

Previsão de ocorrência de Sobretensões numa Rede de Distribuição Urbana Considerando a Inserção de Sistemas Fotovoltaicos

Sergio Manuel Rivera Sanhueza

Universidade Federal do Tocantins

sergiorivera@uft.edu.br

Resumo — A conexão de Sistemas Fotovoltaicos Conectados na Rede (SFCR) traz o benefício para o consumidor de ter sua demanda parcialmente suprida pela energia solar, diminuindo a dependência da concessionária. No entanto, numa nova realidade, onde há o crescimento de SFCR, o fluxo de potência sofre alterações acarretando mudança nas tensões de barra, surgindo um cenário que merece a atenção da qualidade da energia elétrica. Para prever estas mudanças, um programa de fluxo de carga radial foi desenvolvido para este fim.

Palavras-chaves — Tensão de regime permanente, Sistemas fotovoltaicos, Fluxo de carga radial.

I. INTRODUÇÃO

Como muitos países são signatários do Protocolo de Kyoto [1], os respectivos governos estão incentivando o uso de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR). Assim, o uso de energia solar, para consumidores de energia elétrica, residenciais e comerciais, está cada vez mais atrativo porque o seu custo está ficando mais barato para a aquisição, além de haver incentivo financeiro para os consumidores das concessionárias de energia, pois a quantidade de energia elétrica injetada na rede é retornada para o consumidor na forma de crédito [2].

Neste contexto, os SFCR estão ganhando espaço nas redes de distribuição, pois os consumidores passam a ser produtores de energia, o que traz redução na fatura de energia.

Em diversos países os SFCR estão sendo utilizados pelos consumidores, e antes de sua instalação, estes sempre têm a preocupação de saber o investimento inicial e em quanto tempo terão o retorno financeiro desejado. Em função disso, diversas empresas estão atuando neste mercado.

Este trabalho tem como objetivo não analisar a situação do consumidor, mas sim as melhorias para a rede elétrica quando há consumidores operando com SFCR, no que tange à redução de perdas e consumo de energia. Também é necessário investigar se haverá aspectos negativos, no que tange à qualidade da energia elétrica, como sobre tensões e alteração do fator de potência.

A investigação consiste na execução de fluxo de potência em uma rede de distribuição urbana, considerando a presença ou não de SFCR, durante um período de 24 horas. Isto irá fornecer o perfil de tensão nas barras, as curvas com o fluxo de potência de cada trecho e as respectivas perdas. Desta forma a energia elétrica consumida pode ser obtida por integração.

A. Estado da arte

Na literatura destaca-se o estudo feito em [3], onde uma rede de distribuição urbana, e radial, foi analisada. No entanto, além de não abordar as perdas e consumo de energia, foi utilizado o programa Matlab/PSAT para o fluxo de potência, que utiliza o Método de Newton-Raphson [4].

Apesar de o método citado ser adequado para sistemas malhados de transmissão, ele não é adequado para redes radiais de distribuição, em função da relação X/R , que é mais baixa para na distribuição e também porque a matriz de admitâncias Y_{bus} é mal condicionada tornando difícil a inversão [5].

A metodologia deste trabalho será a elaboração de um fluxo de carga voltado especificamente para sistemas radiais, em seguida serão utilizados todos os parâmetros de entrada já disponíveis por [3] sendo dados de linhas, de barras e de injeção de potência oriundos de SFCR.

A inserção de SFCR faz reduzir o fluxo de potência em linhas e transformadores, assim surge a preocupação de alteração do fator de potência e na tensão de regime permanente nas barras. Desta forma, os valores obtidos pelo fluxo de carga serão confrontados com os limites estabelecidos pelo PRODIST - módulo 8 [12].

Finalizando, são calculadas as perdas e o consumo de energia, a partir dos dados de fluxo de carga, num período de 24 horas.

