

Capítulo 4

Análise de Resultados

4.1 Rede Elétrica

A necessidade de garantir a continuidade de crescimento ao mercado exige o funcionamento interligado dos sistemas elétricos de potência, os quais formam redes complexas, definida pela conexão de elementos ativos e passivos capazes de gerar e transportar energia elétrica, como geradores de energia elétrica, transformadores de tensão e linhas de transmissão.

A rede foco deste trabalho compreende os municípios de Manaus, Presidente Figueiredo, Iranduba e Manacapuru e reúne níveis de tensão de 500kV, 230kV, 138kV e 69kV. A figura 4.1 mostra a barra forte do sistema, definida como exatamente anterior à subestação Lexuga, ponto de conexão de Manaus e vizinhança ao Sistema Interligado Nacional. Nessa mesma subestação a tensão é diminuída e entregue em 230kV.

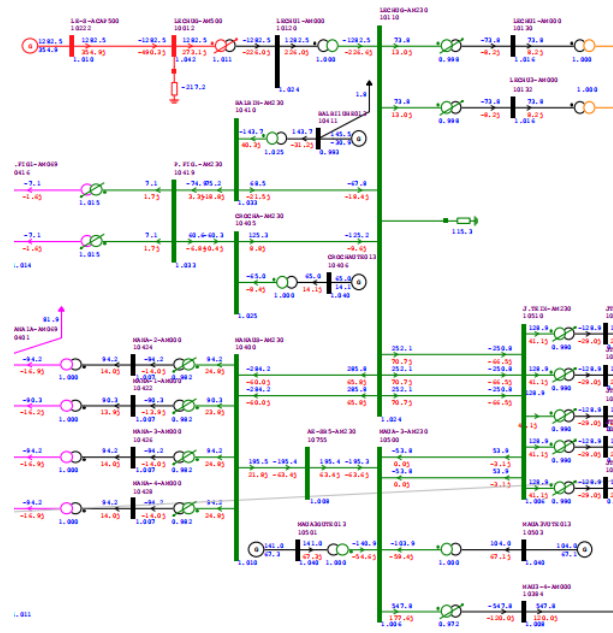


Figura 4.1: Subsistemas de 500kV e 230kV.

Fonte: Do autor.

Na Figura 4.2 o subsistema de 138kV está identificado. Este é derivado do subsistema de 138kV.

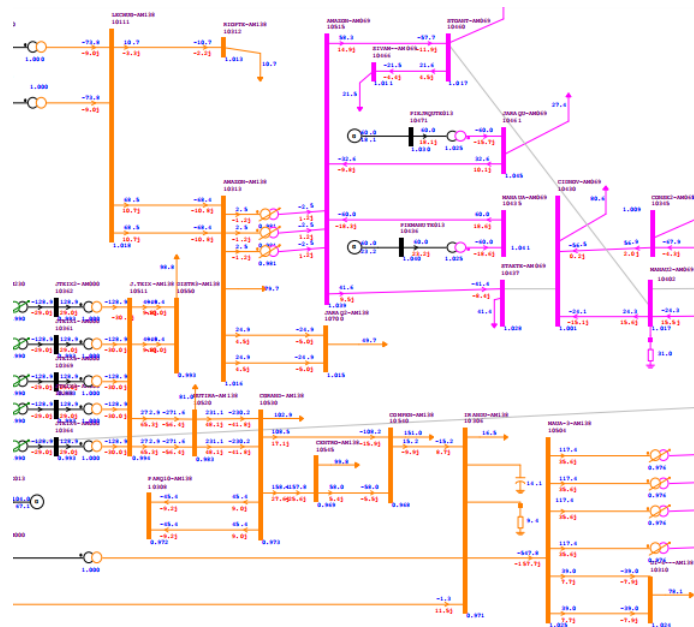


Figura 4.2: Subsistema 138kV

Fonte: Do autor.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram o nível tensão de 69kV. A primeira figura apresenta a parte do subsistema que está conectado ao subsistema de 230kV, a segunda identifica a parte do subsistema conectada em 138kV.

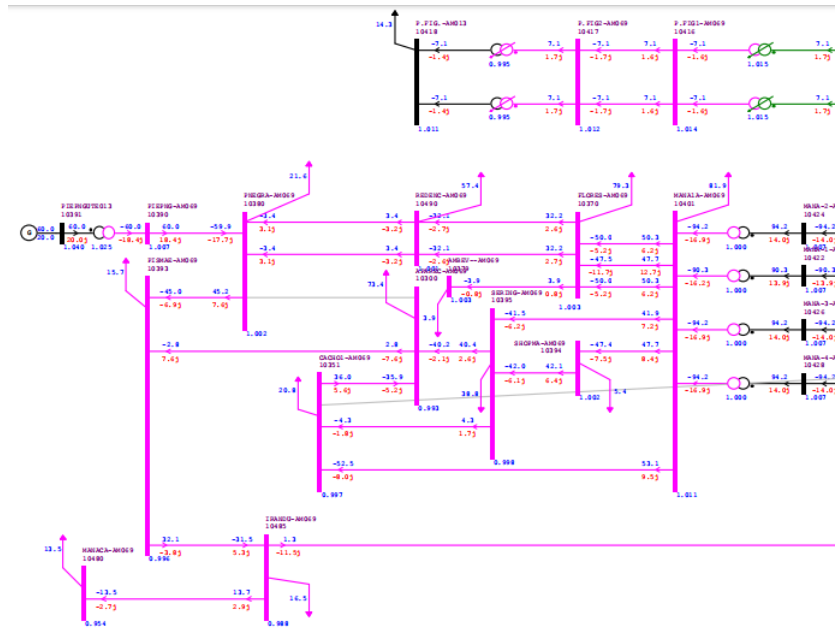


Figura 4.3: Subsistema 69kV - Parte 1

Fonte: Do autor.

