

MÁXIMA PENETRAÇÃO FOTOVOLTAICA E REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

B R Baroni – brunobrandazzo@gmail.com

Wadaed Uturbey – wadaed@cpdee.ufmg.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. *A faixa admissível de tensão da rede é uma das restrições mais rigorosas para a penetração de geradores fotovoltaicos, em especial quando conectados às redes de baixa tensão. Os limites de tensão geralmente são cumpridos por reforços da rede, por meio de limitação de geração dos sistemas fotovoltaicos ou através de consumo de potência reativa. Uma maneira prática e rápida de determinar a quantidade máxima de potência ativa que pode ser injetada na rede por um sistema fotovoltaico, sem que os limites de operação sejam violados, é usando a matriz de sensibilidade. Isso significa baixo custo computacional e ações de controle rápidas para o operador do sistema. Portanto, muitos estudos usaram a análise de sensibilidade para manter o sistema elétrico dentro dos limites normais de operação. Este trabalho analisa os erros obtidos para o cálculo da máxima penetração de geradores fotovoltaicos e os erros no cálculo da potência reativa necessária para a regulação de tensão, utilizando a matriz de sensibilidade em sistemas de distribuição em diferentes cenários e diferentes relações (R/X) das redes de distribuição.*

Palavras-chave: *Máxima Penetração, Regulação de Tensão, Matriz de Sensibilidade.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o segmento de distribuição de energia elétrica enfrenta grandes desafios, devido ao aumento dos recursos energéticos distribuídos e aos impactos na qualidade da energia na carga. Os recursos energéticos distribuídos envolvem um grande número de tecnologias de geração e armazenamento de energia, que estão conectadas às redes de distribuição de média e baixa tensão. É dada especial atenção à conexão de geração fotovoltaica (PV), que está crescendo de forma acelerada principalmente nos sistemas de baixa tensão. A viabilidade de pequenos bairros em áreas urbanas baseados em energia solar foi demonstrada em (P. McNutt, 2009) e (S. Cobben, 2008).

A tecnologia PV apresenta problemas associados ao fluxo reverso de energia, controle de tensão e ilhamento. Para uma operação adequada do sistema, pode ser necessário monitorar cada curto intervalo de tempo devido à constante variabilidade da irradiação solar (Bollen, 2005) e (Tonkoski, 2011).

Existe um limite para a geração PV que pode ser instalado no sistema elétrico devido aos seus impactos, como sobretensões (Tonkoski, 2008). Esses limites são influenciados pelo perfil da tensão original dos sistemas, por exemplo, um barramento com carga leve possui um limite de penetração PV menor. O limiar de penetração também depende da localização dos geradores fotovoltaicos em relação ao alimentador. Em alimentadores radiais a máxima potência PV permitida diminui à medida que a distância entre a fonte fotovoltaica aumenta em relação à subestação, uma vez que a impedância também aumenta (Engler, 2005), (Uturbey, 2014), (Xu, 2008).

Em redes de baixa tensão, esta é fortemente relacionada com a potência ativa, sendo comum controlar a sobretensão através da redução da geração PV. Determinar a quantidade máxima de potência PV que pode ser gerada é muito importante para manter a tensão dentro dos limites operacionais. Uma maneira prática e rápida de determinar a máxima geração PV sem que os limites operacionais sejam violados é utilizando a matriz de sensibilidade. Na prática, isso significa baixo custo computacional e ações de controle rápidas para o operador do sistema.

A matriz de sensibilidade permite quantificar a variação das magnitudes de tensão ($|V|$) e ângulos (θ) em relação à potência ativa e reativa. Vários estudos a utilizaram para controlar a geração PV e para regular a tensão, a fim de atingir os limites operacionais da rede.

Em (Tonkoski, 2011) é discutido o uso de redução de potência ativa (APC) para prevenção de sobretensão em alimentadores de baixa tensão com alta penetração de sistemas PV, usando a matriz de sensibilidade, considerando que os geradores produzem aproximadamente a mesma quantidade de energia independentemente da sua localização. Os geradores perto da subestação produzem menos energia do que sua capacidade, para que os geradores longe da subestação possam produzir mais.

Além do APC, outra maneira de controlar a sobretensão é através do consumo de potência reativa. Em (Demirok, 2010) é avaliado o impacto da variação da potência ativa e reativa em sistemas de distribuição de baixa tensão, as matrizes de sensibilidade PV e QV são comparadas entre si para uma rede específica para determinar qual parâmetro de entrada do sistema (P ou Q) tem impacto dominante na tensão da rede, para otimizar o controle de tensão.

O fluxo reverso de energia e o aumento da tensão devido à alta penetração de energia PV levaram os códigos de rede a exigir uma dependência entre a potência ativa e a potência reativa fornecida pelos inversores dos sistemas PV. No código de rede alemão, a potência reativa a ser fornecida é determinada com base na potência ativa local de cada sistema PV, sem levar em conta outros sistemas PV ou configurações de rede, o que pode aumentar as perdas devido ao excesso de potência fornecida (Demirok, 2010). Assim, em (Samadi, 2014) é utilizada a matriz de sensibilidade de tensão e a análise quase-estática, a fim de desenvolver de forma local e sistemática uma característica coordenada para cada sistema fotovoltaico ao longo de um alimentador. Este método determina a potência reativa a ser fornecida para o controle de tensão, com base na magnitude e frequência da tensão.

