

7

Simulação A - Sistema IEEE 34 Barras

7.1

Introdução

O sistema-teste IEEE 34 barras [18], cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 7.1, é um sistema real que está localizado no estado norte americano do Arizona e incorpora todas as possíveis configurações práticas e características de carga de um sistema real de distribuição. A tensão nominal do alimentador é 24,9 kV e suas características principais são:

1. muito longo e com carregamento leve,
2. dois reguladores de tensão em série, necessários para manter um bom perfil de tensão,
3. um transformador para reduzir a tensão para 4,16 kV para uma parte do alimentador (entre as barras 19 e 20),
4. carregamento desbalanceado com cargas nodais e distribuídas,
5. capacitores em paralelo nas barras 28 e 33.

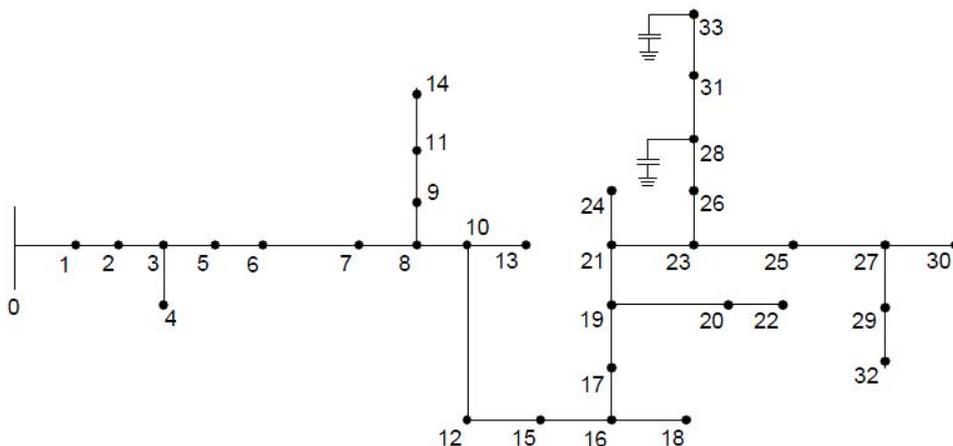


Figura 7.1 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste IEEE 34 Barras

Os sistemas elétricos de distribuição apresentam complexidades devido à natureza das cargas e das conexões dos circuitos: sistema polifásico de estrutura desbalanceada. Portanto, a análise de sistemas em regime

permanente requer customização para cada cenário. Igualmente, a modelagem da rede e da carga deve ser feita com precisão para atender a estes requisitos peculiares [19] [20].

Porém, sob perspectiva macroscópica de planejamento e operação do sistema focados em uma análise onde se deseja obter resultados aproximados do comportamento do sistema dentro de uma perspectiva mais geral, simplificações são comuns.

Neste trabalho serão adotados modelagem e métodos de análise que assumem que a rede é trifásica perfeitamente balanceada: todas as cargas são trifásicas, balanceadas, concentradas nos nós e modeladas como potência constante. Além disso, todos os segmentos das linhas são assumidos como trifásicos e perfeitamente transpostos. Estas simplificações têm sido largamente utilizadas na literatura. Segundo [19], apesar de causarem pequena diferença quando tem seu perfil de tensão comparado com o sistema original, as simplificações são adequadas para estudos de alocação de equipamentos, tamanho dos equipamentos e dos controles utilizados. No sistema-exemplo em análise, os reguladores de tensão e o transformador foram retirados para facilitar a verificação dos efeitos da inserção do gerador distribuído.

Utilizando as simplificações citadas, se obteve o sistema modificado cujo ponto de operação é apresentado na Tabela 7.1. As bases adotadas são de 24,9 kV e 1 MVA. A barra 0 representa a subestação e sua tensão é de 1,0300 pu. O sistema possui demanda de $363 + j292$ kVA e perdas de $16,1 + j 7,1$ kVA.

As simulações realizadas nas próximas seções iniciam no ponto de operação do caso-base e são identificadas ao longo do texto pela numeração 1S, 1C, 2S e 2C, como mostra a Tabela 7.1. As simulações 1S e 1C são realizadas com a demanda constante e igual a do caso-base. As simulações 2S e 2C são realizadas aplicando-se incrementos na carga do caso-base até atingir o ponto de máximo, onde o módulo de Fluxo de Potência Continuado não encontra soluções. A letra que acompanha o número identifica se a simulação foi realizada sem controle (S) ou com controle (C) de tensão por parte do gerador distribuído inserido.

Tabela 7.1- Ponto de Operação do Caso-Base (Sistema-Teste 34 Barras)

| Barra | V [pu] | θ [°] | Pg [kW] | Qg [kVar] | Pd [kW] | Qd [kVar] | Shunt [kVar] |
|--------------|--------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0 | 1,0300 | 0,0000 | 379,09 | 58,77 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 1,0292 | -0,0119 | 0,00 | 0,00 | 19,00 | 10,00 | 0,00 |
| 2 | 1,0287 | -0,0200 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 1,0193 | -0,1727 | 0,00 | 0,00 | 5,00 | 3,00 | 0,00 |
| 4 | 1,0193 | -0,1727 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 1,0086 | -0,3547 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 1,0001 | -0,5016 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | 0,9998 | -0,5066 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 8 | 0,9997 | -0,5082 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 9 | 0,9996 | -0,5067 | 0,00 | 0,00 | 11,00 | 6,00 | 0,00 |
| 10 | 0,9971 | -0,5680 | 0,00 | 0,00 | 15,00 | 8,00 | 0,00 |
| 11 | 0,9988 | -0,4682 | 0,00 | 0,00 | 12,00 | 23,00 | 0,00 |
| 12 | 0,9968 | -0,5730 | 0,00 | 0,00 | 2,00 | 1,00 | 0,00 |
| 13 | 0,9971 | -0,5680 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 14 | 0,9988 | -0,4682 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 15 | 0,9919 | -0,6952 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 16 | 0,9918 | -0,6983 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| 17 | 0,9830 | -0,9230 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 18 | 0,9918 | -0,6983 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | 0,9827 | -0,9292 | 0,00 | 0,00 | 4,00 | 2,00 | 0,00 |
| 20 | 0,9825 | -0,9357 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 21 | 0,9817 | -0,9617 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 5,00 | 0,00 |
| 22 | 0,9822 | -0,9308 | 0,00 | 0,00 | 27,00 | 22,00 | 0,00 |
| 23 | 0,9806 | -1,0006 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 |
| 24 | 0,9817 | -0,9617 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 25 | 0,9804 | -0,9993 | 0,00 | 0,00 | 47,00 | 30,00 | 0,00 |
| 26 | 0,9805 | -1,0030 | 0,00 | 0,00 | 3,00 | 2,00 | 0,00 |
| 27 | 0,9803 | -0,9986 | 0,00 | 0,00 | 13,00 | 7,00 | 0,00 |
| 28 | 0,9804 | -1,0146 | 0,00 | 0,00 | 149,00 | 115,00 | 96,12 |
| 29 | 0,9803 | -0,9986 | 0,00 | 0,00 | 9,00 | 5,00 | 0,00 |
| 30 | 0,9803 | -0,9985 | 0,00 | 0,00 | 9,00 | 7,00 | 0,00 |
| 31 | 0,9805 | -1,0379 | 0,00 | 0,00 | 8,00 | 4,00 | 0,00 |
| 32 | 0,9803 | -0,9986 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 33 | 0,9805 | -1,0413 | 0,00 | 0,00 | 19,00 | 16,00 | 144,21 |
| Total | | | 379,0911 | 58,7705 | 363,0000 | 292,0000 | 240,3274 |

Tabela 7.2 - Identificação das Simulações com o Sistema-Teste de 34 Barras

| Simulações | |
|------------|--|
| 1S | Carregamento Constante e Barra 23 <u>sem</u> Controle de Tensão |
| 1C | Carregamento Constante e Barra 23 <u>com</u> Controle de Tensão |
| 2S | Aumento do Carregamento e Barra 23 <u>sem</u> Controle de Tensão |
| 2C | Aumento do Carregamento e Barra 23 <u>com</u> Controle de Tensão |

7.2

Simulação 1S - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 23 sem Controle de Tensão e Carregamento do Sistema Constante

No ponto de operação do caso-base, foi inserido um gerador na barra 23 sem controle de tensão e com geração de potência reativa constante e igual a zero e, portanto, opera com fator de potência unitário. A simulação consiste em resolver sucessivos problemas de fluxo de potência onde a geração ativa da barra 23 é gradualmente aumentada até assumir demanda e perdas do sistema com o carregamento constante. Ao final, a geração de potência ativa da barra 0 é nula. Para o algoritmo de fluxo de potência a barra 0 é do tipo $V\theta$ e as demais, incluindo-se a do gerador distribuído, são barras do tipo PQ .

Na Figura 7.2, exibem-se os fatores de participação dos dois geradores no eixo principal e suas respectivas gerações de potência ativa no eixo secundário. Percebe-se que na Configuração 37 a geração de potência ativa da barra 0 é nula e a potência gerada pelo gerador distribuído da barra 23 é menor que a geração total do caso-base. Portanto, conclui-se que houve redução das perdas, uma vez que a demanda do sistema permaneceu constante ao longo da simulação.

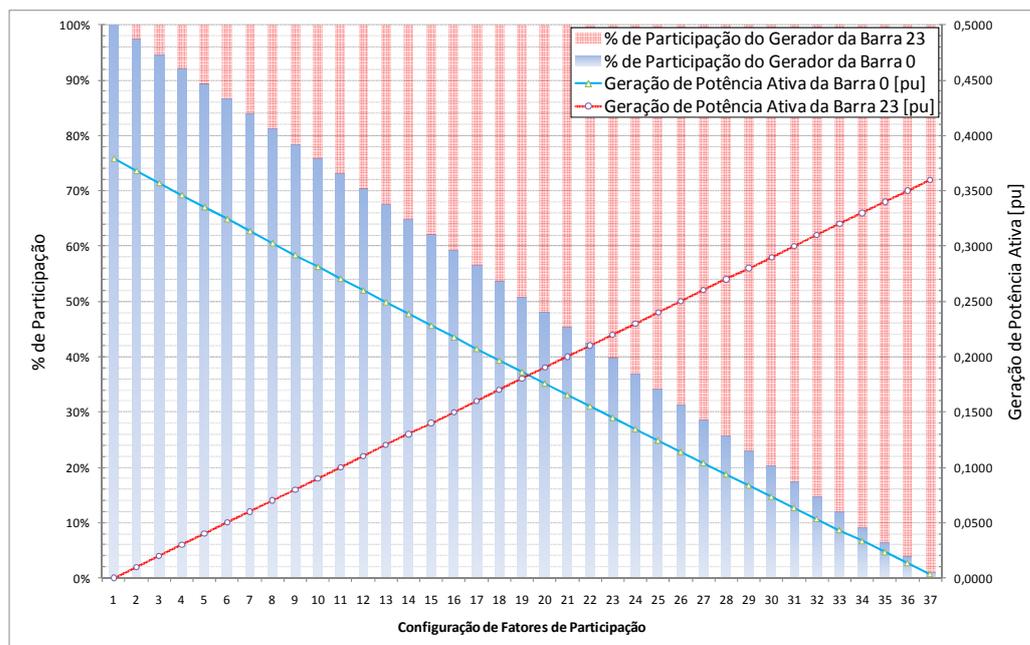


Figura 7.2 - Fatores de Participação e Geração de Potência Ativa dos Geradores na Simulação 1S

Segundo a Aneel, através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, a variação máxima permitida na tensão nominal em regime permanente é de $\pm 5\%$. A Figura 7.3 exibe a tensão em cada barra para algumas configurações de fatores de participação.