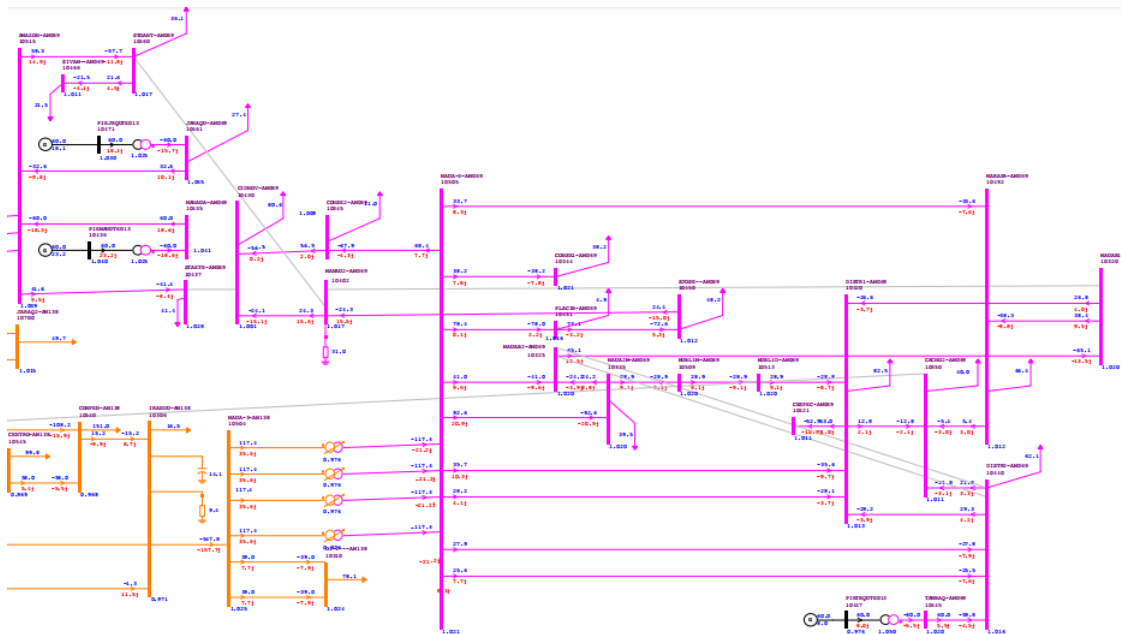


Figura 4.4: Subsistema 69kV - Parte 2

Fonte: Do autor.

Com a rede devidamente apresentada, o trabalho propôs-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 na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados das barras analisadas

Código	Nome	Nível de Tensão (kV)	Limite de Potência (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	436247
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

4.2 Cenários de Estudo

O consumo de eletricidade proveniente da rede elétrica cresce a uma taxa média de 3,4%, inferior de 2,8% e superior de 4,1%, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia, estudo produzido pela ONS. A fim de avaliar o caso de estresse mais intenso ao sistema elétrico, a taxa de crescimento de consumo foi considerada. A análise propõe-se a ser bianual, o que implica em um aumento de 8,2% entre os anos destacados, como pode ser visto 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

4.3 Avaliação da Margem de Estabilidade de Tensão

A margem de estabilidade de tensão depende de dois fatores: potência inicial, normalmente um valor localizado no tempo que representa a carga de a que o sistema atende em determinado período, e potência máxima, que, para a proposta desse trabalho, varia.

A potência inicial recebe os valores de potência dos eletropostos que são incluídos na rede, esses advindos de um valor, dos 20 possíveis, resultado da combinação de três dos quatro valores que o eletroposto pode assumir: 114, 147, 180 ou 213 kW. A conexão é feita em nos níveis de tensão de 138kV e 69kV.

Os resultados estão dispostos em um mapa de calor cujas cores estão graduadas a partir dos valores médios de margem. Cada célula representa os valores mínimo e máximo atingidos para o ano e a quantidade de eletropostos considerada.

4.3.1 Margem de Estabilidade Convencional

A margem de estabilidade convencional é calculada considerando o ponto de máximo carregamento do sistema, $P_{PMC} = 4362.47$ MW.

Esta análise é generalista ao ponto de não considerar condições de operação seguras sob a ótica da tensão elétrica, mas é útil para avaliar a quanto estresse a rede consegue ser submetida. A não garantia de uma condição de operação segura decorre do aumento da potência inicial do sistema a cada caso da análise, isso porque para algumas das barras que compõem a rede, a potência inicial ultrapassa o valor de potência máximo que a barra conseguiria receber e ainda disponibilizar 0.95 pu de tensão elétrica às cargas conectadas.

A Figura 4.5 apresenta o comportamento da rede inteira quando os eletropostos são conectados.