II. FLUXO DE POTÊNCIA UTILIZADO

Por se tratar de um sistema de distribuição radial é necessário utilizar um método de fluxo de carga específico para este tipo de rede. Neste contexto destacam-se dois grandes grupos, sendo o de soma de correntes [6] e o de soma de potências [7]. Estes dois

métodos tem sido aplicados desde o final da década de 80, no entanto o último tem sido mais utilizado por apresentar melhor convergência e por esta razão será utilizado neste trabalho. A sua implementação foi realizada utilizando a linguagem C, através do compilador livre DevC++.

O algoritmo do fluxo de potência consiste em duas etapas, sendo a *forward sweep* e a *backward sweep*.

A primeira consiste em atribuir uma tensão inicial para cada barra e somar em cada ramo da rede as potências das barras a jusante e as perdas nestes ramos, pela Lei das Correntes de Kirchoff, até chegar à barra de origem da rede.

Já a segunda etapa consiste em aplicar a Lei das Tensões Kirchoff desde a barra de origem em direção às barras mais distantes para calcular as respectivas tensões.

Para saber se houve convergência é calculada a diferença dos módulos das tensões de cada barra em relação à iteração anterior. Caso esta diferença seja menor que a tolerância, o processo é interrompido. Caso contrário, uma nova *forward sweep* é realizada. Para melhor ilustração o algoritmo é apresentado na Fig. 1.

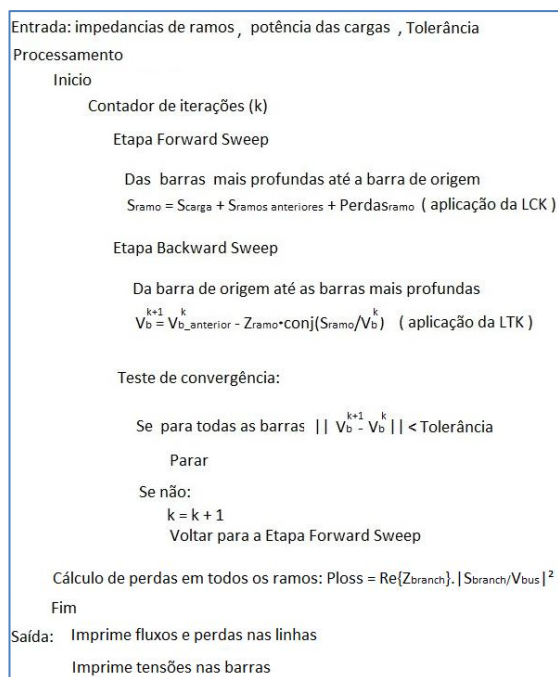


Fig. 1. Algoritmo do método da soma de potências.

III. SISTEMAS UTILIZADOS

B. Rede de distribuição radial

O sistema radial utilizado para estudo faz parte da rede de distribuição de energia elétrica da cidade de Palmas-TO [3], onde a tensão de linha da rede primária é de 13,8 kV, já as tensões de linha e de fase na rede secundária são de 380 e 220 V respectivamente. Trata-se de uma região residencial e comercial urbana, conforme visto na Fig. 2.

Apesar de esta rede ter sido obtida da referência [3], a numeração das barras foi refeita para poder utilizar a *forward/backward sweep*. Verifica-se que são 35 barras e 34 ramos, tendo origem na barra 0. Os ramos são compostos por 22 linhas de 13,8 kV e 10 transformadores,

que juntos alimentam 1427 consumidores, entre comerciais (C) e residenciais (R), conforme descrito na Tabela I. Os dados de ramos são apresentados na Tabela II.

TABELA I
DADOS DE TRANSFORMADORES

Bus	Potência do Transformador [kVA]	Consumidores conectados	Máxima Potência [kVA]
31	75	13 R,C	55,53
25	112,5	280 R	72
29	112,5	1 P	61,55
32	112,5	251 R	28,29
34	112,5	122 R	71,86
24	112,5	171 R	55,48
23	112,5	309 R	85,90
12	150	265 R	85,67
4	75	4 C	9,17
8	75	11 C	14,99