Os resultados encontrados para a tensão, embora dentro dos limites especificados, apresentam elevação do perfil de tensão, como pode ser visto na Figura 7.3. Percebe-se que, quanto maior o percentual de participação do gerador distribuído da barra 23 na geração de potência ativa, mais elevado será o perfil de tensão. Para a Configuração 37, onde o gerador distribuído assume 99% da demanda do sistema, o perfil de tensão é o mais elevado. Todavia, embora tenha sido benéfico, neste caso, a elevação do perfil de tensão pode vir a ser um problema para o sistema caso viole o limite máximo [21].

Nota-se que o gerador distribuído, mesmo sem controle de tensão, modifica os níveis de tensão em todo o sistema. O comportamento usual da elevação da tensão pela inclusão de um gerador distribuído ocorre, sobretudo pela relação X/R dos alimentadores e da topologia radial dos sistemas de distribuição. Este é um dos principais requisitos técnicos que limita a instalação de geradores em sistemas de distribuição. Quanto menor é o nível de tensão, mais restritivo é este problema [21].

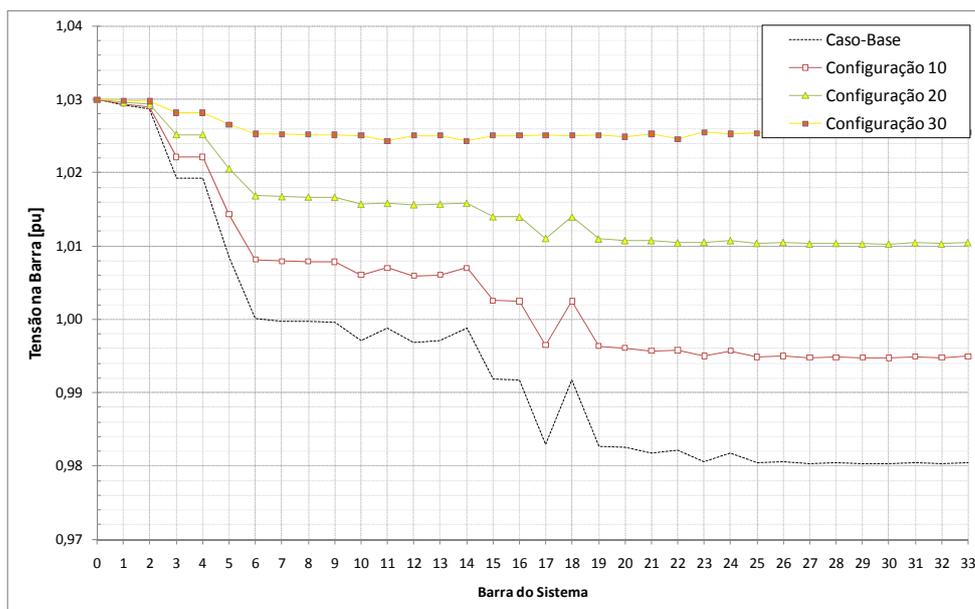


Figura 7.3 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 1S

Houve redução das perdas de potência ativa no sistema, como pode ser observado na Figura 7.4, as perdas em kW no eixo principal e em percentual da geração total no eixo secundário. As perdas mínimas ocorrem na Configuração 33, onde o gerador distribuído assume 88% da demanda do sistema. Qualquer aumento de geração acima deste valor resulta em elevação das perdas.

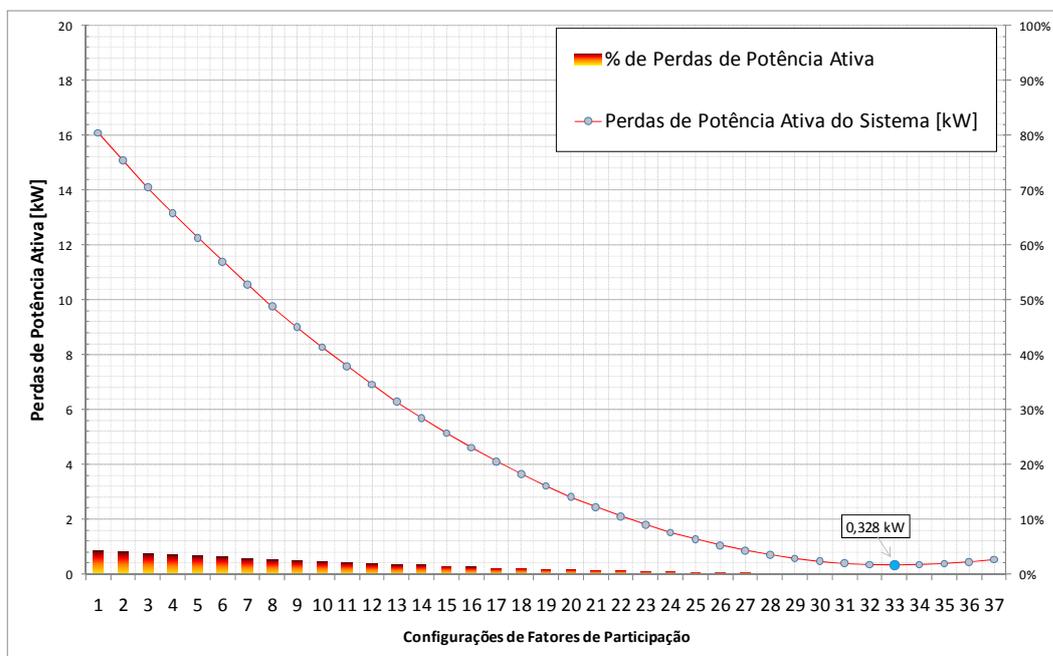


Figura 7.4 - Perdas de Potência Ativa e Reativa do Sistema na Simulação 1S

Vale salientar que nem sempre a inserção do gerador distribuído tem efeito positivo nas perdas do sistema: a inclusão do gerador pode aumentar ou diminuir as perdas elétricas dependendo da potência injetada pelo gerador e da sua localização [21].

Os índices de estabilidade de tensão evoluem positivamente ao se transferir a geração para o gerador distribuído, com exceção para os índices desta barra. Além disso, não há indícios da proximidade do ponto de máximo ou pontos de operação na parte inferior da curva para fator de potência constante no plano SV . Os índices de estabilidade de tensão são apresentados na Figura 7.5.

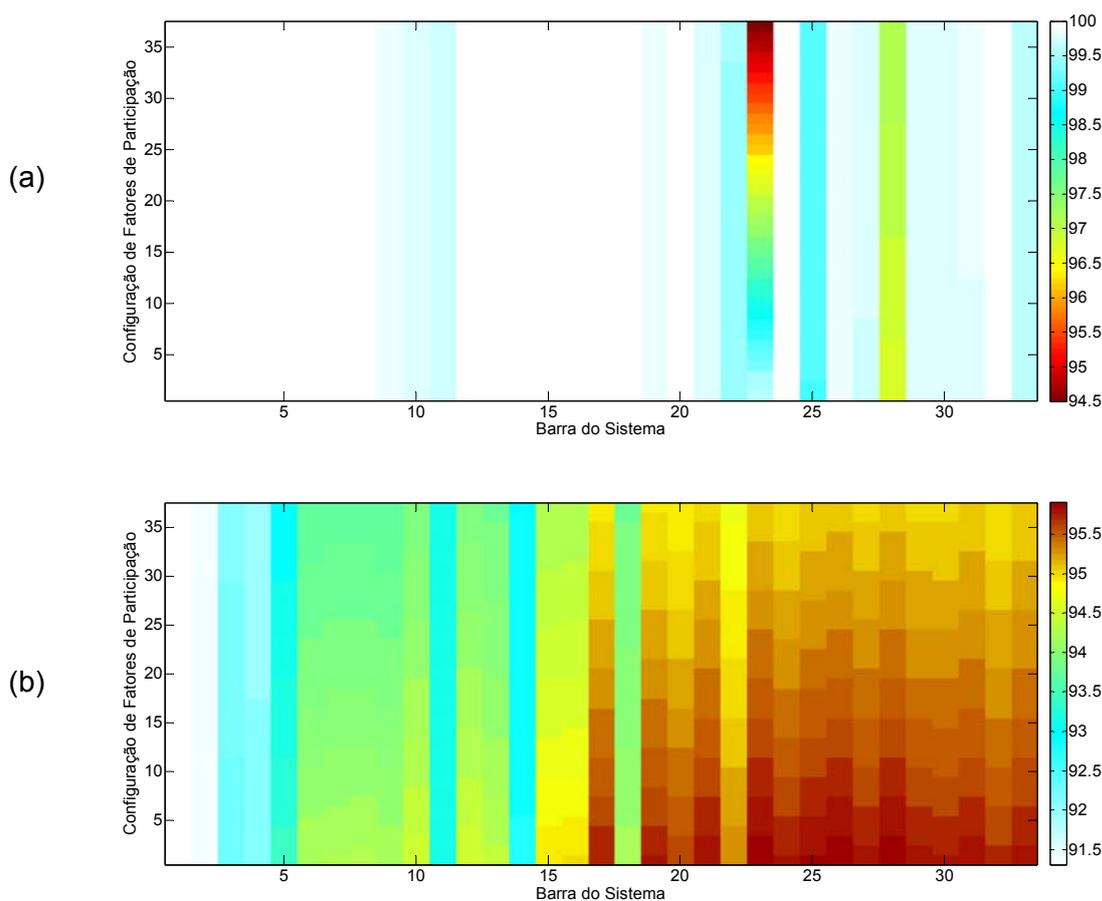


Figura 7.5 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo β por Barra e Caso de Carregamento

7.3

Simulação 1C - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 23 com Controle de Tensão e Carregamento do Sistema Constante

Nesta simulação, utiliza-se o mesmo sistema simplificado da seção anterior e parte do mesmo ponto de operação do caso-base exibido na Tabela 7.1. Entretanto, foi inserido um gerador na barra 23 com controle de tensão e com geração / absorção de potência reativa ilimitada. Portanto, a tensão na barra 23 permanece constante no valor do caso-base. Para o algoritmo do fluxo de potência, a barra 0 é do tipo $V\theta$, a barra 23 é PV e as demais barras são do tipo PQ . Esta simulação consiste em resolver sucessivos problemas de fluxo de potência onde a geração ativa da barra 23 é gradualmente aumentada até assumir toda a demanda do sistema, incluindo-se as perdas, com seu

carregamento constante. Ao final, a geração de potência ativa da barra 0 é nula como pode ser observado na Figura 7.6, que exibe os fatores de participação dos dois geradores assim como a geração de potência ativa de cada um. Ao final, Configuração 53, a geração de potência ativa maior que no caso-base indica aumento das perdas, uma vez que a demanda do sistema permanece constante por hipótese do teste.