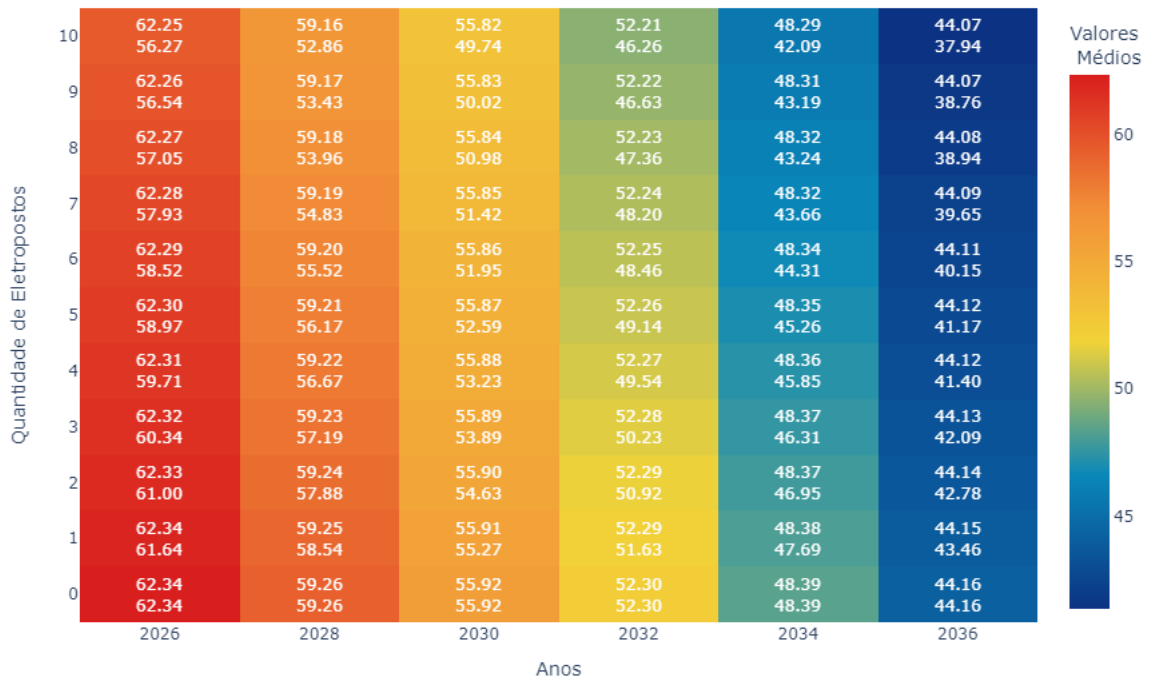


Figura 4.5: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Do autor.

Para uma quantidade nula de eletropostos adicionados, vê-se a tendência da margem de estabilidade de tensão do sistema com os passar dos anos: a margem cai de 62,34% a 44,16%. Em 2026, o ano com menor potência inicial, os valores de margem são naturalmente maiores, variando de 62,34% a 56,27%. Em 2036, o ano com maior potência inicial,

os valores de margem vão de 44,15% a 37,94%.

O cenário de análise apresenta valores de margem de estabilidade robustos e longe da margem de segurança mínima, que é de 4% a 7%, mas não leva em consideração fatores importantes como a operacionabilidade do sistema.

4.3.2 138 kV

Dessa vez sistema é inteiro 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.

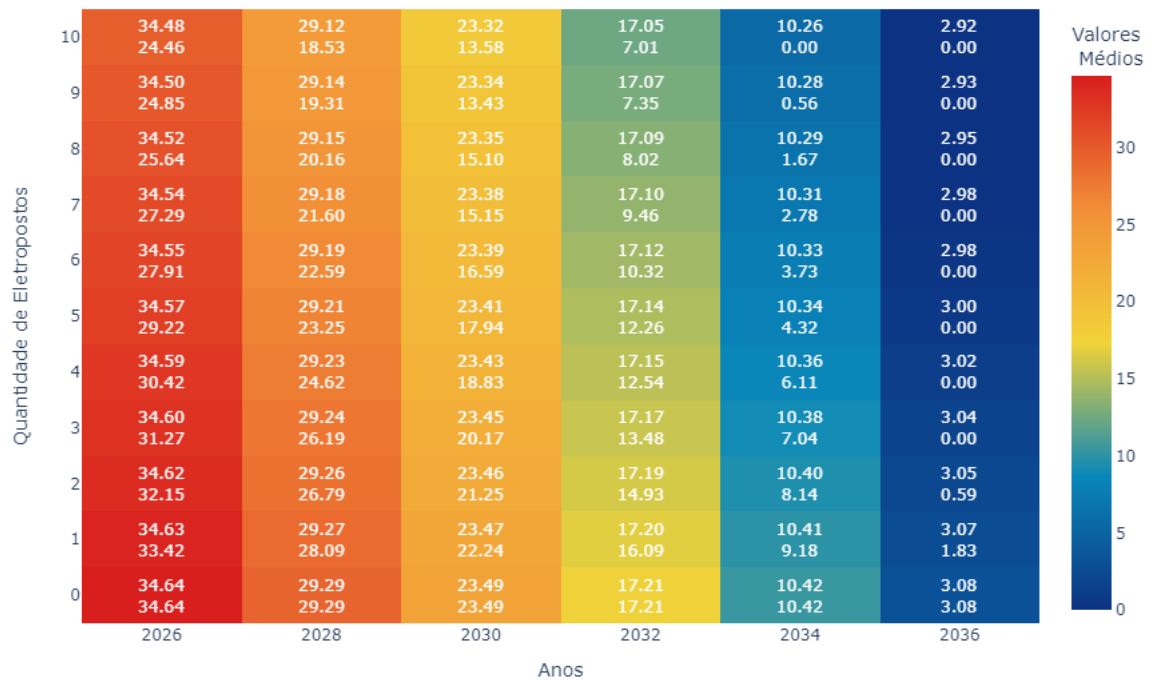


Figura 4.6: Evolução da margem de estabilidade de tensão convencional para nível de tensão de 138kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Do autor.

Através da avaliação da Figura 4.6, é fácil notar que o sistema a margem, sem a adesão de eletropostos, diminui de 36,64% a 3,08%. Em 2026 os valores de margem vão de de 34,63% a 24,46%. Em 2034 o sistema já sairia do intervalo de segurança, a partir de seis postos alocados, com 3,73% de margem. Em 2036 o sistema estaria à beira da instabilidade, a partir de três postos alocados, com um valor máximo de 3,04% e mínimo de zero.