TABELA II
DADOS DE RAMOS

Ramo	De	Para	R [pu]	X [pu]
0	0	1	0,001258	0,002618
1	1	2	0,003975	0,002618
2	1	3	0,004403	0,002899
3	2	4	2,133333	4,150502
4	2	5	0,007170	0,004722
5	3	6	0,012442	0,004418
6	3	7	0,004403	0,002899
7	5	8	2,133333	4,150502
8	6	9	0,006777	0,002406
9	6	1	0,004855	0,001724
10	7	11	0,001258	0,000828
11	9	12	0,911111	2,148097
12	10	13	0,004299	0,001526
13	10	14	0,011987	0,004256
14	11	15	0,003793	0,001347
15	11	16	0,008025	0,005285
16	13	17	0,002782	0,000988
17	13	18	0,006170	0,002191
18	14	19	0,003186	0,001131
19	14	20	0,002327	0,000826
20	15	21	6,333333	9,797959
21	16	22	6,333333	9,797959
22	17	23	1,303704	2,824778
23	18	24	1,303704	2,824778
24	19	25	1,303704	2,824778
25	20	26	0,010166	0,003610
26	20	27	0,003945	0,001401
27	26	28	0,005962	0,003926
28	27	29	1,303704	2,824778
29	27	30	0,003237	0,001149
30	28	31	2,133333	4,150502
31	30	32	1,303704	2,824778
32	30	33	0,008092	0,002873
33	33	34	1,303704	2,824778

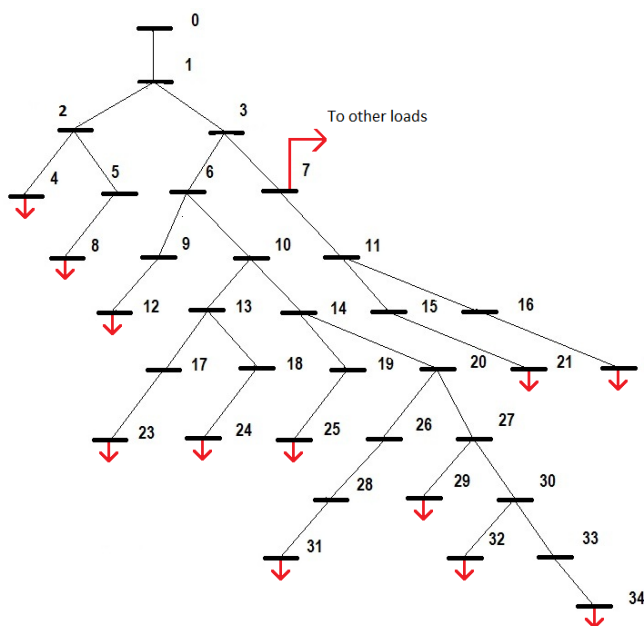


Fig. 2. Rede de distribuição utilizada.

C. Sistema fotovoltaico conectado à rede

Um SFCR tem como objetivo transformar a energia solar em elétrica, fazer a conversão CC/CA e assim injetar o fluxo de potência na rede elétrica. O consumidor continua sendo atendido pela rede elétrica. A Fig. 3 ilustra o sentido do fluxo.

Estes equipamentos injetam somente potência ativa na rede e operam com fator de potência unitário.

A capacidade de geração de um SFCR depende da potência do sistema [kWp], da irradiação solar [kWh/m².dia], da inclinação [°] e da temperatura ambiente [°C] [9].

Como se têm os valores de carga de hora em hora para as barras de consumidoras [3], pode-se também calcular para cada hora do dia o valor da potência gerada pelo SFCR.

O Instituto Nacional de Meteorologia apresenta um banco de dados, disponível na internet, com as variáveis descritas, dia por dia e de hora em hora. Os valores de potência gerada para cada hora do dia, de um SFCR, já foram obtidos em [3], utilizando a metodologia apresentada em [9]. Desta forma o fluxo de potência injetado na rede por um único SFCR, de 1,5 kWp, é apresentado na Fig. 4. Como se vê, a injeção de fluxo de potência na rede ocorre das 7 até as 18 h, pois fora deste período a incidência solar não é suficiente.