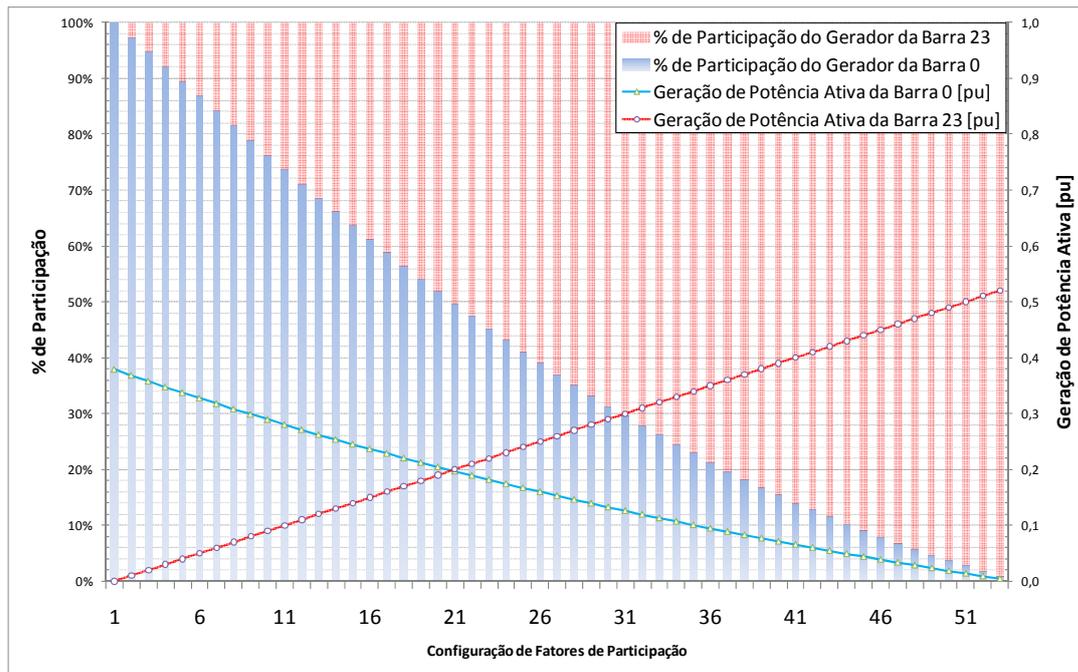


Figura 7.6 - Fatores de Participação e Geração de Potência Ativa dos Geradores na Simulação 1C

Analisando o perfil de tensão do sistema, mostrado na Figura 7.7, pode-se observar que não há uma grande variação ao se transferir a potência ativa gerada para o gerador distribuído da barra 23 e que todas as tensões encontram-se dentro da faixa compreendida entre $\pm 5\%$ de variação da tensão especificada no caso-base.

Na Figura 7.8, apresenta-se o gráfico das perdas de potência ativa para diferentes fatores de participação. As perdas são de 161,2 kW no Caso 53 e representam 31% de toda a potência gerada, uma variação de 901,7% com relação ao caso-base. Por razões econômicas, o operador limitaria a geração de potência ativa deste gerador nestas condições de operação. Comparando-se com a Simulação 1S, observam-se resultados opostos: nesta as perdas de potência ativa foram praticamente zeradas.

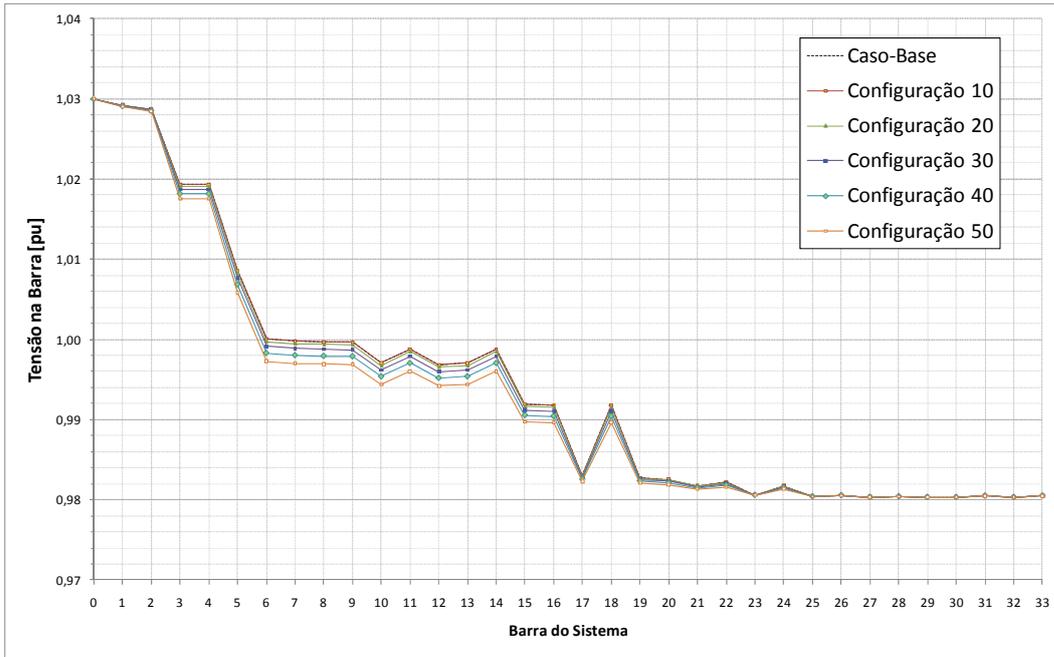


Figura 7.7 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 1C

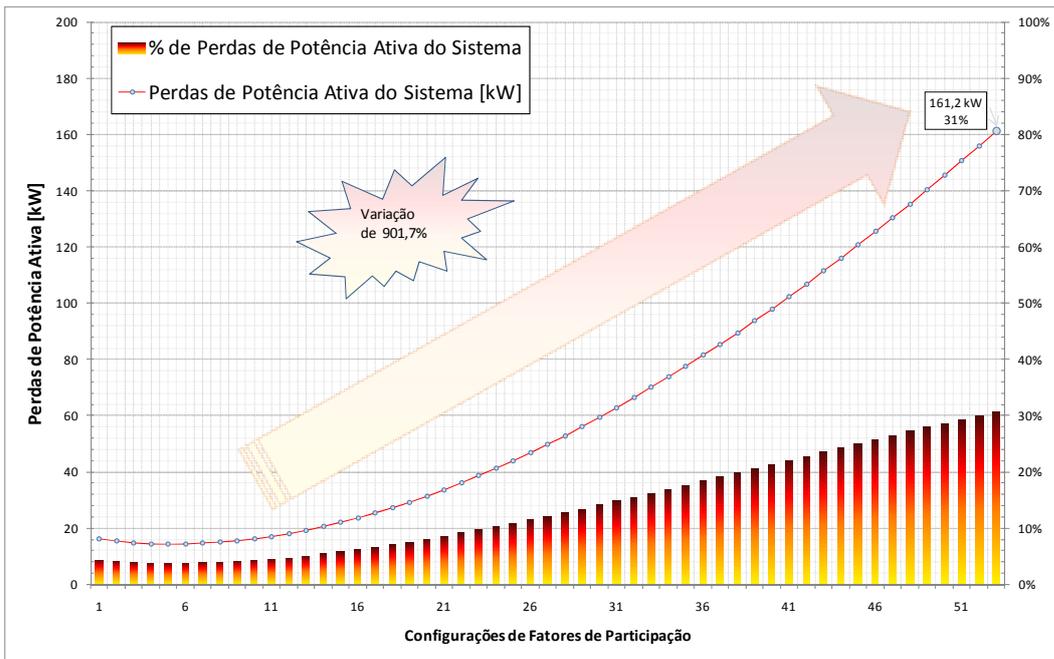


Figura 7.8 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 1C

Analisando-se os índices de estabilidade de tensão, nota-se que a margem de potência fica quase inalterada para todas as barras, exceto para a barra do gerador distribuído que com o aumento de sua geração tem sua margem reduzida. Há redução no valor do ângulo β para algumas barras, indicando uma melhora nas condições de estabilidade de tensão. A entrada do gerador causa

uma brusca variação, como pode ser visto na Figura 7.9, mesmo com a tensão quase sem variação, indicando esta melhora.

Comparando-se os índices de estabilidade de tensão da barra 23 para as duas simulações anteriores, verificam-se valores piores na Simulação 1C, onde se tem margem de potência menor e ângulo β maior. Na simulação 1S tem-se que a menor margem para a barra 23, dentre os pontos de operação em análise, foi de 94,5% e o maior β de $95,9^\circ$, enquanto que, na presente simulação, tem-se menor margem de 80,7% e maior β de $110,1^\circ$.

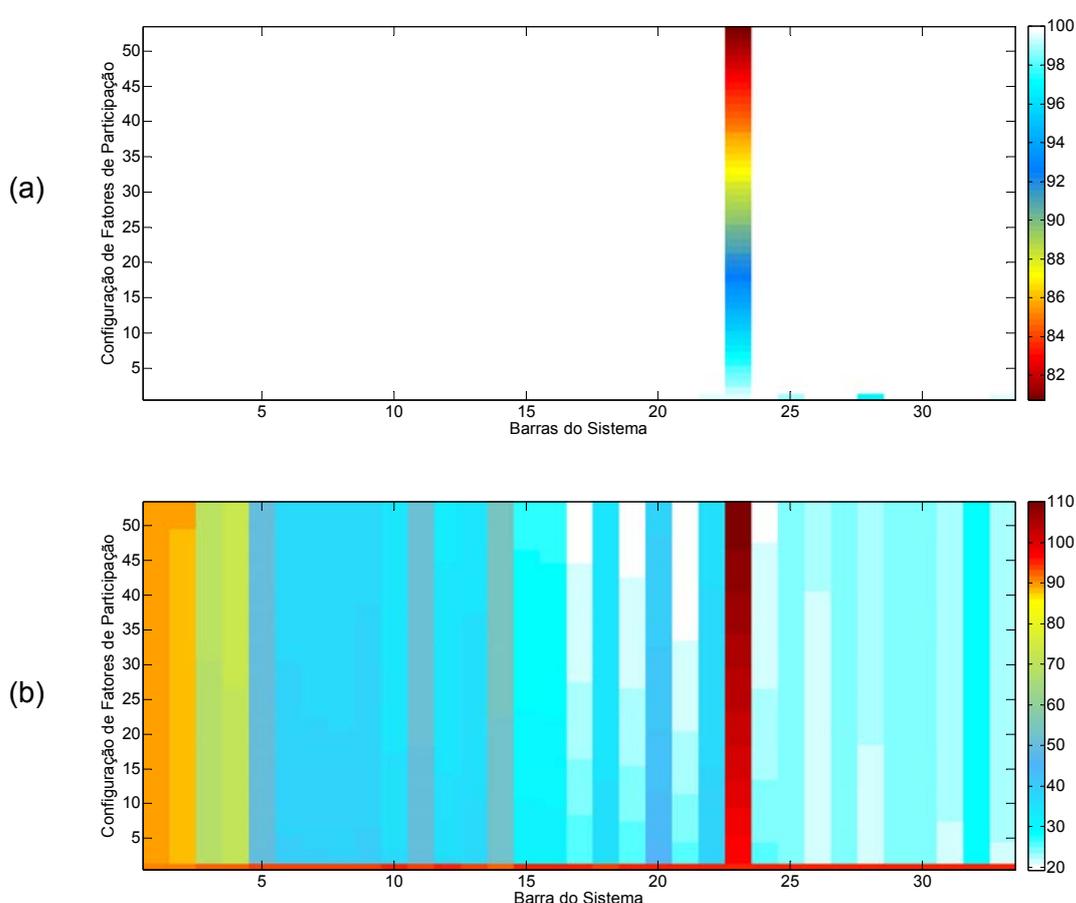


Figura 7.9 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo β por Barra e Caso de Carregamento

Analisando-se os resultados das Simulações 1S e 1C, pode-se concluir que equipar o gerador distribuído da barra 23 com capacidade de controle de tensão não é adequado. As perdas de potência ativa aumentaram em mais de 900% e foram obtidos índices de estabilidade de tensão piores, para atender a mesma demanda. Deve-se ressaltar que estes resultados valem apenas nas condições

impostas nas simulações. Outras situações, como a capacidade limitada de gerar / absorver potência reativa por parte do gerador, levariam a resultados diferentes. Obviamente, quando a capacidade associada à potência reativa se esgotasse, o gerador perderia a capacidade de controlar a tensão. Nesse caso, os resultados seriam qualitativamente semelhantes ao da Simulação 1S.