O cenário de análise apresenta valores de margem de estabilidade baixos e próximos de um colapso de tensão nos anos finais de análise.

4.3.3 69 kV

Agora o sistema é submetido ao ponto de máximo carregamento da barra mais fraca pertencente ao nível de tensão de 69V. A referência de potência é retirada da barra número 10480, $P_{PMC_{138}} = 2.024,48$ MW.

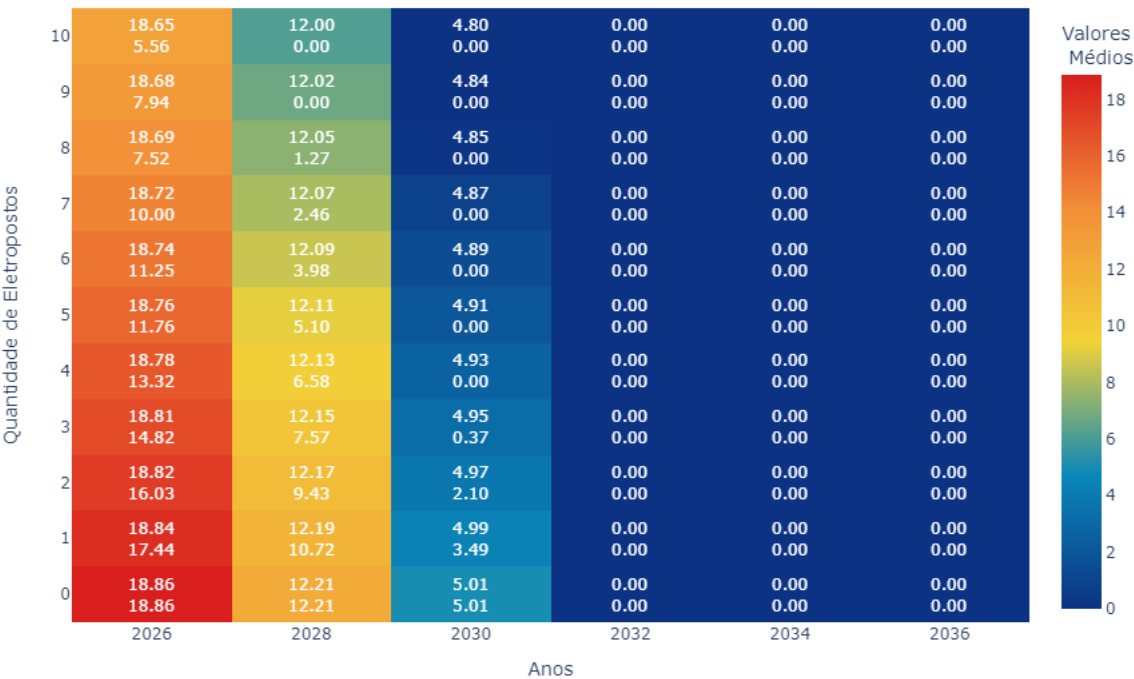


Figura 4.7: Evolução da Margem de Estabilidade de Tensão Convencional para Nível de Tensão de 69 kV com o Número de Eletropostos Através dos Anos.

Fonte: Do autor.

Observando a Figura 4.7, nota-se que as margens continuam diminuindo, sem a adesão de eletropostos tem-se 18,86% a valores nulos de margem. Em 2026 os valores de margem vão de 18,84% a 5,56%. Em 2028 o sistema já sairia 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.

O cenário de análise apresenta valores de margem de estabilidade baixos e próximos de um colapso de tensão nos anos iniciais da análise.

4.3.4 Margem de Estabilidade por Nível de Tensão

A análise dos valores da margem de estabilidade por nível de tensão visa determinar a grandeza alvo a partir do agrupamento de barras em um mesmo nível, mesmo que o alocamento de postos não faça tal distinção. O ponto de máximo carregamento passa a ser o valor de potência que garante a condição de operação segura.

4.3.4.1 138 kV

Nesse nível de tensão estão identificadas 14 barras, com limites de potência entre 2.513,49 e 4.362,47 MW.