Da mesma forma, em (Weckx, 2016) os fatores da matriz de sensibilidade de tensão são usados para propor um método para definir a curva Q(P) ideal que mantem a matriz dentro dos limites. Em (Weckx, 2015), propõe-se um algoritmo com baixa complexidade que pode obter os fatores de sensibilidade de tensão e usando um modelo de fluxo de carga linear baseado em dados históricos de medidores inteligentes. Em (Tamp, 2014), os dados de sensibilidade são obtidos através de um algoritmo único de "perturba e observa", construído em cima de um pacote de simulação de código aberto, para linearizar as condições de restrição em problemas de otimização, de modo que possa ser resolvido de forma rápida e fácil.

A análise de sensibilidade reduz as equações de rede complexas com equações lineares simples e, portanto, permite uma conceituação fácil e abrangente do efeito das modificações na rede. Este trabalho analisa os erros obtidos para o cálculo da máxima penetração PV e para regulação de tensão, utilizando a matriz de sensibilidade em sistemas radiais de distribuição. São considerados diferentes cenários, com carga pesada/carga leve e geração PV ou consumo de reativo em diferentes barramentos, para diferentes relações (R/X) da rede. Desta forma, a seção 2 apresenta o sistema em estudo, a matriz de sensibilidade é introduzida e é apresentada a metodologia utilizada para calcular a máxima penetração e a regulação de tensão. A seção 3 mostra os resultados obtidos e as conclusões são apresentadas na seção 4.

2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Redes residenciais com sistemas PV apresentam alto risco de sobretensão, uma vez que, o perfil de carga típico dos alimentadores apresenta um valor máximo durante a noite, quando há pouca ou nenhuma geração PV. Por outro lado, durante o dia quando a carga é relativamente baixa tem-se picos de geração PV, levando ao fluxo reverso de energia no alimentador e consequentemente sobretensão.

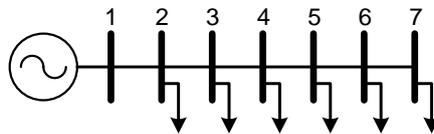


Figura 1 - Sistema radial com 7 barras

O estudo proposto será realizado com o alimentador radial de 7 barramentos mostrado na Fig. 1. O barramento 1 é a subestação (barra *slack*) onde a magnitude da tensão pode ser controlada por meio dos *taps* do transformador. A resistência de um ramo é igual a 0,02 p.u., o que representa aproximadamente um alimentador de 150 metros. Na análise, a relação resistência-reatância da impedância da linha varia entre 0,5 e 5 para representar alimentadores de baixa e média tensão (Tonkoski, 2008) e (Engler, 2005).

2.1 Sensibilidade de tensão a potência ativa e reativa

A matriz de sensibilidade quantifica a relação das magnitudes de tensão ($|V|$) e ângulos (θ) em relação a potência ativa e reativa. É obtida através de derivadas parciais das equações do fluxo de carga da seguinte forma, Eq. (1), (Tonkoski, 2008):

$$S_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & |V| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{d\delta}{dP} & \frac{d\delta}{dQ} \\ \frac{dV}{dP} & \frac{dV}{dQ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A análise da matriz de sensibilidade de primeira ordem é utilizada neste trabalho para obter uma medida quantitativa do impacto da variação da potência ativa e reativa na variação da magnitude da tensão nos nós do alimentador de distribuição radial. A análise é feita variando a relação ($k=R/X$) dos ramos do alimentador.

A matriz de sensibilidade de tensão na Eq. (1) é composta por 4 sub-matrizes (SV_{nm} , $m=1,2$ e $n=1,2$) com derivadas parciais que retratam a variação na magnitude e ângulo de tensão devido a variações na potência ativa e reativa em cada barramento. A sub-matriz SV_{21} é usada para avaliar a variação da tensão em função da variação na potência ativa e a sub-matriz SV_{22} expressa a variação da tensão para variação na potência reativa. O sinal de cada

elemento indica se a potência ativa (P) ou a potência reativa (Q) devem gerar um aumento ou queda da tensão. O significado de cada elemento nessas matrizes secundárias deve ser interpretado como a variação que aconteceria no perfil de tensão em um determinado barramento no caso de injeção de 1 p.u. de potência ativa para SV₂₁ ou 1 p.u. de potência reativa para SV₂₂ em um determinado ponto de operação. Assim, estas matrizes fornecem a quantidade de potência que seria necessária para regular a tensão a um certo valor (Tonkoski, 2008).

2.2 Fluxo de carga

A potência máxima gerada pelo sistema PV depende da localização dos geradores e da relação entre geração e consumo. Para um determinado local, o ponto crítico de sobretensão ocorre quando a razão geração/carga é máxima. A sensibilidade da tensão às variações de potência ativas e reativa em cada barramento podem ser derivadas para qualquer rede pela solução do fluxo de carga.

O fluxo de carga é resolvido usando a Eq.(2) e Eq. (3) não lineares, e usando a técnica iterativa do método de Newton-Raphson. A matriz jacobiana do sistema é atualizada em cada iteração e, finalmente, as matrizes de sensibilidade de tensão ($\Delta V/\Delta P$), ($\Delta V/\Delta Q$) são calculadas (Saadet, 1999). A Fig. 2 mostra o modelo de rede utilizado.

$$P_k(\bar{\theta}, \bar{V}) = V_k \cdot \left[\sum_{m \in \Omega_k} V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \right] \quad (2)$$

$$Q_k(\bar{\theta}, \bar{V}) = V_k \cdot \left[\sum_{m \in \Omega_k} V_m (g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km}) \right] \quad (3)$$

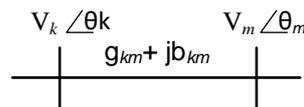


Figura 2 - Solução do fluxo de carga

Um modelo de alimentador radial com 7 barras, Fig. 1, é utilizado para analisar a sensibilidade de tensão às variações de potência ativa e reativa. A referência (Tonkoski, 2008) foi utilizada como exemplo para os dados típicos de rede. Além disso, a tensão na barra *slack* é considerada 1,0 p.u. Para uma carga com potência ativa de 0,0714 e potência reativa de 0,00714 em cada barramento e relação (R/X=1,0), as seguintes matrizes de sensibilidade de tensão (SV₂₁) e (SV₂₂) são obtidas nas Eq. (4) e Eq. (5) respectivamente:

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta P_j} = \begin{bmatrix} 0.0206 & 0.0212 & 0.0217 & 0.0221 & 0.0223 & 0.0225 \\ 0.0207 & 0.0421 & 0.0431 & 0.0438 & 0.0444 & 0.0446 \\ 0.0209 & 0.0423 & 0.0641 & 0.0653 & 0.0661 & 0.0664 \\ 0.0210 & 0.0426 & 0.0644 & 0.0864 & 0.0874 & 0.0880 \\ 0.0211 & 0.0427 & 0.0647 & 0.0867 & 0.1085 & 0.1092 \\ 0.0211 & 0.0428 & 0.0648 & 0.0868 & 0.1087 & 0.1302 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta Q_j} = \begin{bmatrix} 0.0203 & 0.0203 & 0.0204 & 0.0204 & 0.0205 & 0.0205 \\ 0.0204 & 0.0409 & 0.0410 & 0.0411 & 0.0412 & 0.0412 \\ 0.0206 & 0.0412 & 0.0618 & 0.0620 & 0.0621 & 0.0621 \\ 0.0207 & 0.0414 & 0.0622 & 0.0829 & 0.0830 & 0.0831 \\ 0.0207 & 0.0415 & 0.0624 & 0.0832 & 0.1040 & 0.1041 \\ 0.0208 & 0.0416 & 0.0625 & 0.0833 & 0.1042 & 0.1249 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde $i=1,2,..6$ e $j=1,2,..6$

O significado de cada elemento nestas sub-matrizes deve ser interpretado como a variação que aconteceria no perfil de tensão em um determinado barramento (i) no caso de uma variação hipotética de 1-p.u. na injeção de potência ativa ou reativa no barramento (j). Os sinais positivos de todos os elementos indicam que a potência injetada é diretamente proporcional às tensões dos barramentos.

2.2 Determinação da máxima penetração fotovoltaica

Esta seção descreve o cálculo para a máxima penetração PV para o sistema mostrado na Fig. 1, usando a matriz de sensibilidade. A variação de tensão no último barramento, devido a injeções de potência ativa é dada pela Eq. (6).

$$\Delta V = \Delta P_1 \times \frac{\Delta V_6}{\Delta P_1} + \Delta P_2 \times \frac{\Delta V_6}{\Delta P_2} + \dots + \Delta P_6 \times \frac{\Delta V_6}{\Delta P_6} \quad (6)$$

onde (ΔV) é dado pela diferença entre a tensão máxima permitida e a tensão atual no último barramento, sem geração. Neste trabalho, a máxima tensão permitida foi considerada igual a 1,05 p.u. e a tensão no último barramento é obtida através do fluxo de carga. Considerando que todos os barramentos injetam a mesma potência, a injeção de potência ativa que eleva a tensão no último barramento para um valor especificado é dada pela Eq. (7).

$$\Delta P = \frac{\Delta V}{\sum_{j=1,2,..,6} \frac{\Delta V_6}{\Delta P_j}} \quad (7)$$

Considerando ainda que apenas o último barramento está injetando potência, a Eq. (7) pode ser simplificada pela Eq. (8)

$$\Delta P = \frac{\Delta V}{\frac{\Delta V_6}{\Delta P_6}} \quad (8)$$

2.3 Determinação do consumo de reativo para regulação de tensão

Esta seção descreve a metodologia para o cálculo da potência reativa consumida pelo sistema PV para que a tensão no último barramento seja 1,0 p.u., utilizando a matriz de sensibilidade. A variação de tensão no último barramento devido a injeção de potência reativa, é dada pela Eq. (9)

$$\Delta V = \Delta Q_1 \times \frac{\Delta V_6}{\Delta Q_1} + \Delta Q_2 \times \frac{\Delta V_6}{\Delta Q_2} + \dots + \Delta Q_6 \times \frac{\Delta V_6}{\Delta Q_6} \quad (9)$$

onde (ΔV) é dado pela diferença entre a tensão no último barramento com sobretensão (1,1 p.u.) e a tensão desejada (1,0 p.u.). Considerando que todos os barramentos consomem a mesma potência, o consumo de potência reativa que abaixa a tensão no último barramento para 1,0 p.u. é dado pela Eq. (10)

$$\Delta Q = \frac{0,1}{\sum_{j=1,2,..,6} \frac{\Delta V_6}{\Delta Q_j}} \quad (10)$$

Considerando ainda que apenas o último barramento está consumindo potência reativa, a Eq. (10) pode ser simplificada pela Eq. (11)

$$\Delta Q = \frac{0,1}{\frac{\Delta V_6}{\Delta Q_6}} \quad (11)$$

O erro na potência é dado pela diferença entre o ΔP ou ΔQ calculado através da matriz de sensibilidade e o ΔP ou ΔQ real. Da mesma forma, o erro na tensão é a diferença entre a tensão obtida através do ΔP ou ΔQ e a tensão objetivo.

3. RESULTADOS

Para avaliar os erros na potência e na tensão obtidos no cálculo da máxima penetração PV e na regulação de tensão, utilizando a matriz de sensibilidade, foram feitas simulações do fluxo de carga no MatLab. A topologia de rede utilizada é descrita na Seção 2. A máxima penetração é calculada para que a tensão no último barramento seja igual a 1,05 p.u., e a regulação de tensão para que a tensão no último barramento seja 1,0 p.u., a resistência (R) e a reatância (X) entre dois barramentos são descritas para cada caso, bem como a carga ativa (PL) e a carga reativa (QL) em cada barramento.

