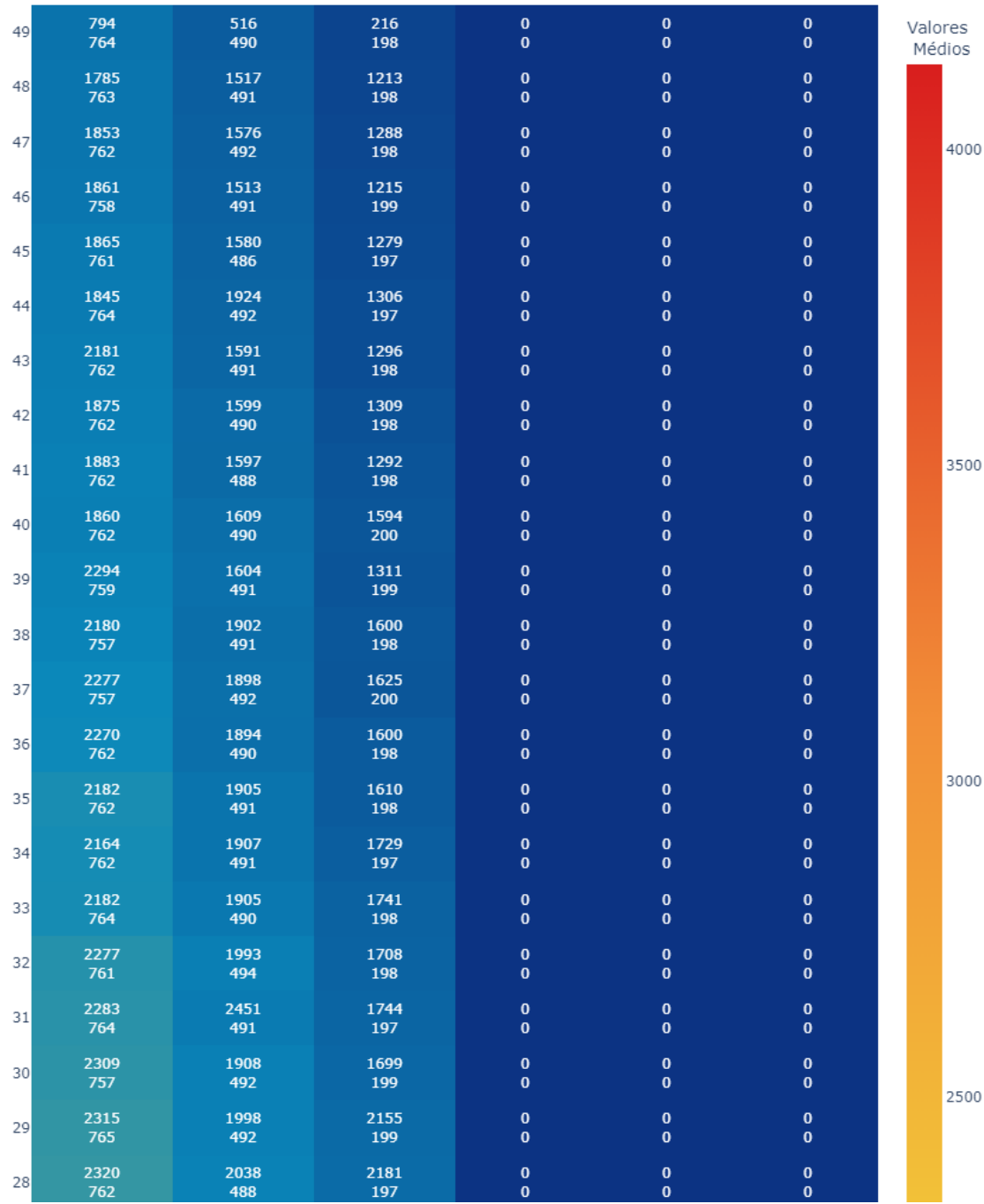
Figura 4.17: Evolução da capacidade de hospedagem convencional com o número de barras alocadas através dos anos.

Fonte: Autor.

4.4.3.2 Capacidade de Hospedagem para Condição de Operação Segura

Pela Figura 4.18 vê-se que a resposta do sistema às condições de análise é interessante e demonstra sua fragilidade. De 2026 a 2030 o sistema é capaz de receber postos, indo de 5593 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 de determinada barra do sistema, por isso a impossibilidade de receber novas estações.