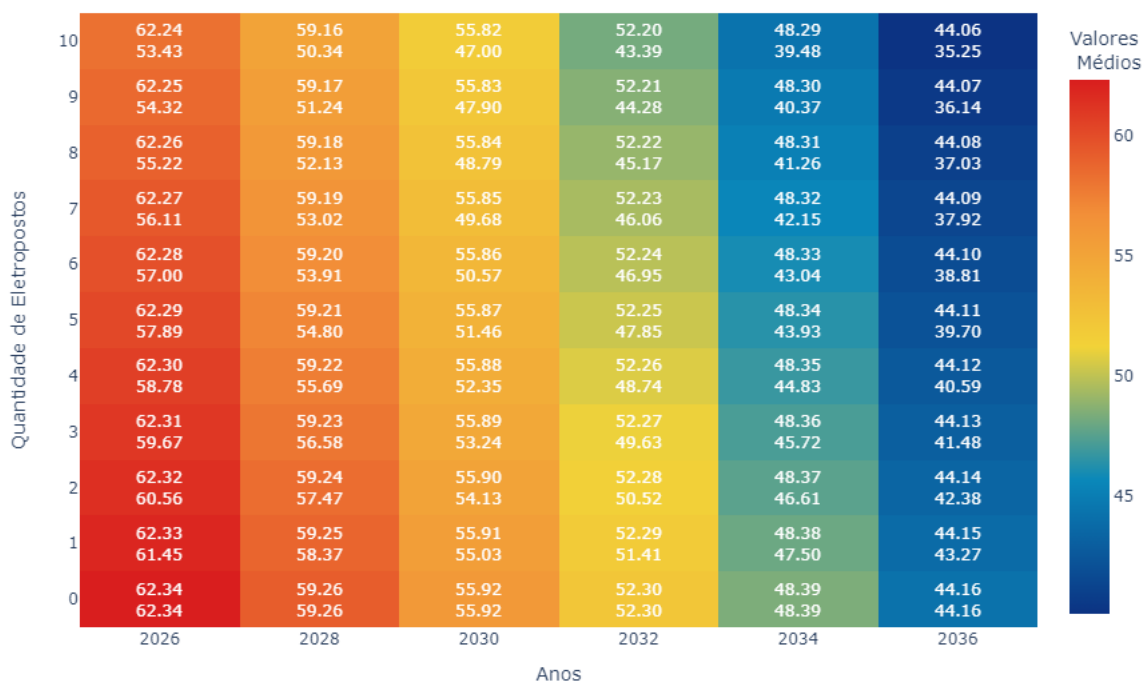


Figura 4.8: Evolução da margem de estabilidade de tensão para nível de tensão de 138kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Do autor.

A margem de estabilidade de tensão segue a tendência de diminuir com o passar dos anos e o aumento da quantidade de eletropostos alocados, como é possível enxergar na Figura 4.8. Os resultados obtidos são numericamente muito parecidos com o cenário de análise de margem convencional para o PMC máximo. Para nenhum eletroposto incluído no sistema, os valores de margem vão de 62,34% a 44,16%. Em 2026 os valores de margem

são maiores registrados, variando de 62,33% a 53,43%. Em 2036 os valores de margem vão de 44,15% a 35,25%.

Esse cenário resulta em valores de margem altos e longe da margem de segurança mínima.

4.3.4.2 69 kV

Nesse nível de tensão existem 35 barras, com limites de potência entre 2.024,48 e 4.362,47 MW. O primeiro valor mostrado é o menor valor de potência registrado para todas as barras em análise. O impactado da consideração desse valor como um "ponto de máximo carregamento" possível tem impactos significativos nos cálculos realizados.

A Figura 4.9 mostra que o comportamento para 69kV segue como visto anteriormente, mas registra menores valores para as margens em comparação ao cenário anterior. O resultado não é surpreendente, visto que é neste nível de tensão que a barra com a menor potência limite para operacionabilidade está alocada.

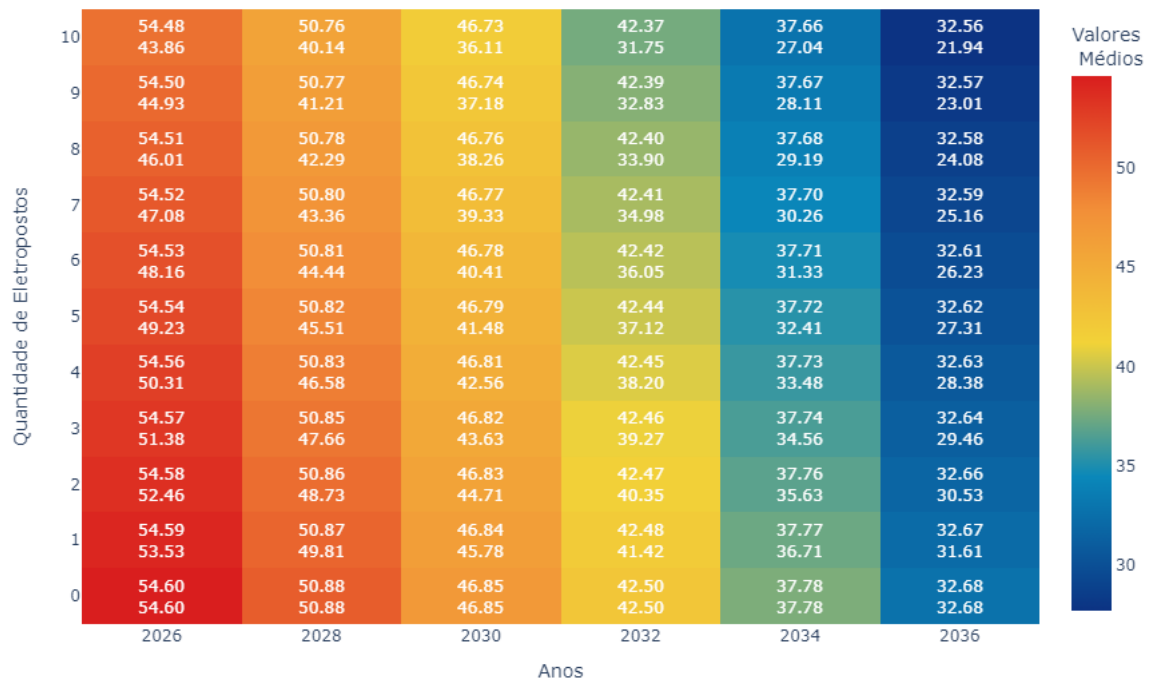


Figura 4.9: Evolução da margem de estabilidade de tensão para nível de tensão de 69kV com o número de eletropostos através dos anos.

Fonte: Do autor.

Sem que haja a inserção de eletropostos na rede, os valores de margem ficam entre

54,60% e 32,86%. Em 2026 os valores de margem são maiores registrados, naturalmente, variando de 54,59% a 43,86%. Em 2036 os valores de margem vão de 32,67% a 21,94%.