7.4

Simulação 2S - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 23 sem Controle de Tensão e Aumento do Carregamento do Sistema

A simulação desta seção tem por finalidade avaliar o comportamento do sistema frente a aumentos em seu carregamento supridos pelo gerador distribuído da barra 23 operando com fator de potência unitário. Serão aplicados sucessivos incrementos de 1% na carga do sistema, com fator de potência constante, de maneira que o balanço de potência ativa seja de responsabilidade do gerador distribuído (100% de fator de participação), incluindo-se as perdas do sistema. O balanço de potência reativa será fechado pelo gerador da barra 0, uma vez que o gerador distribuído da barra 23 não gera potência reativa. Para o algoritmo de fluxo de potência, a barra 0 é do tipo *PV*, a barra 23 é do tipo *Qθ* e as demais barras são do tipo *PQ*. Na Tabela 7.3, apresentam-se alguns carregamentos, onde o Caso 1 corresponde ao caso-base e o Caso 287 corresponde ao carregamento máximo obtido, a partir do qual o fluxo de potência não encontra mais solução.

Tabela 7.3 - Casos de Carregamento da Simulação 2S

| Caso | Carregamento (pu) | Caso | Carregamento (pu) |
|------|-------------------|------|-------------------|
| 1 | 0,4659 | 146 | 1,9718 |
| 10 | 0,5095 | 160 | 2,2665 |
| 20 | 0,5628 | 170 | 2,5037 |
| 30 | 0,6217 | 180 | 2,7656 |
| 40 | 0,6867 | 190 | 3,0549 |
| 50 | 0,7586 | 200 | 3,3746 |
| 60 | 0,8380 | 210 | 3,7276 |
| 70 | 0,9256 | 220 | 4,1176 |
| 80 | 1,0225 | 230 | 4,5484 |
| 90 | 1,1294 | 240 | 5,0242 |
| 100 | 1,2476 | 250 | 5,5499 |
| 110 | 1,3781 | 260 | 6,1305 |
| 120 | 1,5223 | 270 | 6,7719 |
| 130 | 1,6816 | 280 | 7,4804 |
| 140 | 1,8575 | 287 | 7,4874 |

Na Figura 7.10, pode-se observar o perfil de tensão do sistema. São apresentados dois gráficos diferentes para oferecer uma visão mais completa de sua evolução. Pode-se aumentar o carregamento, sem que haja violações de tensão, até o Caso 146. Neste ponto de operação, a potência ativa gerada na barra 23 é de 1290,4 kW e a carga do sistema é de $1536,4 + j1235,9$ kVA, um aumento de 323,3% com relação ao caso-base.

As violações de tensão ocorrem por tensão abaixo de 0,95 pu e por tensão acima de 1,05 pu para determinados carregamentos. Como a geração da barra 23 e a carga do sistema crescem simultaneamente, a partir de determinado momento o gerador da barra 23 necessita ter sua tensão aumentada para continuar atendendo ao crescimento da demanda.

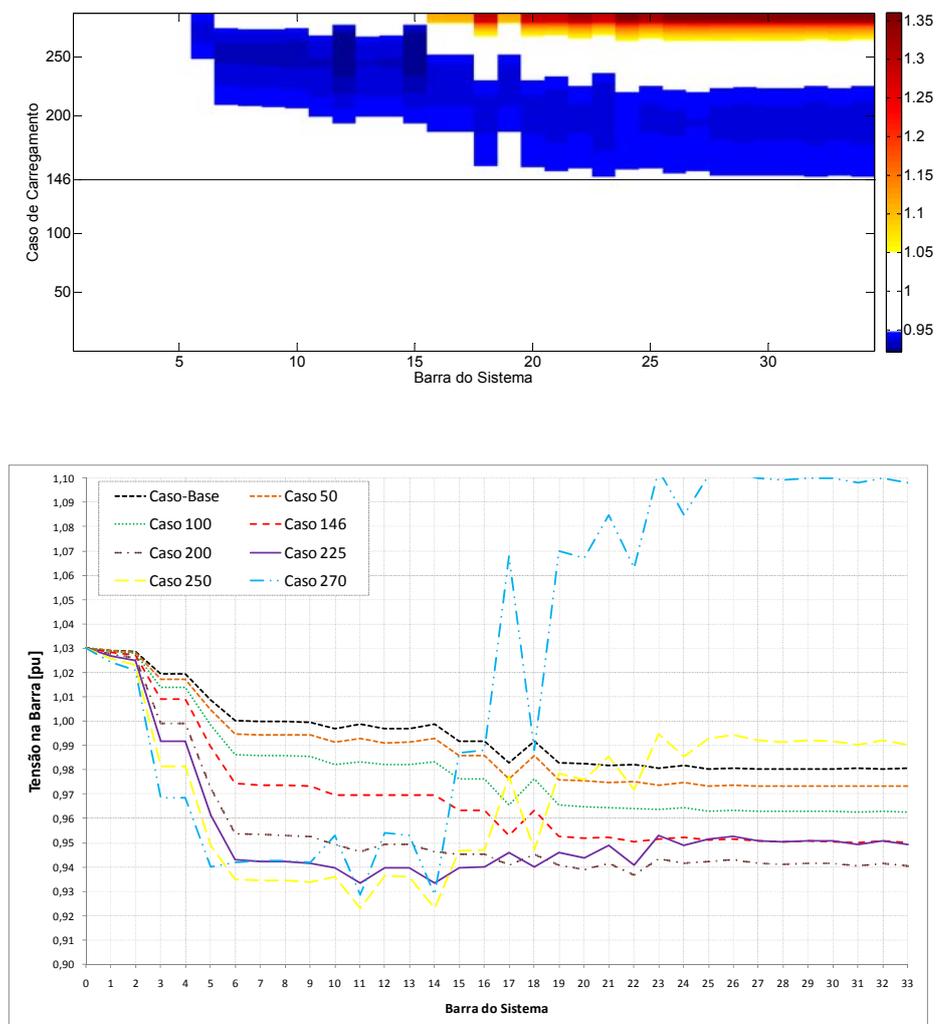


Figura 7.10 – Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 2S

Na Figura 7.11, pode-se observar como as perdas de potência ativa evoluem com o aumento da carga. As perdas para o último caso de carregamento sem que haja violação de tensão (Caso 146) são de 133,1 kW. Comparando-se com o caso-base (perdas de 16,1 kW) tem-se uma variação de 727,4%. Os carregamentos superiores possuem perdas cada vez maiores, chegando a 62,9% no Caso 287.

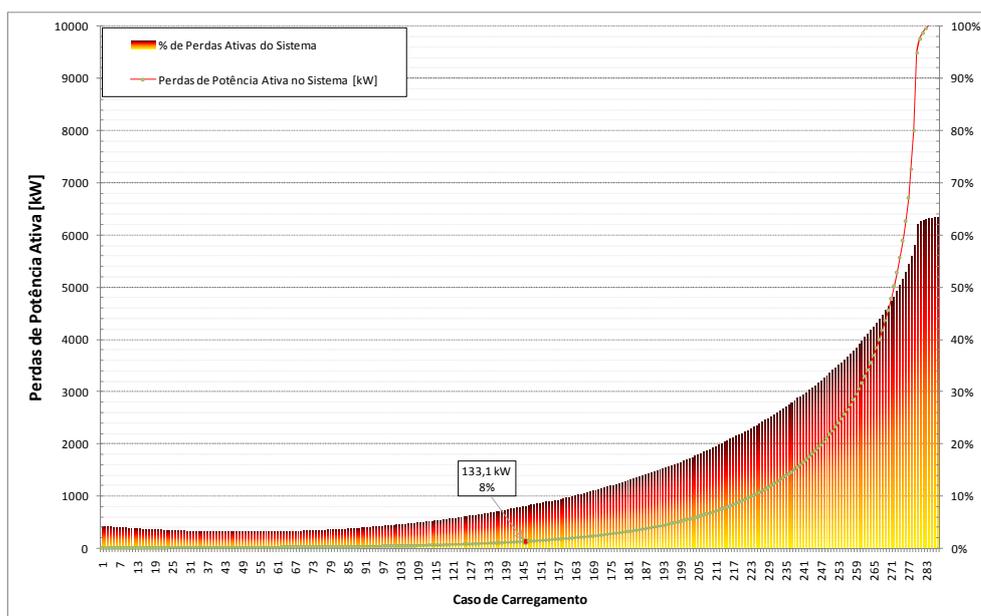


Figura 7.11 – Perdas de Potência Ativa do Sistema na simulação 2S

Próximo ao máximo carregamento, Caso 287, o sistema passa a operar na região anormal de operação. A partir do Caso 280, verificam-se diversas barras apresentando ângulo β e margem de potência negativos, como pode ser visto na Figura 7.12.

O surgimento de pontos de operação na região anormal é um indício de que o sistema está perto do ponto de máximo e o esforço para se transmitir potência da barra de geração distribuída para o sistema é cada vez maior.

Nas condições do teste, a operação do gerador distribuído seria limitada por tensão baixa e pelos aumentos de perdas, Caso 146. Problemas de estabilidade de tensão não ocorreriam, dado que pontos de operação na região anormal surgem somente a partir do Caso 280. Percebe-se que para o Caso 146, os índices mais críticos ocorrem para a barra 23 e são $M_{23} = 97,2\%$ e

$\beta_{23} = 106,4^\circ$. Percebe-se que, para o Caso 146, os índices mais críticos ocorrem para a barra 23 e são $M_{23} = 97,2\%$ e $\beta_{23} = 106,4^\circ$.