3.1.1 Geração fotovoltaica em todos os barramentos – carga leve

O primeiro estudo de caso considera o alimentador com carga leve, pequena queda de tensão nos barramentos, em que todos apresentam a mesma geração PV. Para o cálculo da máxima potência a ser injetada nos barramentos com o intuito de que a tensão na última barra seja de 1,05 p.u. a Eq. (7) é usada. Neste caso, é necessário usar todos os elementos da última linha da matriz de sensibilidade. Por exemplo, quando ($k=1$) é utilizada a última linha e todas as colunas da matriz da Eq. (4) e a geração é fornecida por:

$$\Delta P = \frac{(1,05 - 0,9658)}{(0,0211 + 0,0428 + 0,0648 + 0,0868 + 0,1087 + 0,1302)} = 0,1845$$

No entanto, ao calcular o fluxo de carga com esta potência PV injetada, a tensão no último barramento é 1,0425, correspondendo a um erro de 8,90% na tensão.

$$Erro_{Tensão} = \frac{|1,05 - 1,0425|}{|1,05 - 0,9658|} \times 100 = 8,90\%$$

A geração necessária para que a tensão no último barramento seja 1,05 é 0,2053, correspondendo a um erro de 9,69% na potência.

$$Erro_{Potência} = \frac{|0,2053 - 0,1854|}{0,2053} \times 100 = 9,69\%$$

A Fig. 3 mostra a tensão nos barramentos sem geração PV (linha tracejada) e com geração (linha contínua), calculada pelo fluxo de carga. Como pode ser observado, ao injetar a quantidade de potência ativa obtida através da matriz de sensibilidade, a tensão foi inferior a 1,05 p.u., mostrando o erro obtido ao usar este método. A Fig. 3 também mostra que quanto menor for a razão ($k=R/X$), maior será o erro. Para ($k=0,5$), o erro na tensão é de 15,61% e para ($k=5$) o erro é de 6,38%. A Tabela 1 apresenta todos os resultados obtidos em detalhes. Pode-se observar que para ($k=0,5$), o erro na potência ativa é de 18,35%.

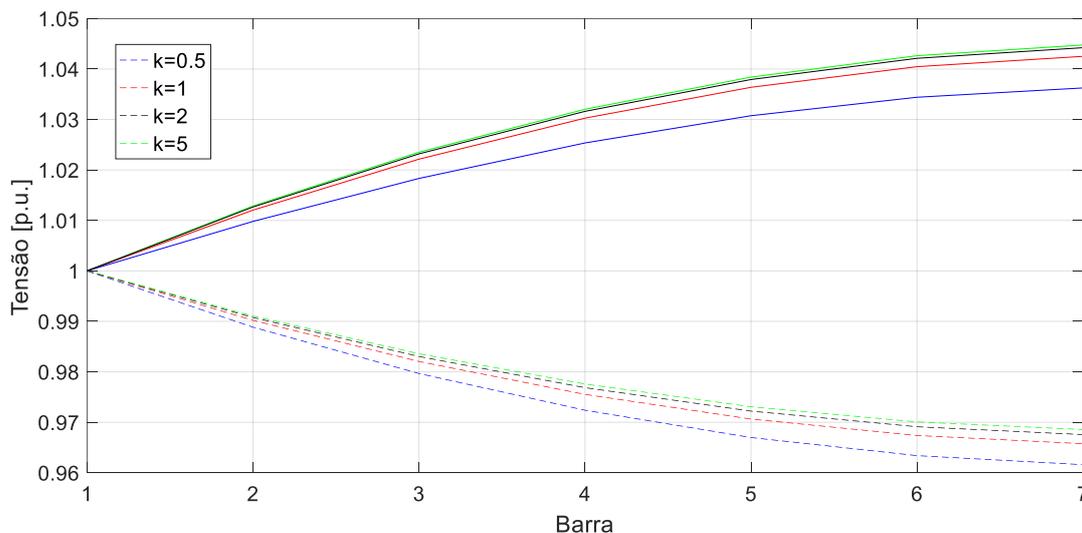


Figura 3 - Perfil de tensão – máxima penetração com geração em todos os barramentos – carga leve

Tabela 1 - Geração em todas as barras – carga leve

R=0,02 PL=0,0714 QL=PL/10						
k=(R/X)	Tensão barramento 7 sem PV	Tensão barramento 7 com PV	Erro Tensão (%)	Potência gerada	Potência real	Erro na potência (%)
0.5	0,9616	1,0362	15,61	0,1818	0,2229	18,43
1	0,9658	1,0425	8,90	0,1854	0,2053	9,69
2	0,9676	1,0442	7,038	0,1848	0,1997	7,46
5	0,9686	1,0448	6,38	0,1835	0,1970	6,85

3.1.2 Geração fotovoltaica na última barra – carga leve

O segundo caso considera carga leve e a geração PV somente na último barramento. Nesse caso a Eq. (8) é utilizada e é necessário usar apenas o último elemento da última linha da matriz de sensibilidade, por exemplo, quando (k=1) é utilizada a última linha e a última coluna da matriz de sensibilidade da Eq. (4) e a geração é dada por:

$$\Delta P = \frac{(1,05 - 0,9658)}{(0,1302)} = 0,6473$$

No entanto, ao fazer o fluxo de carga com esta potência ativa, a tensão no último barramento é 1,0408, correspondendo a um erro na tensão de 10,92%. A geração necessária para que a tensão no último barramento seja 1,05 é 0,7367, correspondendo a um erro na potência de 12,13%. A Tabela 2 apresenta todos os resultados obtidos em detalhes e a Fig. 4 mostra a tensão nos barramentos sem geração PV (linha tracejada) e com geração (linha contínua). Como pode ser observado, ao injetar a quantidade de potência ativa obtida através da matriz de sensibilidade, a tensão foi inferior a 1,05 p.u., neste caso, o erro é maior do que com a geração em todos os barramentos. Da mesma forma que no caso anterior, quanto menor a relação (k=R/X), maior o erro na injeção de potência ativa. Para (k=0,5), o erro na tensão é de 15,61% e para (k=5) é de 6,38%.