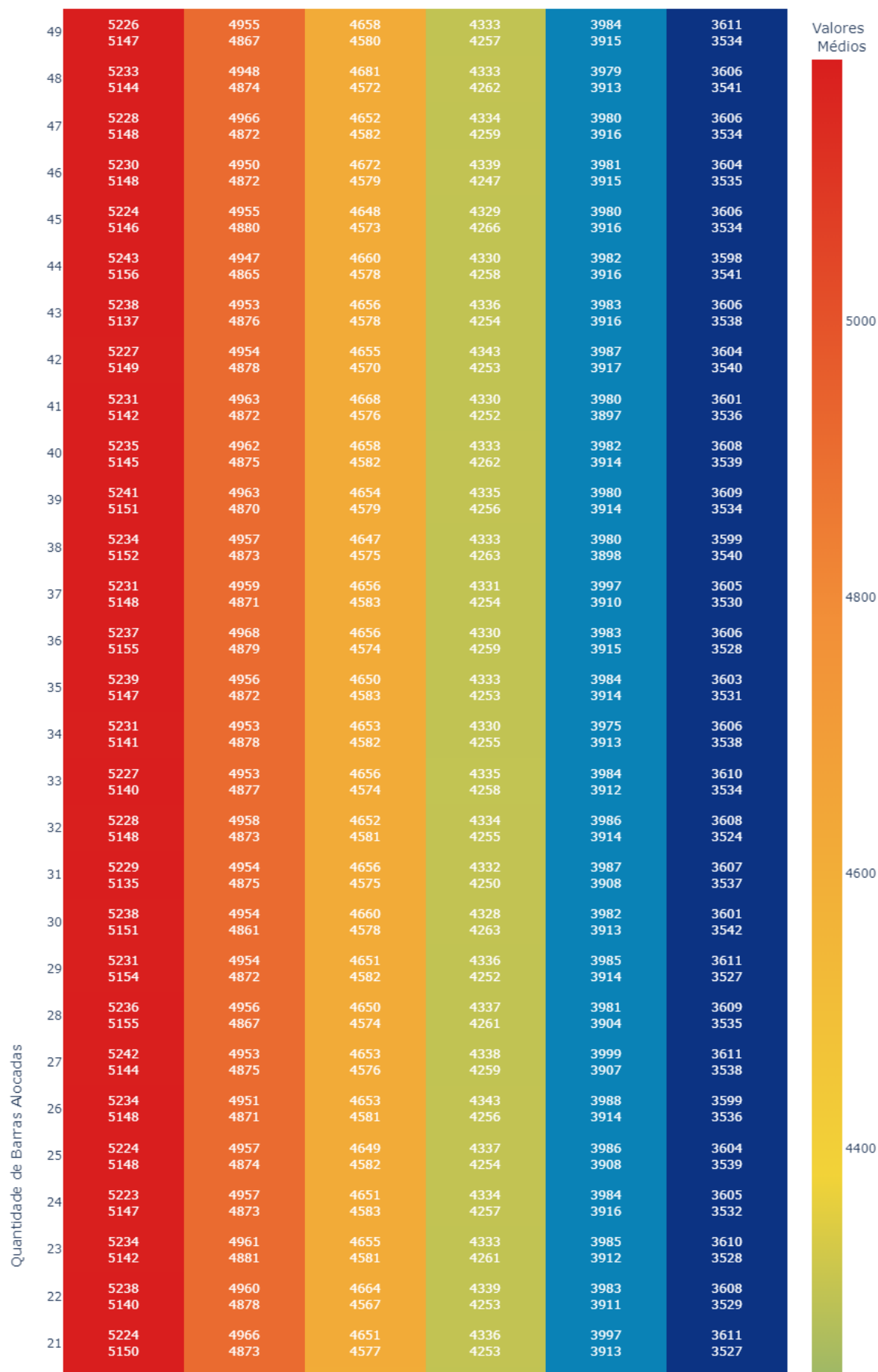
O estudo deste cenário retorna valores de margem relativamente altos e longe da margem de segurança mínima.

4.3.5 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, que para esta análise, será o máximo PMC.

4.3.5.1 Capacidade de Hospedagem Convencional

Assim como a margem de estabilidade convencional, a capacidade de hospedagem convencional avalia a capacidade bruta de alocação de novas cargas, mesmo que a condição segura de operação não seja garantida. O eixo vertical, diferente das figuras anteriores, representa o número de barras nas quais os eletropostos seriam conectados.