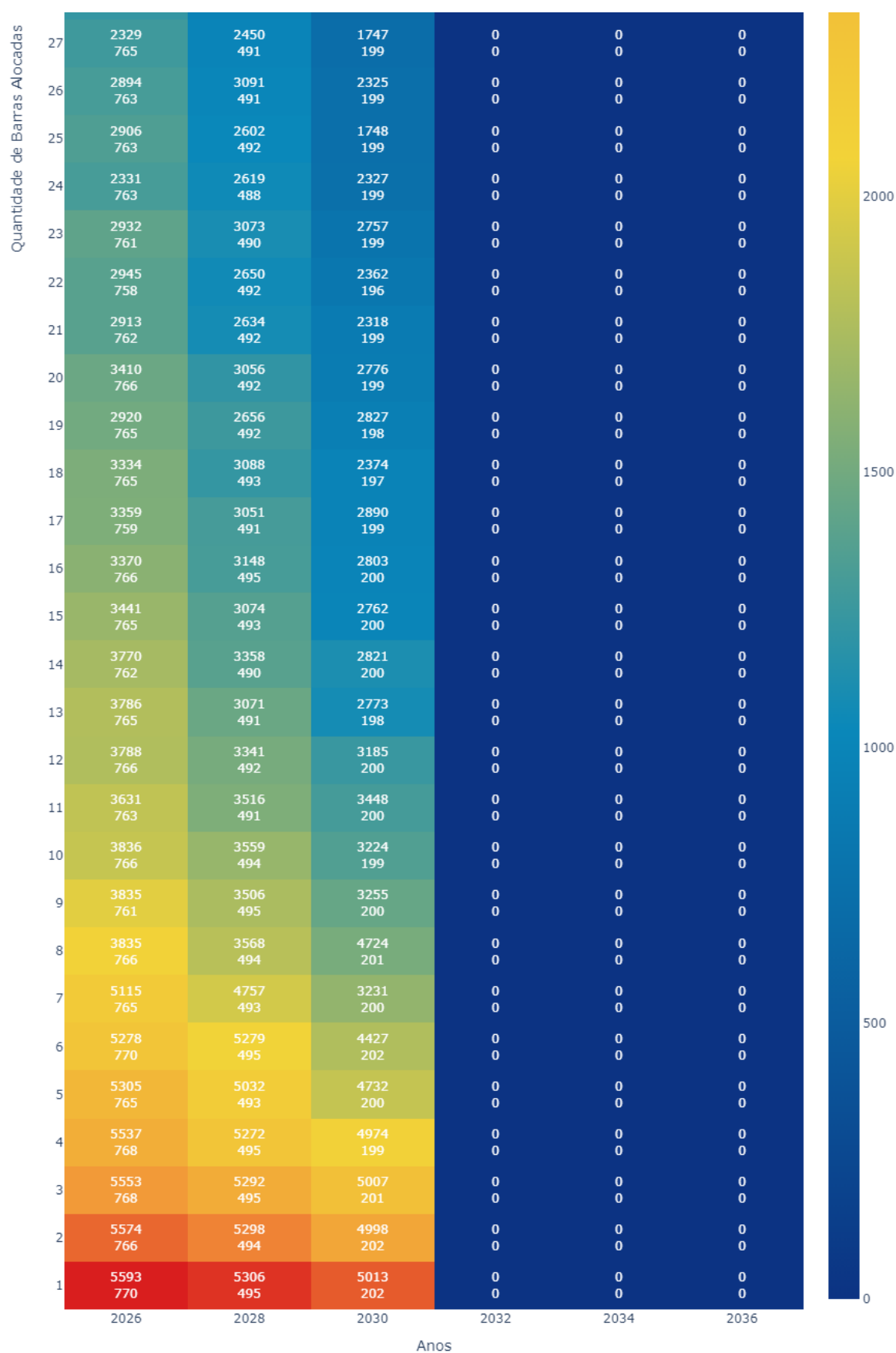


Figura 4.18: Evolução da capacidade de hospedagem para condição de operação segura com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Autor.

4.4.4 Considerações Finais

O crescimento anual de consumo de energia elétrica acarreta um aumento de carga a qual a rede elétrica de Manaus e suas adjacências imediatas 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 deslocar o ponto de operação do sistema e aproximá-lo do ponto de máximo carregamento, causando diminuição nos valores de margem de estabilidade, que são os níveis de segurança que garantem que a rede elétrica possa lidar com flutuações e contingências imprevistas.

A amplificação do consumo 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.