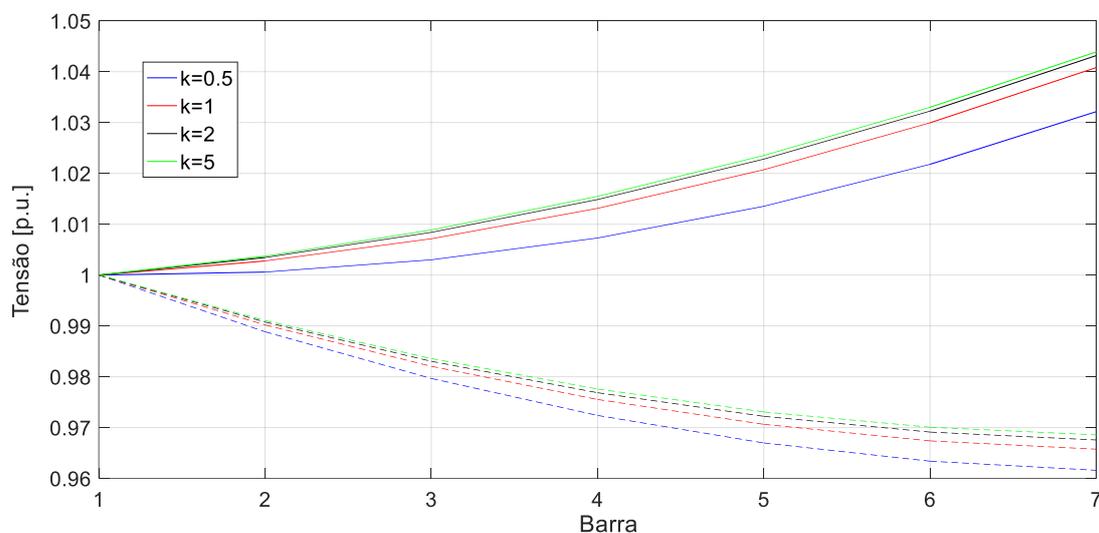


Figura 4 - Perfil de tensão – máxima penetração com geração no último barramento – carga leve

Tabela 2 - Geração na última barra – carga leve

R=0,02 PL=0,0714 QL=PL/10						
k=(R/X)	Tensão barramento 7 sem PV	Tensão barramento 7 com PV	Erro Tensão (%)	Potência gerada	Potência real	Erro na potência (%)
0.5	0,9616	1,0321	20,24	0,6325	0,8523	25,78
1	0,9658	1,0408	10,92	0,6473	0,7367	12,13
2	0,9676	1,0432	8,25	0,6456	0,7367	8,96
5	0,9686	1,0439	7,49	0,6416	0,6977	8,04

3.1.3 Geração fotovoltaica em todas as barras – carga pesada

O terceiro caso considera carga pesada, elevada queda de tensão nos barramentos, e geração PV em todos as barras. A Fig. 5 mostra a tensão nos barramentos sem geração PV (linha tracejada) e com geração (linha contínua). Como esperado, a queda de tensão nos barramentos com carga pesada é maior do que com carga leve, conforme mostrado nos dois casos anteriores. Portanto, a elevação de tensão para a máxima penetração com carga pesada também é maior do que com carga leve. Nessa situação, o erro no cálculo da máxima potência também é maior. Para ($k=0,5$), o erro de tensão é de 20,89% e para ($k=5$) o erro de tensão é de 9,15%. A Tabela 3 apresenta todos os resultados obtidos em detalhes para este caso, o erro de potência para ($k=0,5$) é de 26,26% e para ($k=5$) é de 9,96%.

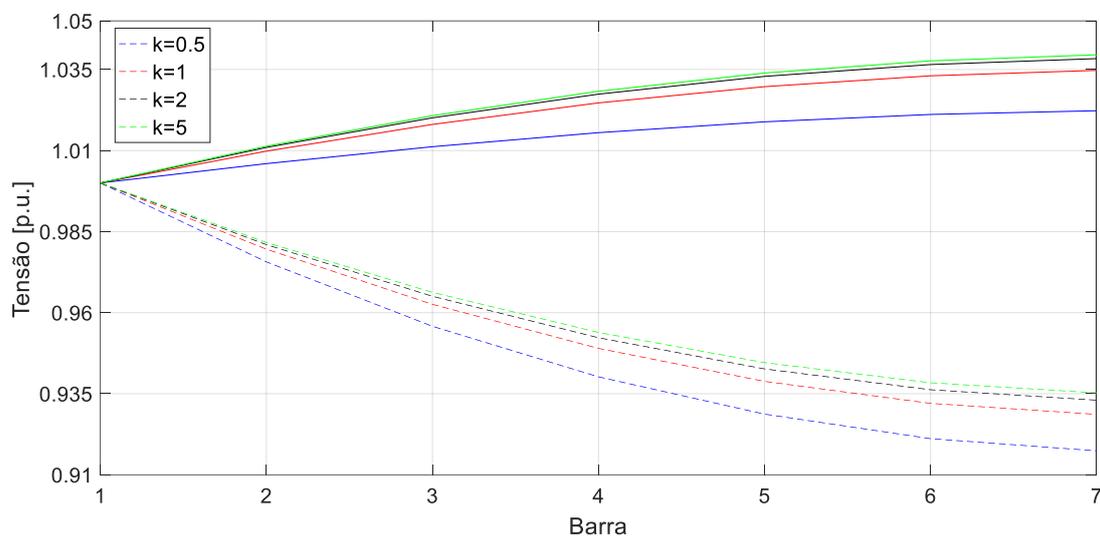


Figura 5 - Perfil de tensão – máxima penetração com geração em todos os barramentos – carga pesada