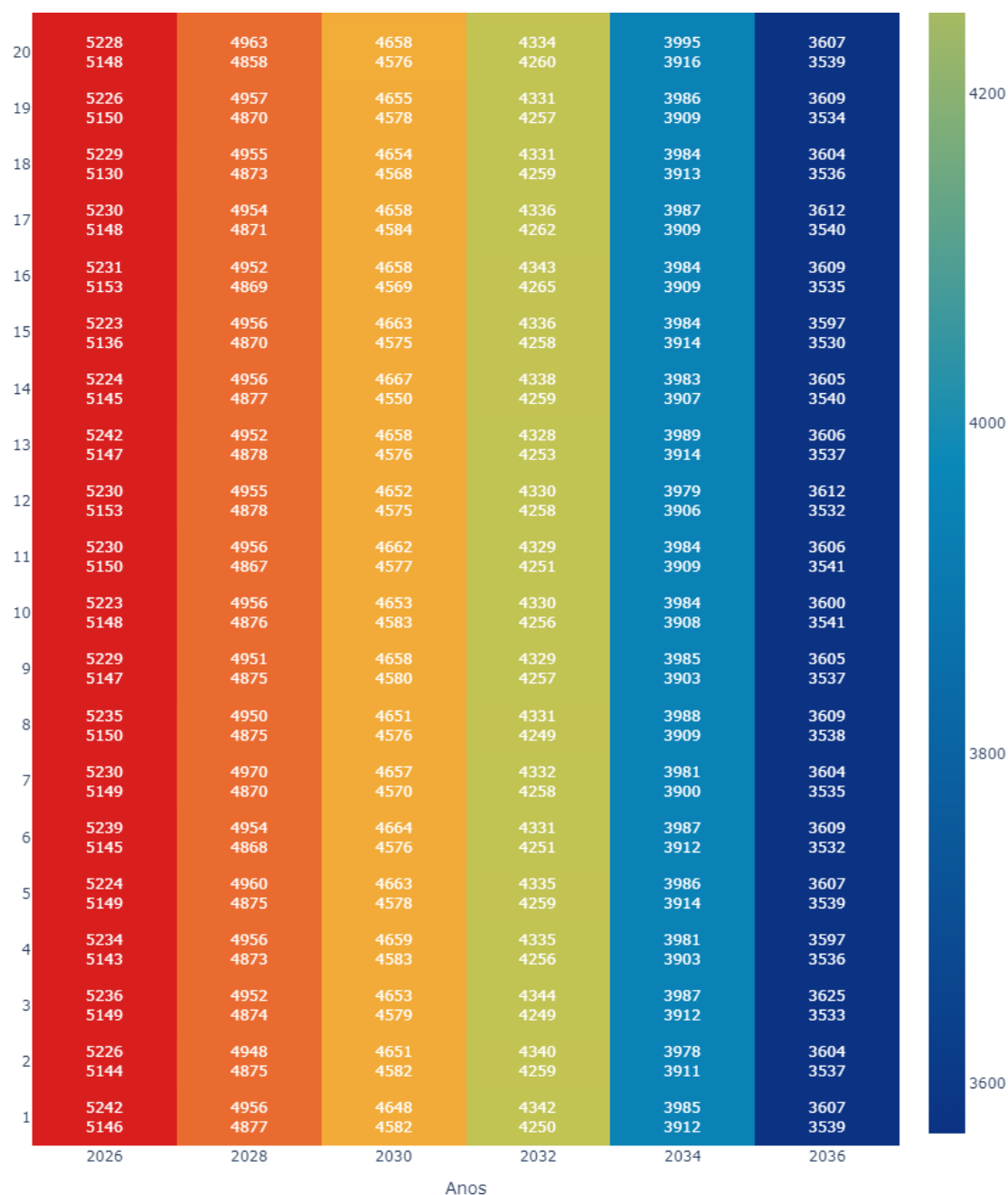


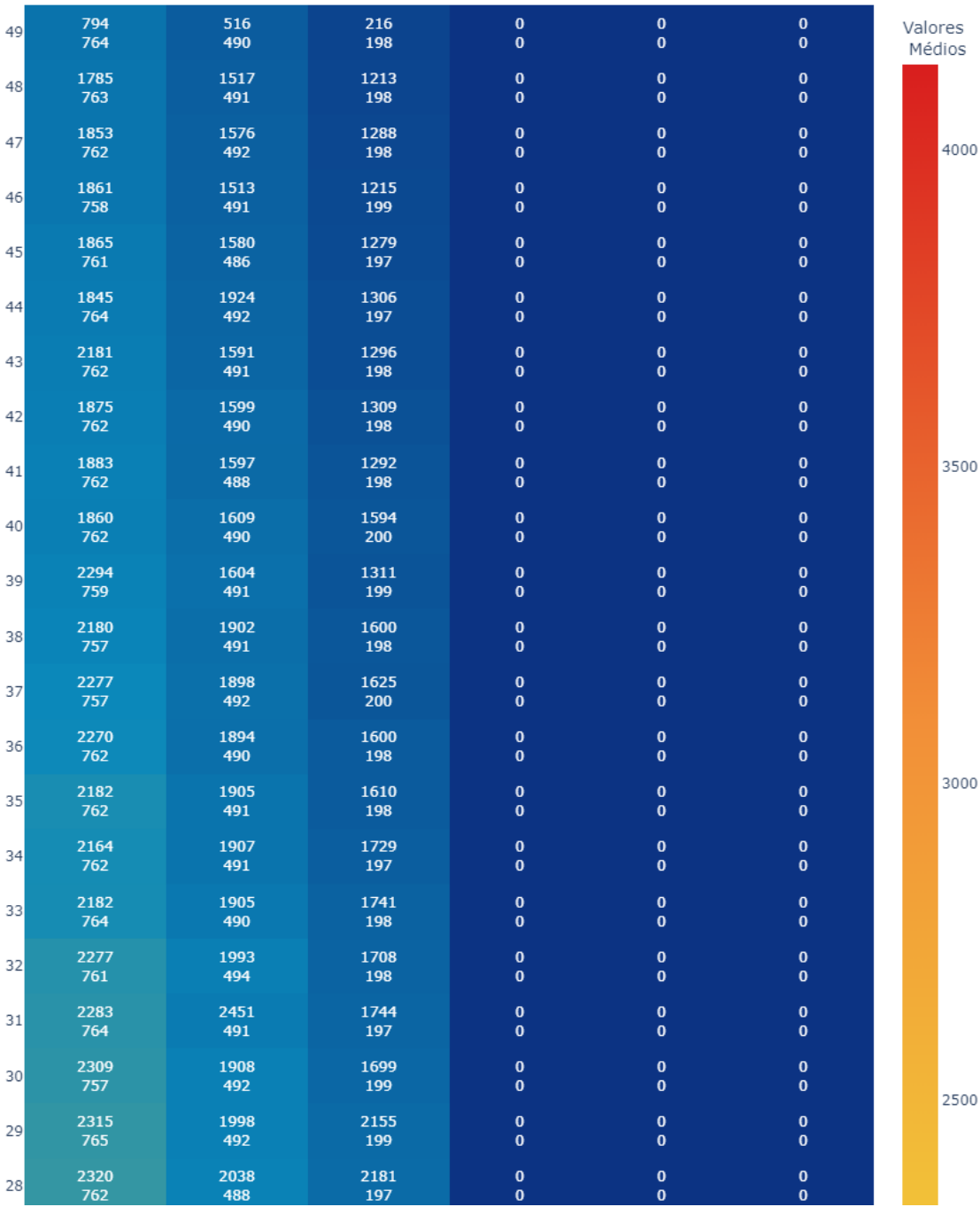
Figura 4.10: Evolução da capacidade de hospedagem convencional com o número de barras alocadas através dos anos.