Esta curva foi obtida em função de dados meteorológicos para o dia 03/10/2013, sendo um dia de céu limpo, sem nuvens, no entanto não foi considerada a possibilidade de sombreamento nos painéis solares, que podem ser causados por edificações vizinhas ou árvores por exemplo. Cabe ressaltar que o sombreamento reduz a capacidade de geração de um SFCR.

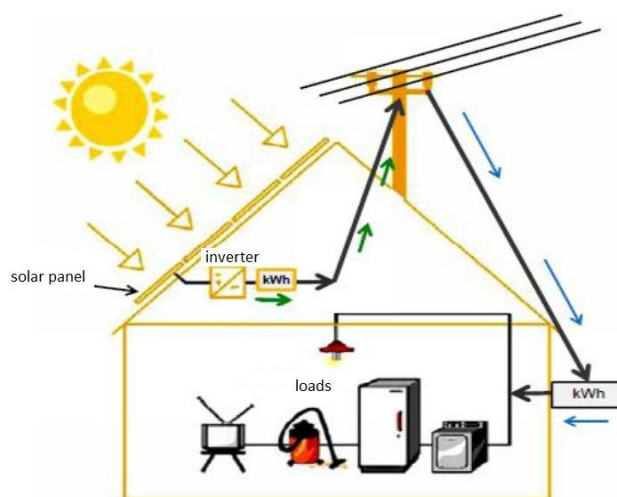


Fig. 3. Fluxo de potência de um SFCR.

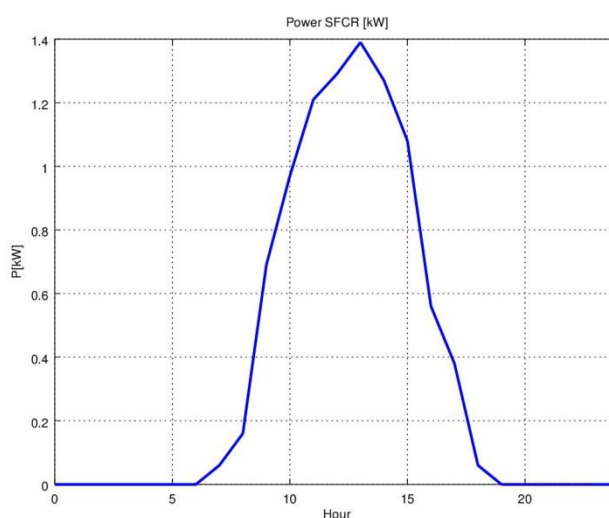


Fig. 4. Potência injetada na rede pelo SFCR de 1,5 kWp.

IV. ESTUDOS DE CASOS

Será analisado o comportamento da rede elétrica com e sem a presença de SFCR, em três cenários conforme mostra a Tabela III.

TABELA III
CENÁRIOS ANALISADOS

Cenário	Descrição
1	Sem SFCR
2	50 % de SFCR
3	60 SFCR

O cenário 1 faz a simulação do sistema de distribuição sem considerar nenhum SFCR, que é a condição real de operação da rede. O cenário 2 acrescenta 50 % de geração solar da capacidade dos transformadores, que é o limite estabelecido pela concessionária local [10]. Já o cenário 3 considera que para cada um, dos 6 transformadores que estão alimentando as cargas, há 10 SFCR's de 1,5 kWp conectados.

Os parâmetros a serem comparados são:

- Fluxo de potência no alimentador principal, ramo 0;
- Fator de potência total;
- Perfil das tensões na barra 34;
- Consumo de energia.

Para obter os valores citados será executado o fluxo de carga para cada hora do dia completo, ou seja, 24 vezes. Para isto, o programa desenvolvido para este trabalho executa um laço de repetição com as cargas de hora em hora, gerando as curvas de carga e de tensão.

Como visto anteriormente, a rede tem 34 ramos e será mostrado apenas o fluxo de potência no ramo 0, pois o fluxo total passa neste trecho. Quanto à escolha da barra 34, para mostrar o perfil de tensão, se deve ao fato de ser a mais distante.

A. Fluxo de potência no alimentador principal.

A Fig. 5 mostra o fluxo de potência no alimentador principal.