Tabela 3 - Geração em todas as barras – carga pesada

R=0,02 PL=0,1429 QL=PL/10						
k=(R/X)	Tensão barramento 7 sem PV	Tensão barramento 7 com PV	Erro Tensão (%)	Potência gerada	Potência real	Erro na potência (%)
0,5	0,9174	1,0223	20,89	0,2303	0,3126	26,26
1	0,9286	1,0347	12,60	0,2441	0,2845	14,20
2	0,9330	1,0384	9,91	0,2449	0,2749	10,91
5	0,9353	1,0395	9,15	0,2431	0,2700	9,96

3.1.3 Geração fotovoltaica na última barra – carga pesada

O quarto caso considera carga pesada e geração PV apenas no último barramento. Nesta situação, ocorreram os piores erros de todos os casos analisados, como pode ser visto na tabela 4. Para ($k=0,5$), a injeção de potência ativa calculada é 0,7967 e a potência real que deveria ser injetada é 1,2552, o que corresponde a um erro de 36,52%, mesmo para ($k=5$) o erro também foi grande, 11,55%. A Fig. 6 mostra a tensão nos barramentos sem geração PV (linha tracejada) e com geração (linha contínua).

Tabela 4 - Geração na última barra – carga pesada

R=0,02 PL=0,1429 QL=PL/10						
k=(R/X)	Tensão barramento 7 sem PV	Tensão barramento 7 com PV	Erro Tensão (%)	Potência gerada	Potência real	Erro na potência (%)
0,5	0,9174	1,0154	26,09	0,7967	1,2552	36,52
1	0,9286	1,0317	15,07	0,8497	1,030	17,50
2	0,9330	1,0365	11,53	0,8541	0,9808	12,91
5	0,9353	1,0380	10,46	0,8486	0,9595	11,55

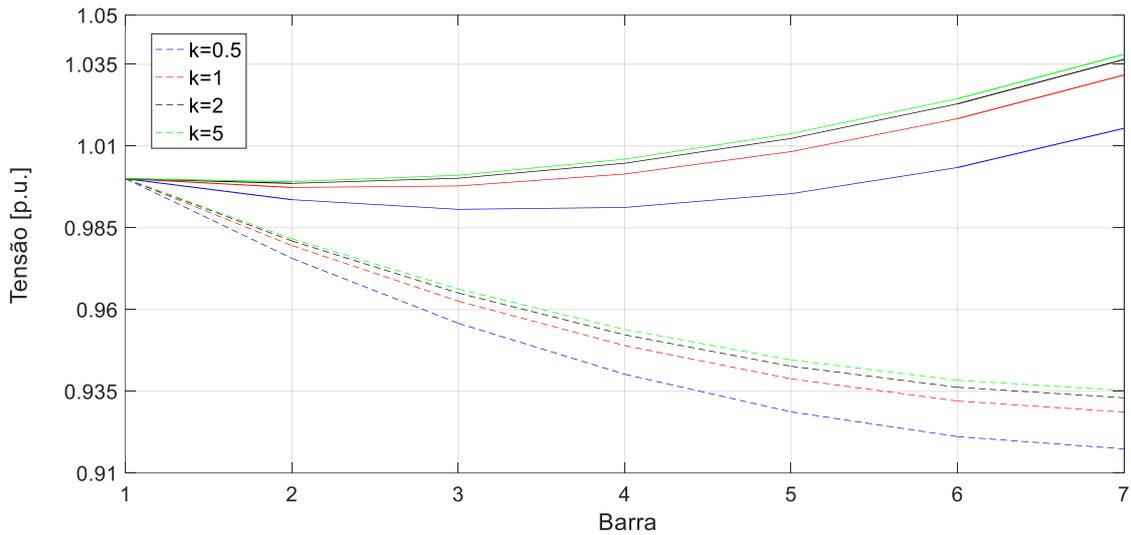


Figura 6 - Perfil de tensão – máxima penetração com geração no último barramento – carga pesada

3.2.1 Consumo de potência reativa em todas as barras

Esta seção considera que devido à alta penetração de sistemas PV, a tensão no último barramento é 1,1 p.u. e que todas as barras vão consumir potência reativa para regular a tensão a 1,0 p.u. Assim, utiliza-se a Eq. (10). A Fig. 8 mostra a tensão em todos os barramentos sem consumo de potência reativa (linha contínua) e depois da regulação de tensão (linha tracejada) para diferentes valores de $(k=R/X)$. A Tabela 6 mostra os valores de potência reativa a serem consumidos para diferentes valores de $(k=R/X)$. Para $(k=4)$ o erro na tensão é muito grande, 91,2%. Nessa situação a tensão no último barramento é de 0,9088 p.u., o que representa um problema de subtensão. Para $(k=0,5)$ o erro é bem menor, 10,24 % na potência e 11,5 % na tensão.