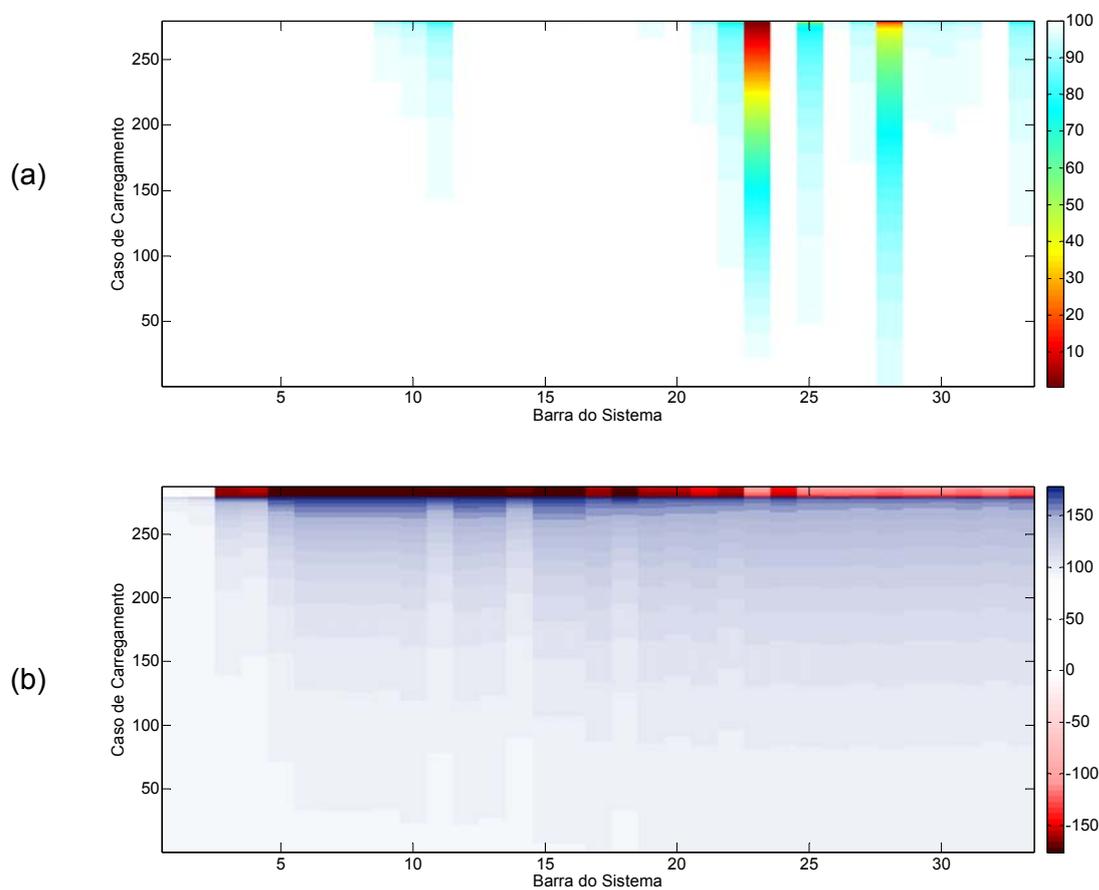


Figura 7.12 – (a) Margem de Potência e (b) Ângulo β por Barra e Caso de Carregamento

7.5

Simulação 2C - Inclusão de um Gerador Distribuído na Barra 23 com Controle de Tensão e Aumento do Carregamento do Sistema

A presente simulação tem por finalidade avaliar as condições de operação do sistema-teste frente a aumentos de seu carregamento, com fator de potência constante, supridos pelo gerador distribuído da barra 23, desta vez atuando no controle de sua tensão terminal. Assim como nas simulações anteriores, o caso-base está representado na Tabela 7.1. Para o algoritmo do fluxo de potência, a barra 0 é do tipo PV , a barra 23 é do tipo $V\theta$ e as demais barras são do tipo PQ . Para cada incremento na carga, o balanço de potência ativa do sistema é

restabelecido pelo gerador da barra 23 (100% de fator de participação) e o balanço de potência reativa será de responsabilidade dos geradores das barras 0 e 23, ambos com capacidade infinita de geração / absorção.

Na Figura 7.13, exibe-se a tensão em cada barra do sistema para cada caso de carregamento. Alguns carregamentos do sistema podem ser vistos na Tabela 7.4.

A máxima geração de potência ativa na barra 23 é de 5288,7 kW (Caso 263), tendo o sistema um carregamento de $4738,2 + j3811,4$ kVA. No entanto, considerando-se somente pontos de operação onde não há violações de tensão, a máxima geração é de 4671,3 kW e a carga do sistema correspondente é de $4500 + j3619,8$ (Caso 254), representando uma variação de 1139,7% com relação ao caso-base. Comparando-se com a Simulação 2S, obteve-se um aumento de 262% na geração de potência ativa da barra 23 e 192,9% na carga do sistema.

Tabela 7.4 – Casos de Carregamento da Simulação 2C

| Caso | Carregamento (pu) | Caso | Carregamento (pu) |
|------|-------------------|------|-------------------|
| 1 | 0,4659 | 140 | 1,8575 |
| 10 | 0,5095 | 150 | 2,0519 |
| 20 | 0,5628 | 160 | 2,2665 |
| 30 | 0,6217 | 170 | 2,5037 |
| 40 | 0,6867 | 180 | 2,7656 |
| 50 | 0,7586 | 190 | 3,0549 |
| 60 | 0,8380 | 200 | 3,3746 |
| 70 | 0,9256 | 210 | 3,7276 |
| 80 | 1,0225 | 220 | 4,1176 |
| 90 | 1,1294 | 230 | 4,5484 |
| 100 | 1,2476 | 240 | 5,0242 |
| 110 | 1,3781 | 254 | 5,7752 |
| 120 | 1,5223 | 258 | 6,0097 |
| 130 | 1,6816 | 263 | 6,0809 |

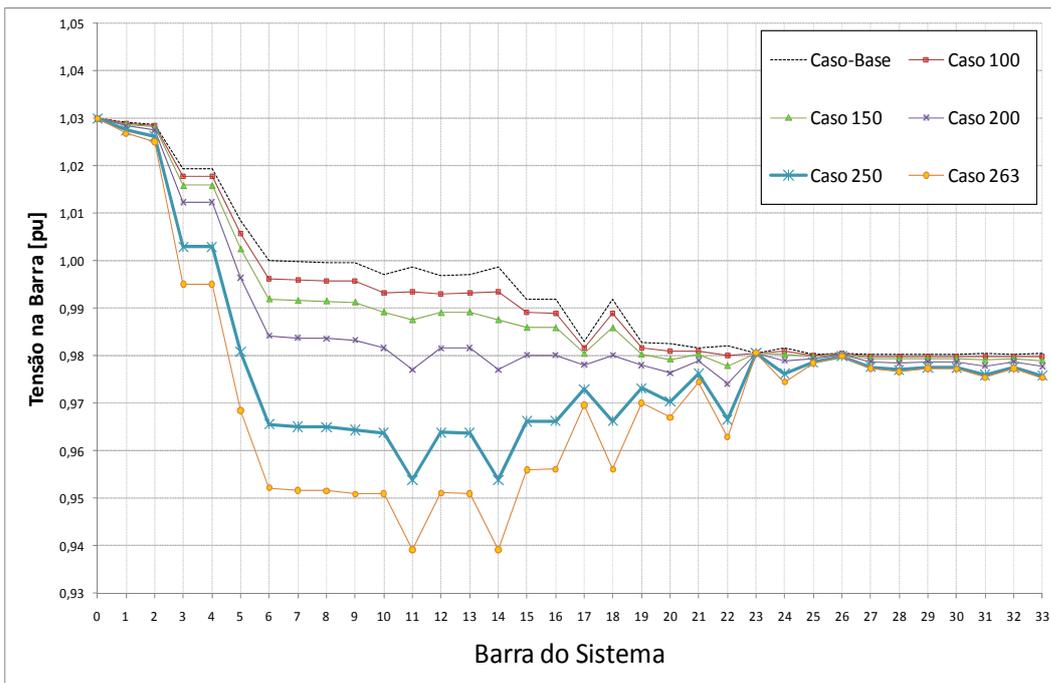


Figura 7.13 – Perfil de tensão do Sistema na Simulação 2C

Percebe-se que a tensão permanece em torno de 0,98 pu para a maioria das barras que estão próximas a barra de geração distribuída e não apresentam variação significativa para todos os níveis de carregamento. Por outro lado, embora a tensão na barra 0 também seja constante, a região compreendida entre a barra 3 e a barra 22 tem sua tensão reduzida com o aumento do carregamento. Ocorrem violações de tensão, abaixo de 0,95 pu, a partir do Caso 254.

A máxima geração de potência ativa na barra 23 é de 5288,7 kW (Caso 263), tendo o sistema um carregamento de $4738,2 + j3811,4$ kVA. No entanto, considerando-se somente pontos de operação onde não há violações de tensão, a máxima geração é de 4671,3 kW e a carga do sistema correspondente é de $4500 + j3619,8$ (Caso 254), representando uma variação de 1139,7% com relação ao caso-base. Comparando-se com a Simulação 2S, obteve-se um aumento de 262% na geração de potência ativa da barra 23 e 192,9% na carga do sistema.

Na Figura 7.14, tem-se a evolução das perdas de potência ativa no sistema, em valores absolutos e percentuais de toda geração, para cada carregamento. Considerando os pontos de operação onde não há violações de tensão, tem-se que a máxima perda de potência ativa é de 550,4 kW (Caso 254), representando

10,9% da geração do sistema e um aumento de 3320,3% com relação ao caso-base. Nos carregamentos posteriores, além de haver violações de tensão, há um aumento considerável de perdas. Do Caso 254 até o Caso 263 têm-se um incremento de carga de 5,3% e um aumento de perdas de 68,9%, terminando com 929,6 kW de perdas de potência ativa.

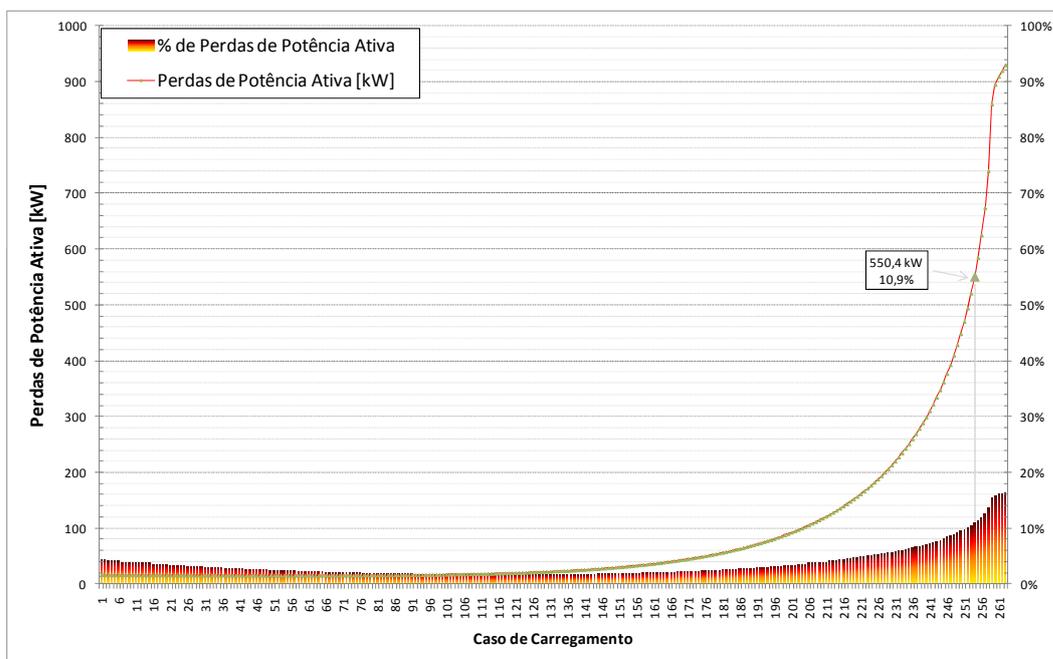


Figura 7.14 – Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 2C

Comparando-se as perdas ativas no carregamento máximo tem-se 929,6 kW na Simulação 2C (Caso 263 da Tabela 7.4) e 10.079,8 kW na Simulação 2S (Caso 287 da Tabela 7.3), representando, respectivamente, 16,4% e 62,9% de toda a geração de potência ativa do sistema. No entanto, do ponto de vista de engenharia, a região em torno do ponto de máximo é evitada. Quando se comparam as perdas relacionadas com os casos de carregamento máximo limitados pelo perfil de tensão, têm-se perdas de 550,4 kW na Simulação 2C (Caso 254 da Tabela 7.4) e 133,1 kW na Simulação 2S (Caso 146 da Tabela 7.3), representando, respectivamente, 10,9% e 8% de toda a geração de potência ativa do sistema. Portanto, no máximo carregamento limitado por tensão, o aumento das perdas máximas de potência ativa é de 313,3%. Na Tabela 7.5, as grandezas obtidas nos dois modos de operação podem ser comparadas.