Fonte: Do autor.

Na Figura 4.10 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. Apesar dessa tendência, é importante ressaltar que os valores alcançados ainda são consideráveis em quantidade.

4.3.6 Capacidade de Hospedagem para Condição de Operação Segura

Desta vez, o limite de potência para a operação segura passa a ser o ponto máximo de carregamento de cada uma das barras. O cálculo é feito a partir da iteração entre todas as barras e a inclusão de sucessivos valores de potência possíveis dos eletropostos, de maneira aleatória.



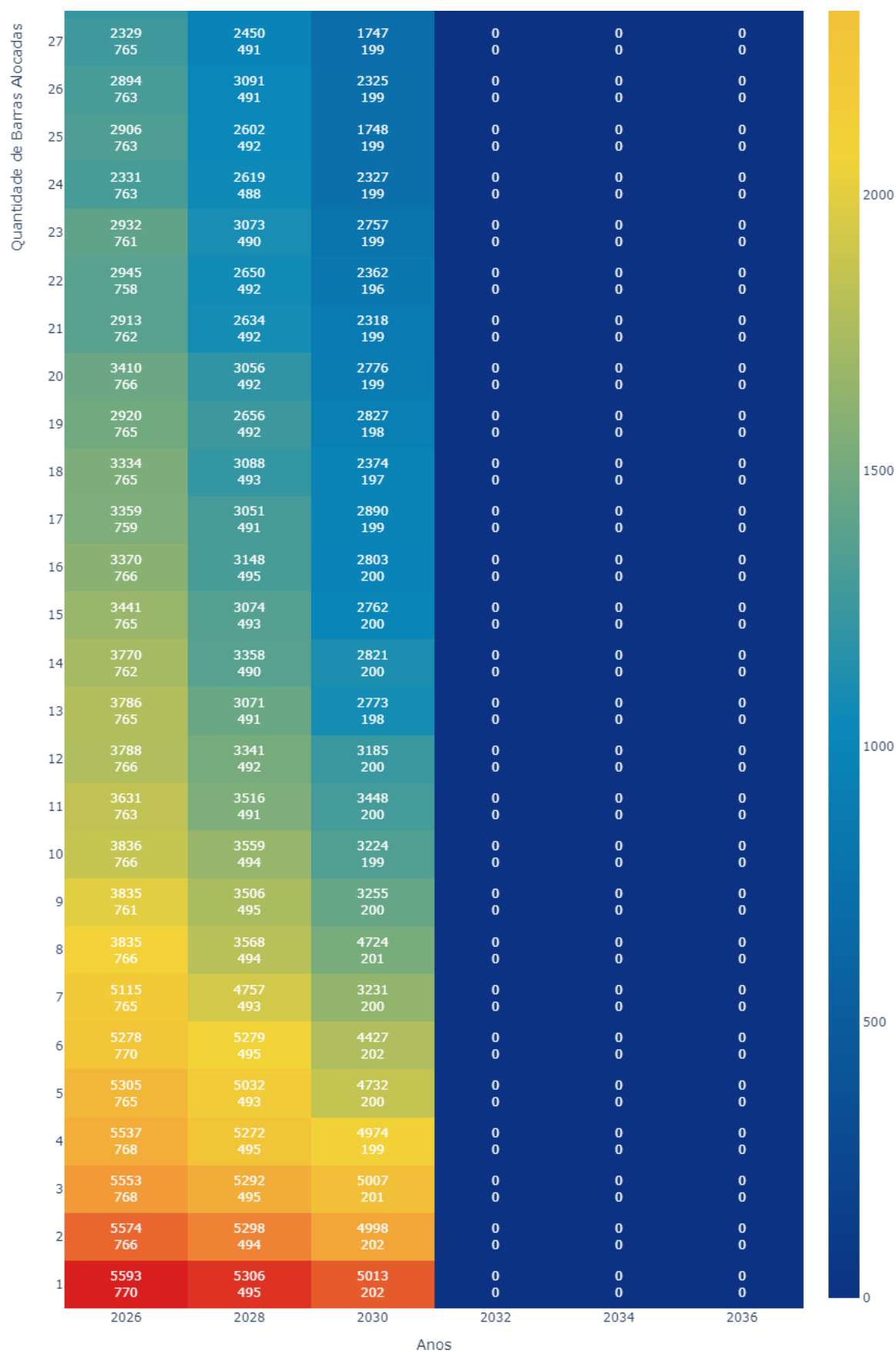


Figura 4.11: Evolução da capacidade de hospedagem para condição de operação segura com o número de rletropostos através dos anos.

Fonte: Do autor.

Pela Figura 4.11 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.

4.3.7 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.