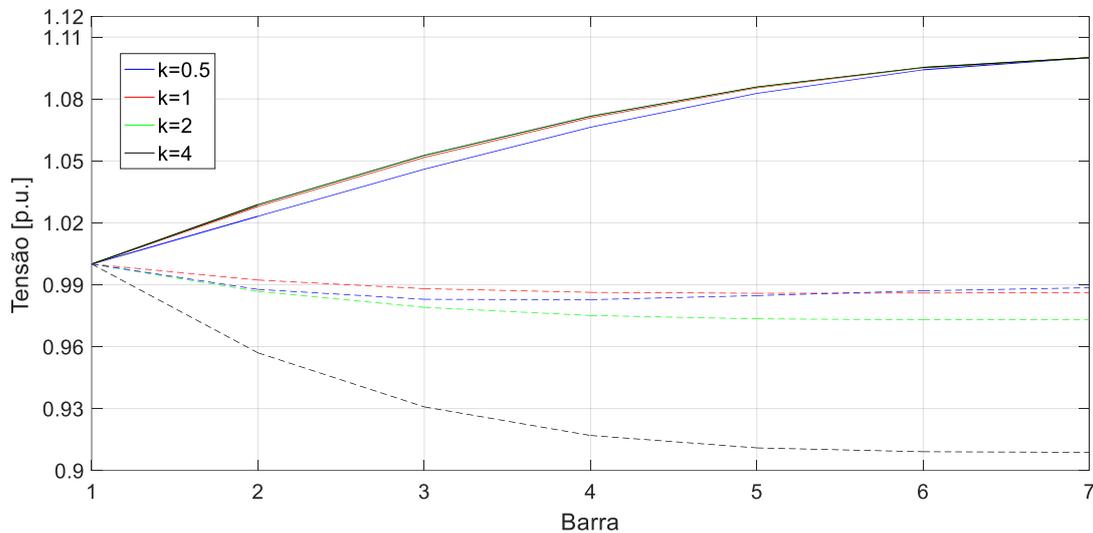


Figura 8 - Perfil de tensão – Regulação de tensão com consumo de reativo em todas as barras

Tabela 5 - Consumo de reativo em todos os barramentos

$k=(R/X)$	Tensão barramento 7 sem PV	Tensão barramento 7 com PV	Erro tensão (%)	Reativo consumido método	Reativo consumido real	Erro na potência (%)
0.5	1,1	0,9885	11,50	-0,1237	-0,1122	10,24
1	1,1	0,9861	13,90	-0,2570	-0,2294	12,03
2	1,1	0,9730	27,00	-0,5158	-0,4263	20,99
4	1,1	0,9088	91,20	-1,0266	-0,6900	48,78

3.2.2 Consumo de potência reativa na última barra

Esta seção considera que somente a última barra vai consumir potência reativa para regular a tensão a 1,0 p.u. Assim, utiliza-se a Eq. (11). A Fig. 9 mostra a tensão em todos os barramentos antes da regulação (linha contínua) e depois (linha tracejada) para diferentes valores de $(k=R/X)$. A Tabela 6 mostra os valores de potência reativa a serem consumidos para diferentes valores de $(k=R/X)$. É possível observar que quanto maior o X da linha menor é a potência reativa necessária para a regulação e menor o erro, o que justifica essa técnica de controle de tensão em sistema de distribuição de média tensão, onde X é maior do que R .

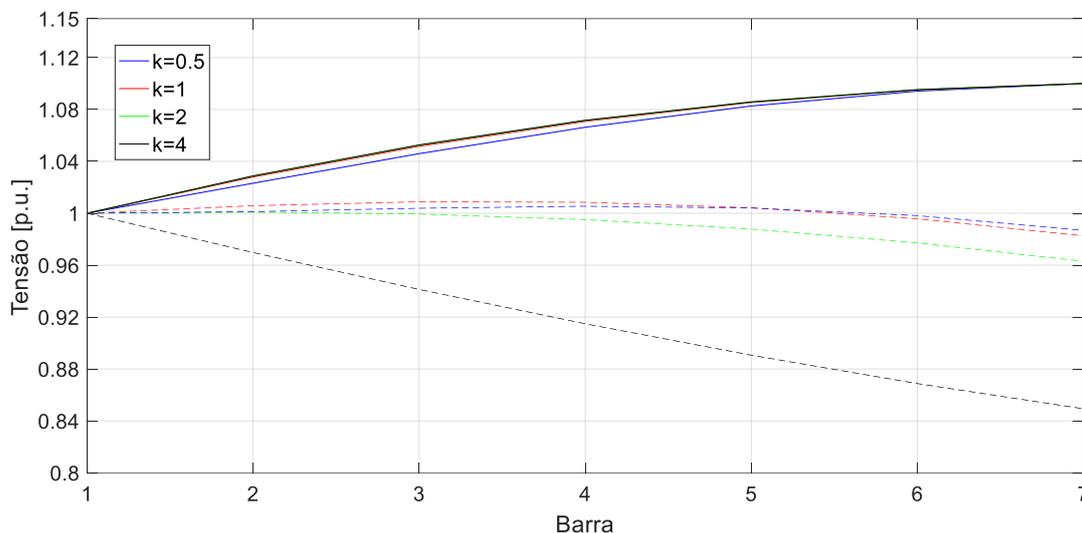


Figura 7 - Perfil de tensão -- Regulação de tensão com consumo de reativo na última barra

Tabela 6 - Consumo de reativo no último barramento

$k=(R/X)$	Tensão barramento 7 sem PV	Tensão barramento 7 com PV	Erro tensão (%)	Reativo consumido método	Reativo consumido real	Erro na potência (%)
0,5	1,1	0,9868	13,20	-0,4380	-0,3928	11,50
1	1,1	0,9826	17,40	-0,9021	-0,7872	14,59
2	1,1	0,9630	37,00	-1,8078	-1,4276	26,63
4	1,1	0,8494	150,60	-3,5964	-2,2209	61,93

O consumo de reativo é bem maior do que no caso anterior, uma vez que, somente o último barramento contribui para a regulação de tensão. Para $(k=4)$ o erro na potência reativa é de 61,93%, abaixando a tensão para 0,8494 p.u., o que representa uma tensão crítica.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho avalia o erro ao utilizar a matriz de sensibilidade para calcular a máxima penetração PV e a regulação de tensão em um sistema radial de distribuição. O estudo é realizado com diferentes cenários de carga, geração/consumo dos sistemas PV e relação (R/X) de sistemas típicos de distribuição. Ao utilizar esse método para o cálculo da máxima penetração e da regulação de tensão, concluímos que a potência ativa calculada é subestimada e o consumo de reativo é superestimado.