Tabela 7.5 – Comparação entre as Simulações 2S e 2C

| Caso Base | | Máximo | | Lim. Tensão | | |
|--|---|--|----------------------|-------------|--------------------|---------|
| Geração: Potência Ativa 379,1 kW Potência Reativa 58,8 kvar + 240,3 kvar | | Barra 0 | Barra 23 | Barra 0 | Barra 23 | |
| Perdas: Potência Ativa 16,1 KW Potência Reativa 7,1 kvar | | | | | | |
| 2 | S | Geração de Potência Ativa [kW] | 379,1 | 15.649,2 | 379,1 | 1.290,4 |
| | | Geração de Potência Reativa [kvar] | 8.727,2 | 0,0 | 1.068,9 | 0,0 |
| | C | Geração de Potência Ativa [kW] | 379,1 | 5.288,7 | 379,1 | 4.671,3 |
| | | Geração de Potência Reativa [kvar] | 2.847,4 | 1.136,8 | 2.238,3 | 1.387,0 |
| | S | Perdas de Potência Ativa do Sistema [kW] / % | 10.079,9 kW / 62,9 % | | 133,1 kW / 8% | |
| | | Variação das Perdas de Potência Ativa com Relação ao Caso-Base | 62542,8% | | 727,4% | |
| | C | Perdas de Potência Ativa do Sistema [kW] / % | 929,6 kW / 16,4% | | 550,4 kW / 10,9% | |
| | | Variação das Perdas de Potência Ativa com Relação ao Caso-Base | 5677,0% | | 3320,3% | |
| | S | Carga Complexa [MVA] | 5.834,1 + j4.693,0 | | 1.536,4 + j1.235,9 | |
| | C | Carga Complexa [MVA] | 4.738,2 + j3.811,4 | | 4.500 + j3.619,8 | |

| | | | |
|---|---|----------|----------|
| S | Gerador da Barra 23 <u>sem</u> controle de tensão | Caso 287 | Caso 146 |
| C | Gerador da Barra 23 <u>com</u> controle de tensão | Caso 263 | Caso 254 |

Analisando-se os índices de estabilidade de tensão, exibidos na Figura 7.15, pode-se observar que não há pontos de operação na parte inferior da curva para fator de potência constante no plano SV . Portanto, não foram constatados problemas de estabilidade de tensão para esta simulação.

Comparando-se os índices de estabilidade de tensão para a barra 23, percebe-se que na Simulação 2C apresentam-se índices melhores para os pontos de operação em análise. Pode-se observar na Figura 7.15 que a menor margem de potência está em torno de 30%, enquanto que na Simulação 2S a margem é menor que 10% para os casos de carregamento próximos ao máximo (Caso 287). O ângulo β , na Simulação 2S, atingiu $139,5^\circ$ no Caso 254, $175,6^\circ$ no Caso 279, passando a exibir valores negativos do Caso 280 até o Caso 287. No pior caso da Simulação 2C, Caso 263, tem-se $\beta = 123,6^\circ$, corroborando a análise apresentada.

Para os casos onde não há violação de tensão, os índices para a barra 23, Caso 254 da Simulação 2C, são $M_{23} = 34,6\%$ e $\beta_{23} = 116,9^\circ$. No Caso 146 da Simulação 2S, os índices mais críticos que ocorrem para a barra 23 são $M_{23} = 97,2\%$ e $\beta_{23} = 106,4^\circ$. Porém, com um carregamento inferior, como pode ser observado na Tabela 7.5.

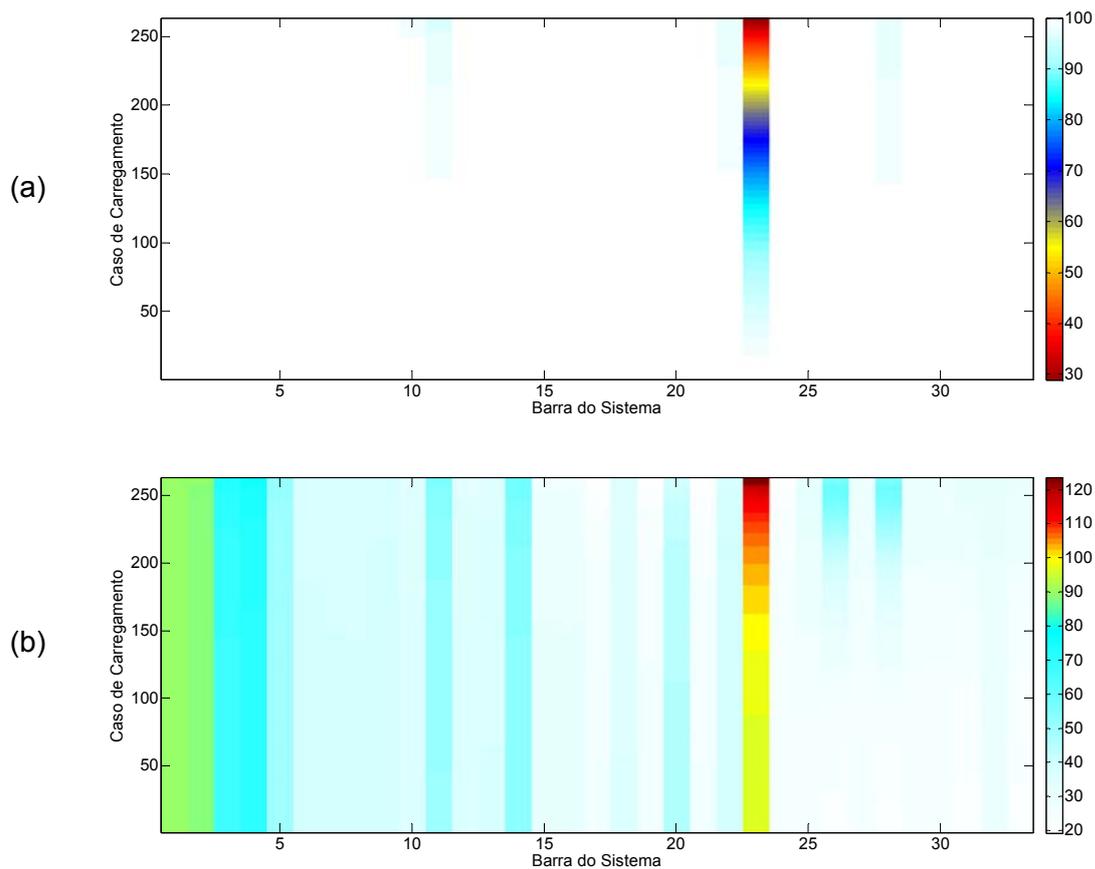


Figura 7.15 – (a) Margem de Potência e (b) Ângulo β por Barra e Caso de Carregamento

7.6

Avaliação do Impacto da Escolha da Tensão de Referência para Controle de Tensão

Os geradores do sistema com capacidade de controle de sua tensão terminal necessitam ter esta grandeza especificada. Esta simulação tem como objetivo avaliar de que forma o sistema se comporta pela variação da tensão de referência no gerador distribuído da barra 23. Assim como nos testes anteriores, são realizadas análises do perfil de tensão, geração máxima, perdas de potência ativa e estabilidade de tensão.

As configurações especificadas para esta simulação utilizam-se das mesmas premissas aplicadas à Simulação 2C. A diferença consiste em especificar diferentes valores de tensão terminal para a barra 23, dando origem a casos-

base diferentes do apresentado na Tabela 7.1 pela modificação da tensão da barra 23.

Foram realizados testes com os seguintes níveis de tensão:

$V_{23} = i$, para

$i = 0,95; 0,96; 0,97; 0,98; 0,99; 1,00; 1,01; 1,02; 1,03; 1,04; \text{ e } 1,05 \text{ pu.}$

A avaliação dos resultados, para cada valor de referência de tensão no gerador da barra 23, será concentrada na comparação dos pontos de operação correspondentes ao:

- maior caso de carregamento sem que haja violação de tensão, e
- máximo carregamento obtido, antes do algoritmo de fluxo de potência deixar de encontrar solução.

A avaliação do perfil de tensão foi realizada a partir da Figura 7.16, onde se pode observar o gráfico com pontos de operação limitados por tensão e o gráfico com tensões relativas ao último ponto de operação para qual o fluxo de potência encontrou solução. A avaliação do perfil de tensão para $V_{23} = 0,95 \text{ pu}$ revela violações de tensão em todos os casos de carregamento, inclusive no seu caso-base. Portanto, seus resultados não serão exibidos nas análises.

Pode-se verificar, em ambos os gráficos, que ao se aumentar o valor de V_{23} , o perfil de tensão aumenta em todo o sistema.