O cenário 1, que representa o sistema de distribuição sem a presença do SFCR apresenta o valor máximo de carga de 3037 kW às 18 h. Outro horário notável é o meio dia, onde há uma demanda de 2887 kW, que decresce em seguida.

O SFCR só gera das 7 às 18 horas do dia e a diferença no fluxo de potência só ocorre neste intervalo de tempo. Como era de se esperar, o cenário 2, que considera 50 % de SFCR apresenta o menor fluxo de potência, que neste intervalo apresentou o valor máximo de 2480 kW ao meio dia. Já o cenário 3, que apresenta 60 unidades de SFCR apresentou demanda de 2806 kW neste mesmo horário. A redução da demanda produzida para cada um dos cenários está apresentada na Tabela IV.

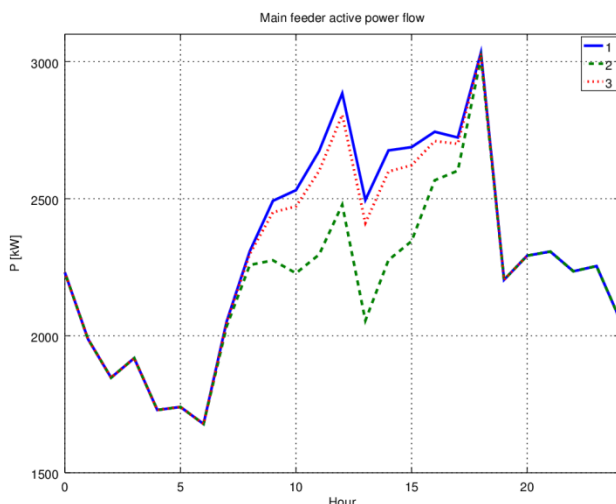


Fig. 5. Fluxo de potência ativa no alimentador principal.

Sendo assim, houve redução de demanda 406 e 78 kW para os cenários 2 e 3 respectivamente. Para melhor elucidar a grandeza destes valores, basta comparar com a demanda mínima de um consumidor com tensão primária de distribuição, que atualmente é de 75 kW [11].

Logo a redução de 78 kW produzida pelo cenário 3 é

suficiente para alimentar um pequeno consumidor em 13,8 kV. Assim a inserção de SFCR pode aumentar a disponibilidade da rede elétrica para mais consumidores.

TABELA IV
DEMANDA ÀS 12:00

Cenário	Demanda [kW]	Redução [kW]	Redução [%]
1	2884	---	---
2	2480	406	14,07
3	2806	78	2,70

B. Fator de potência total.

Quanto ao fator de potência, verifica-se através da Fig. 6 que o SFCR produz uma redução do mesmo, pois há menos demanda de potência ativa para a mesma demanda de potência reativa. Conforme pode ser visto nas curvas, quanto maior a disponibilidade de SFCR, maior a redução do fator de potência, que neste caso é o cenário 2. Em todos os casos o fator de potência está abaixo de 0,92.

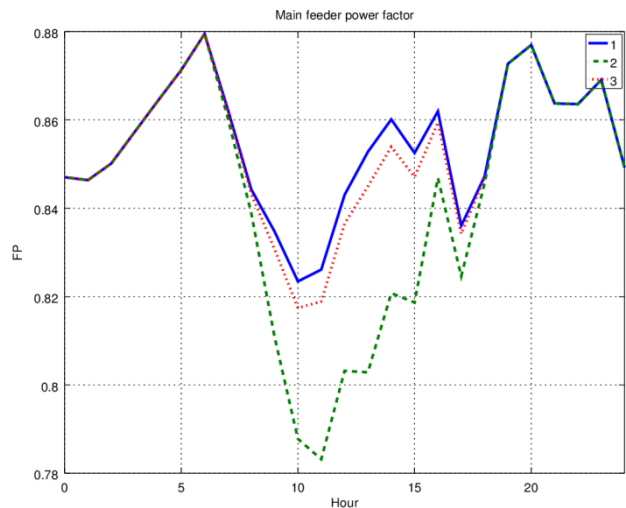


Fig. 6. Fator de potência no alimentador principal.