O estudo mostrou que o maior erro da máxima penetração ocorre para elevada queda de tensão nas barras, com baixos valores de (R/X) e com geração PV apenas no último barramento. Neste caso, o erro na injeção de potência ativa pode ser de até 36,52% e 26,09% na tensão, este é muito elevado e não pode ser desconsiderado. Ao aumentar a relação (R/X) , o erro da máxima penetração diminui consideravelmente. Para valores de (R/X) superiores a dois, sistema típico de distribuição de baixa tensão, os erros não variam significativamente, permanecem aproximadamente 10%, sendo maiores em situações de carga pesada e com geração somente no último barramento.

Para a regulação de tensão, o maior erro no cálculo da potência reativa consumida é obtido quando a relação (R/X) é grande. O pior caso ocorre quando $(k=4)$ o que gera um erro no consumo de potência reativa de 61,93% e conseqüentemente uma subtensão de 0,8494 p.u. Assim, é importante saber qual erro é admissível antes de utilizar o método da análise de sensibilidade para a regulação de tensão e da máxima penetração.

Este trabalho, mostra que para algumas situações, o uso da linearização com base em fatores de sensibilidade pode produzir erros que não podem ser desprezados. No entanto, uma investigação mais aprofundada é necessária para verificar a ocorrência desses erros nos métodos de ponta baseados nessa estratégia.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil

REFERÊNCIAS

- A. Engler, March 2005. "Applicability of Droops in Low Voltage Grids," International Journal of Distributed Energy Resources, vol. 1.
- A. Samadi, R. Eriksson, L. Söder, B. G. Rawn and J. C. Boemer, June 2014. "Coordinated Active Power-Dependent Voltage Regulation in Distribution Grids With PV Systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 3, pp. 1454-1464.
- E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez and U. Borup, 2010. "Evaluation of the voltage support strategies for the low voltage grid connected PV generators," 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, pp. 710-717.
- F. Tamp and P. Ciufu, Mar. 2014. "A sensitivity analysis toolkit for the simplification of MV distribution network voltage management," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 559–568.
- H. Saadet, 1999. Power System Analysis, McGraw-Hill.
- M. H. J. Bollen and A. Sannino, Jan. 2005. "Voltage control with inverter-based distributed generation," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 519–520.
- P. McNutt, J. Hambrick, M. Keesee, and D. Brown, 2009. Impact of SolarSmart Subdivisions on SMUD's Distribution System NREL/TP-550-46093.
- R. Tonkoski and L. A. C. Lopes, 2008. "Voltage Regulation in Radial Distribution Feeders with High Penetration of Photovoltaic," 2008 IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, GA, pp. 1-7.
- R. Tonkoski, L. A. C. Lopes and T. H. M. El-Fouly, April 2011. "Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 2, no. 2, pp. 139-147.
- S. Cobben, B. Gaiddon, and H. Laukamp, 2008. WP4—Deliverable 4.3—Impact of Photovoltaic Generation on Power Quality in Urban Areas With High PV Population EIE/05/171/SI2.420208
- S. Weckx and J. Driesen, Oct. 2016. "Optimal Local Reactive Power Control by PV Inverters," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 4, pp. 1624-1633.
- S. Weckx, R. D'Hulst, and J. Driesen, 2015. "Voltage sensitivity analysis of a laboratory distribution grid with incomplete data," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 3, pp. 1271–1280.
- T. Xu and P. Taylor, 2008. "Voltage control techniques for electrical distribution networks including distributed generation," presented at the Proc. 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul.
- W. Uturbey, T. F. Araujo, F. Preisser, S. R. Silva, E. N. Cardoso and B. M. Lopes, 2014. "Assessing the value of distributed photovoltaic for the distribution system," 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014), Naples, pp. 1-6

MAXIMUM PHOTOVOLTAIC PENETRATION AND VOLTAGE ADJUSTMENT IN DISTRIBUTION SYSTEMS THROUGH THE SENSITIVITY ANALYSIS

Abstract. *Admissible range of grid voltage is one of the strictest constraints for the penetration of distributed photovoltaic generators in special when connected to low voltage networks. Voltage limits are usually fulfilled either by network reinforcements, by limiting power injections from photovoltaic generators or through reactive power consumption. A practical and fast way to determine the maximum amount of the active power that can be injected into the network by a photovoltaic system without the operating limits being violated or the reactive power required for voltage regulation is by using the sensitivity matrix. This means low computational cost and quick control actions for the system operator. Therefore, many studies have used sensitivity analysis to keep the electrical system within normal operating limits. However, there are errors associated to the methods based on the sensitivity matrix. This work analyzes the errors obtained for the calculation of maximum penetration of photovoltaic generators and the errors for the calculation of reactive power required for voltage regulation, using the sensitivity matrix in distribution systems in different scenarios and different ratios (R/X) of the distribution networks.*

Key words: *Maximum Penetration of PV Energy, Voltage Regulation, Sensitivity Matrix.*