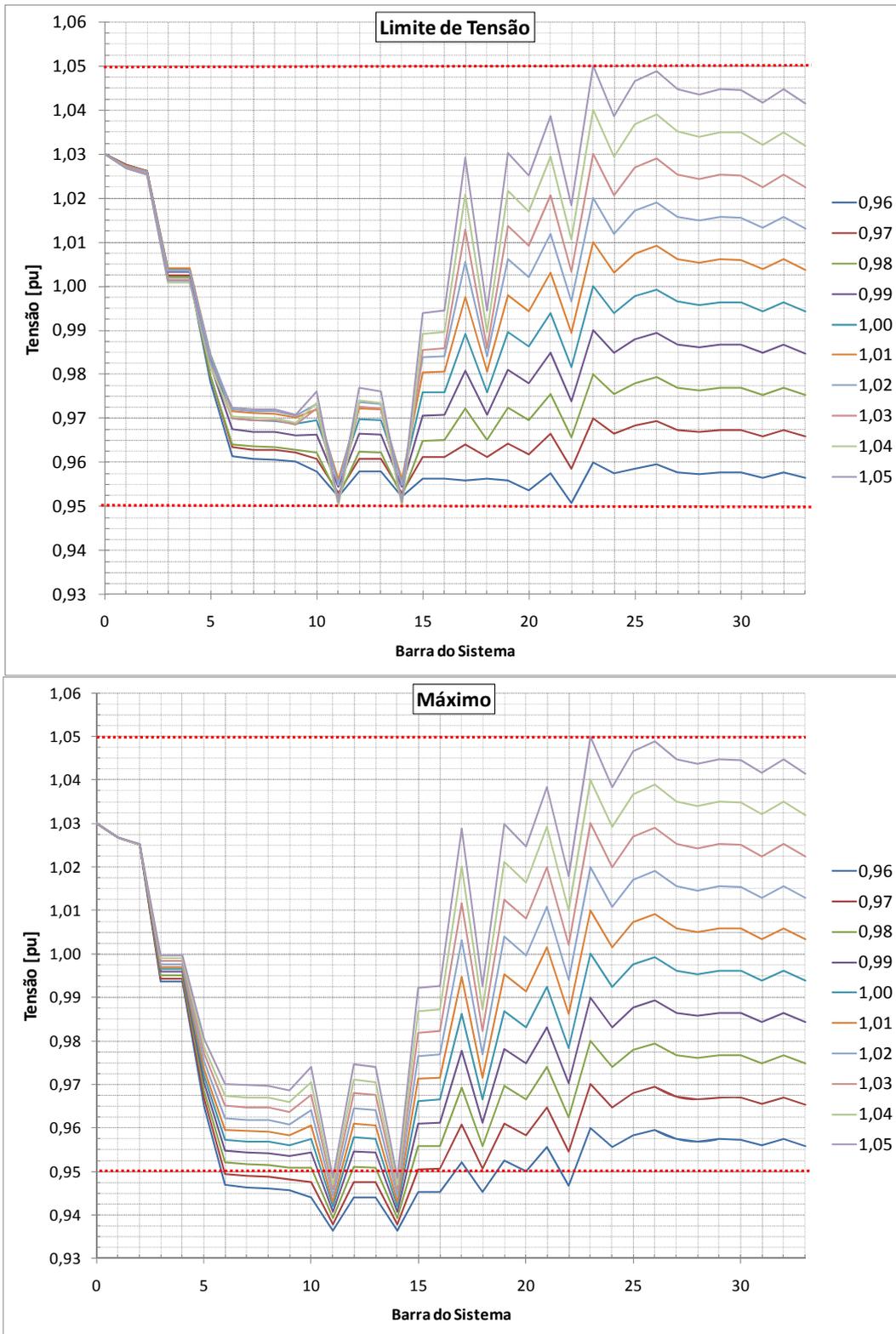


Figura 7.16 – Perfil de Tensão do Sistema para Diferentes Valores de Tensão Terminal

A máxima carga que pode ser alimentada pelo sistema aumenta com o valor de V_{23} , como pode ser observado na Figura 7.17, que apresenta a carga do sistema

para cada carregamento até onde não é possível obter pontos de operação convergentes.

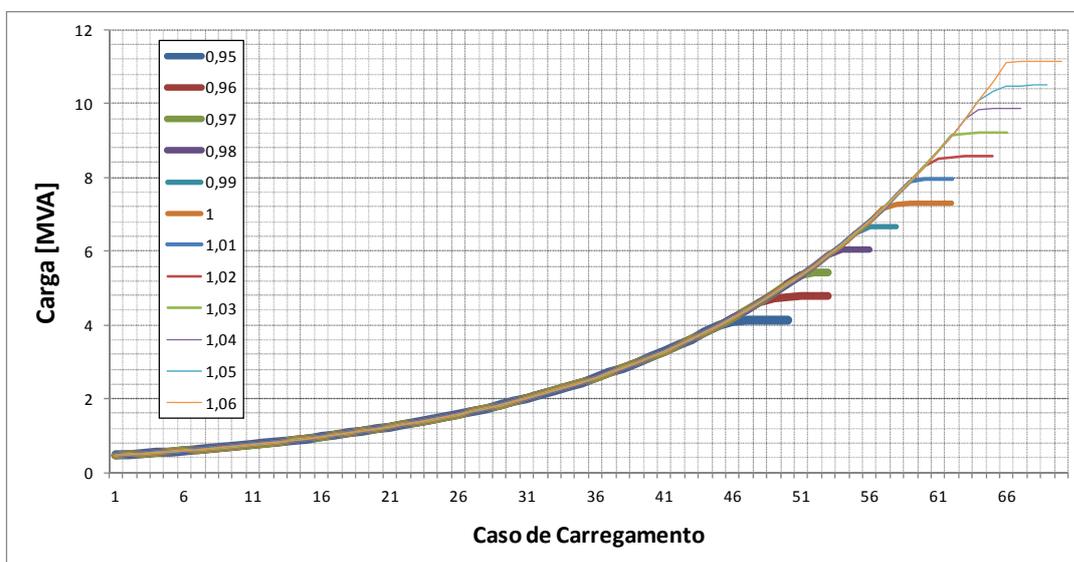


Figura 7.17 - Máxima Carga para Diferentes Valores de Tensão Terminal

Tabela 7.6 – Carga Máxima para Diferentes Valores de Tensão Terminal

| V [pu] | Carga Máxima | | | | | Carga Máxima com Limite de Tensão | | | | |
|--------|--------------|----------|---------|----------|----------------|-----------------------------------|----------|---------|----------|----------------|
| | P [MW] | Q [Mvar] | S [MVA] | Variação | Variação Acum. | P [MW] | Q [Mvar] | S [MVA] | Variação | Variação Acum. |
| 0,95 | 3,2325 | 2,6003 | 4,1486 | | | | | | | |
| 0,96 | 3,7240 | 2,9956 | 4,7793 | 15,2% | 15,2% | 3,2616 | 2,6236 | 4,1858 | | |
| 0,97 | 4,2163 | 3,3917 | 5,4112 | 13,2% | 30,4% | 3,7757 | 3,0372 | 4,8456 | 15,8% | 15,8% |
| 0,98 | 4,7096 | 3,7884 | 6,0442 | 11,7% | 45,7% | 4,3708 | 3,5159 | 5,6094 | 0,1576 | 0,3401 |
| 0,99 | 5,2035 | 4,1857 | 6,6780 | 10,5% | 61,0% | 4,8188 | 3,8763 | 6,1844 | 10,2% | 47,7% |
| 1 | 5,6990 | 4,5843 | 7,3139 | 9,5% | 76,3% | 5,3127 | 4,2736 | 6,8183 | 0,1025 | 0,6289 |
| 1,01 | 6,1958 | 4,9840 | 7,9516 | 8,7% | 91,7% | 5,8573 | 4,7116 | 7,5171 | 10,2% | 79,6% |
| 1,02 | 6,6930 | 5,3839 | 8,5897 | 8,0% | 107,1% | 6,4577 | 5,1946 | 8,2877 | 0,1025 | 0,9799 |
| 1,03 | 7,1907 | 5,7842 | 9,2284 | 7,4% | 122,4% | 7,1196 | 5,7270 | 9,1371 | 10,3% | 118,3% |
| 1,04 | 7,6909 | 6,1866 | 9,8704 | 7,0% | 137,9% | 7,6624 | 6,1637 | 9,8338 | 0,0762 | 1,3493 |
| 1,05 | 8,1907 | 6,5887 | 10,5119 | 6,5% | 153,4% | 8,1716 | 6,5733 | 10,4873 | 6,6% | 150,5% |

fator de potência = 0,7792 ind

Na Tabela 7.6, observam-se os valores das cargas máximas para cada valor de tensão terminal: para o último caso de carregamento limitado por tensão e o último caso onde o fluxo de potência converge. Pode-se observar que o carregamento máximo aumenta com o valor da tensão de referência. Além disso, tem-se que, para cada acréscimo de 0,01 pu na tensão terminal, a carga

aumenta em 15%, em média, com relação à carga que pode ser alimentada com $V_{23} = 0,95 pu$.

Vale salientar que, para aumentar o valor da tensão terminal e manter seu valor dentro do especificado pelo controlador, necessita-se de certo suporte de potência reativa. Pode-se observar na Figura 7.18 como a geração de potência reativa da barra 23 aumenta para cada valor de tensão constante.

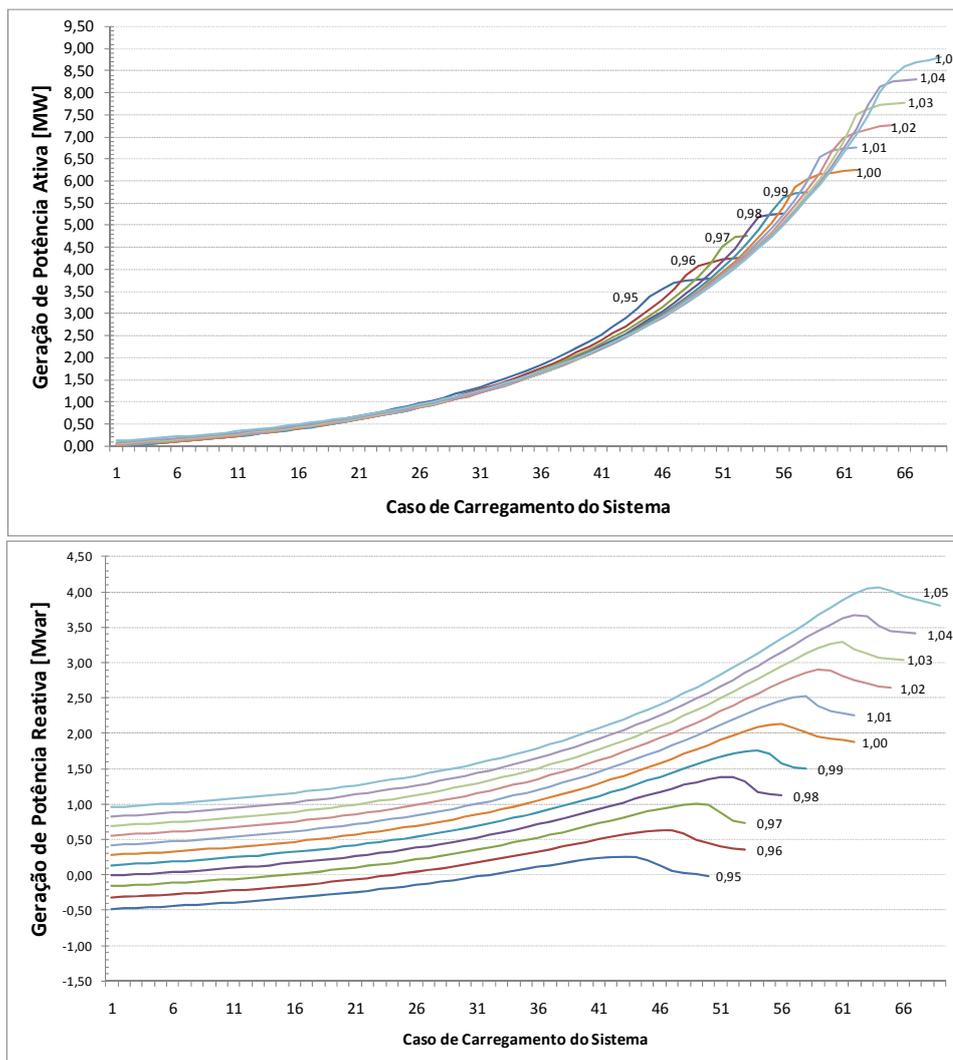


Figura 7.18 – Geração na Barra 23 para Diferentes Valores de Tensão Terminal

As perdas de potência ativa também aumentam ao se elevar o valor da tensão terminal devido ao maior carregamento, como pode ser observado na Figura 7.19 que exhibe os valores das perdas de potência ativa para cada valor de tensão. Percebe-se que há uma redução nas perdas percentuais do sistema para os pontos de máximo a cada aumento de 0,01 pu na tensão. Para os

pontos limitados pela tensão há redução do percentual para uma faixa de valores de tensão terminal que vai até $V_{23} = 1,01 pu$.

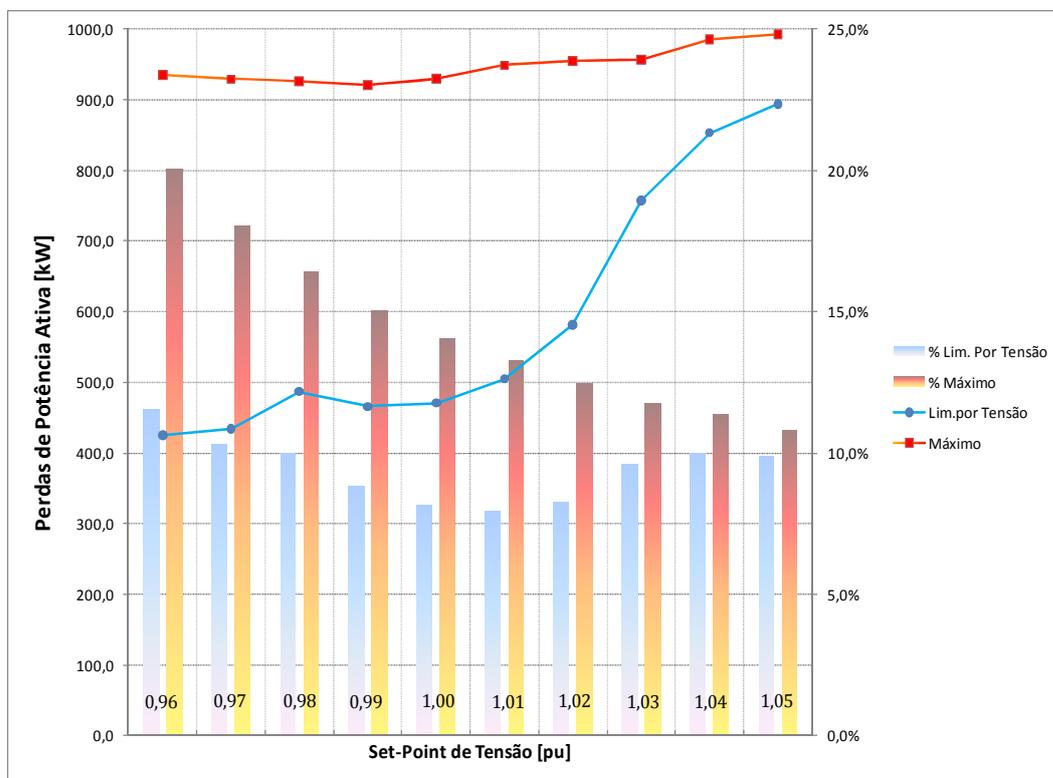


Figura 7.19 – Perdas de Potência Ativa para Diferentes Valores de Tensão Terminal

Na Tabela 7.7, pode-se observar a avaliação dos índices de estabilidade de tensão. Para a barra 23, pode-se observar a evolução da máxima potência gerada com limite de tensão e sem limite. Percebe-se que a geração aumenta com a tensão terminal, se aproximando cada vez mais do ponto de máximo como identifica a redução na margem de potência e elevação no ângulo β . Contudo, problemas de estabilidade de tensão não ocorrem para os pontos de operação em análise.

Tabela 7.7 – Índices de Estabilidade de Tensão para a Barra 23

| | Caso | Barra | Numero-Nome | Tensao | Equip | Tipo | Sinj | Smax | Beta | Margem% |
|--------|------|-------|--------------|--------|-------|------|-------|------|-------|---------|
| Máximo | 50 | 24 | Barra---0023 | 0,95 | GL | 1 | 3,796 | 6,2 | 127,4 | 39 |
| | 53 | 24 | Barra---0023 | 0,96 | GL | 1 | 4,281 | 6,6 | 126,2 | 35,3 |
| | 53 | 24 | Barra---0023 | 0,97 | GL | 1 | 4,787 | 7 | 124,9 | 32,1 |
| | 56 | 24 | Barra---0023 | 0,98 | GL | 1 | 5,316 | 7,5 | 123,6 | 29,1 |
| | 58 | 24 | Barra---0023 | 0,99 | GL | 1 | 5,858 | 8 | 122,3 | 26,6 |
| | 62 | 24 | Barra---0023 | 1 | GL | 1 | 6,424 | 8,5 | 121,2 | 24,2 |
| | 62 | 24 | Barra---0023 | 1,01 | GL | 1 | 7,007 | 9 | 120,4 | 22,1 |
| | 65 | 24 | Barra---0023 | 1,02 | GL | 1 | 7,588 | 9,5 | 119,3 | 20,3 |
| | 66 | 24 | Barra---0023 | 1,03 | GL | 1 | 8,172 | 10,1 | 118,1 | 18,8 |
| | 67 | 24 | Barra---0023 | 1,04 | GL | 1 | 8,781 | 10,6 | 117,3 | 17,4 |
| | 69 | 24 | Barra---0023 | 1,05 | GL | 1 | 9,381 | 11,2 | 116,3 | 16,2 |

| | Caso | Barra | Numero-Nome | Tensao | Equip | Tipo | Sinj | Smax | Beta | Margem% |
|-----------------|------|-------|--------------|--------|-------|------|-------|------|-------|---------|
| Lim. Por Tensão | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | 46 | 24 | Barra---0023 | 0,96 | GL | 1 | 3,332 | 6,3 | 116,5 | 47,4 |
| | 49 | 24 | Barra---0023 | 0,97 | GL | 1 | 3,902 | 6,7 | 115,6 | 42,1 |
| | 52 | 24 | Barra---0023 | 0,98 | GL | 1 | 4,607 | 7,2 | 115,6 | 36,4 |
| | 54 | 24 | Barra---0023 | 0,99 | GL | 1 | 5,109 | 7,7 | 114,1 | 33,4 |
| | 56 | 24 | Barra---0023 | 1 | GL | 1 | 5,688 | 8,1 | 113,1 | 30,2 |
| | 58 | 24 | Barra---0023 | 1,01 | GL | 1 | 6,346 | 8,7 | 112,7 | 27 |
| | 60 | 24 | Barra---0023 | 1,02 | GL | 1 | 7,093 | 9,3 | 113 | 23,7 |
| | 62 | 24 | Barra---0023 | 1,03 | GL | 1 | 7,969 | 10 | 115 | 20,2 |
| | 64 | 24 | Barra---0023 | 1,04 | GL | 1 | 8,669 | 10,6 | 115,3 | 18,1 |
| | 67 | 24 | Barra---0023 | 1,05 | GL | 1 | 9,302 | 11,2 | 114,8 | 16,7 |

7.7

Conclusões

Nas duas primeiras simulações, o carregamento do sistema é mantido constante e a geração de potência que vinha da subestação é gradualmente substituída pelo gerador distribuído, inserido na barra 23, até que a geração de potência ativa na subestação seja nula. Obtiveram-se resultados diferentes para as configurações sem e com controle de tensão no gerador inserido, respectivamente, designadas Simulação 1S e Simulação 1C.

Na Simulação 1S, verificou-se aumento de tensão para permitir aumento de geração de potência ativa. Observou-se, também, redução nas perdas, como era de se esperar ao se transferir a geração para mais próximo das cargas. Na Simulação 1C, verificaram-se tensões estáveis em torno dos valores do caso-base e aumento de 901% das perdas com relação ao caso-base, enquanto que,

na Simulação 1S, as perdas quase foram anuladas ao final da simulação. Em ambas as simulações, não se observam problemas de estabilidade de tensão, contudo na Simulação 1C verificou-se índices piores. Portanto, pode-se concluir que é inadequado equipar o gerador distribuído da barra 23 com controle de tensão, nesta situação.

Nos dois testes seguintes, o carregamento do sistema é aumentado e a geração necessária é provida pelo gerador distribuído. O gerador distribuído foi modelado sem e com controle de tensão e as simulações foram designadas de Simulação 2S e Simulação 2C, respectivamente. Na Tabela 7.5, pode-se observar algumas comparações.

Nos resultados da Simulação 2S, verificam-se violações de tensão e aumento crescente das perdas de potência ativa para incrementos de carga a partir do Caso 146, resultando na impossibilidade de operação do ponto de vista de engenharia. Portanto, a geração de potência ativa máxima da barra 23, sem violações de tensão, foi de 1290,4 kW e a carga do sistema neste ponto de operação foi de 1536,4 + j1235,9 kVA, um aumento de 323,3% com relação ao caso-base.

Na Simulação 2C, podem-se observar valores de tensão em torno dos valores do caso-base, exceto para uma faixa de valores, a partir do Caso 254, onde há violações de tensão abaixo de 0,95 pu em determinadas barras. A máxima potência atingida foi maior na Simulação 2C. Quando se consideram pontos de operação onde não há violações de tensão, a geração de potência ativa máxima do gerador da barra 23 foi de 4671,3 kW e carga do sistema de 4500 + j3619,8 (Caso 254), uma variação de 1139,7% com relação ao caso-base. Comparando-se com a Simulação 2S, obteve-se um aumento de 262% na geração de potência ativa da barra 23 e 192,9% na carga do sistema. As perdas no sistema também aumentaram, mas de forma aceitável.

Em ambas as simulações, não há problemas de estabilidade de tensão na região de operação onde não há violações nas tensões e as perdas são aceitáveis. Problemas de estabilidade de tensão apareceram na Simulação 2S, mas em pontos de operação com tensões violadas. Verificaram-se índices de estabilidade de tensão melhores para os pontos de operação da Simulação 2C,

mesmo com um carregamento do sistema maior, corroborando com a análise do perfil de tensão, máxima potência e perdas.

Finalmente, avaliou-se a influência do valor de tensão terminal do gerador da barra 23 para as grandezas avaliadas no sistema. Constatou-se que ao elevar o set-point de tensão, aumenta-se a carga máxima que pode ser alimentada. A potência reativa gerada na barra 23 também aumentou para atender a necessidade de se manter a tensão controlada, o que implica em maiores custos de investimento em equipamentos com potência nominal maior. Houve aumento de perdas em kW absolutos, mas em porcentual do total gerado houve redução para uma faixa de valores de tensão terminal na barra 23. Além disso, foram avaliados os índices de estabilidade de tensão para a barra 23. Problemas de estabilidade de tensão não foram encontrados, mas constatou-se que ao elevar a tensão terminal, injeta-se mais potência no sistema e, conseqüentemente, há deterioração nos índices de estabilidade de tensão.