C. Tensão na barra 34.

No que tange às tensões nas barras, há um valor mais elevado no intervalo em que o SFCR está fornecendo energia para a rede. Isso ocorre porque há menos queda de tensão nas linhas.

A barra que chama atenção no sistema analisado é de número 34, a mais distante da barra fornecedora, vista na Fig. 7. Era de se esperar que a tensão fosse diminuir no período de maior demanda do alimentador principal, por volta do meio dia, mas não foi o que aconteceu, pois a tensão aumentou. Também se verifica que quanto maior a disponibilidade de SFCR, maior é a tensão.

Analisando a curva de carga desta barra, mostrada na Fig. 8, verifica-se que a demanda cresce a partir das 18 h e decresce a partir das 0 h, sendo um consumo oposto ao do alimentador principal.

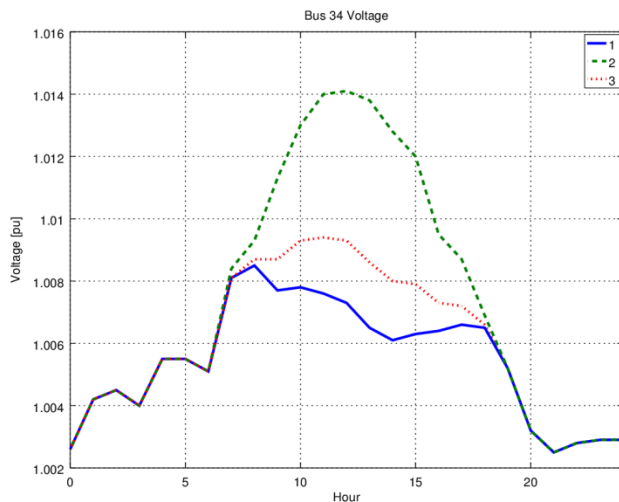


Fig. 7. Tensão na barra 34.

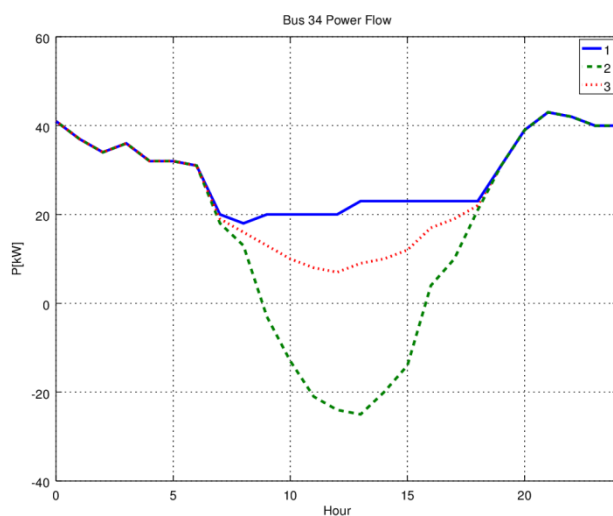


Fig. 8. Fluxo de potência injetado na barra 34.

A Tabela I mostra que a barra 34 alimenta 122 consumidores residenciais, sendo assim, muitos destes devem ausentar-se de suas residências durante o dia.

Logo, para um consumidor que possua maior demanda fora do período de maior incidência solar, deve-se tomar o cuidado para que não ocorram sobre tensões. Nesta barra em particular, o limite de tensão não foi excedido, pois o valor máximo ficou em 1,014 pu, que nesta rede corresponde a 385,32 V. De acordo PRODIST - módulo 8 [12], a tensão de linha pode variar de 350 até 399 V. Assim, apesar da Fig. 8 mostrar uma elevação acentuada da tensão para o cenário 2, não houve violação.

Outro fato interessante é a inversão de fluxo de potência que pode ocorrer. Verifica-se, que no cenário 2, o fluxo de potência ficou invertido no período de maior irradiância solar, pois está negativo. Já no cenário 3 houve apenas a redução do mesmo, mas o sentido foi mantido da rede para a carga.

D. Consumo de energia.

De posse das curvas de carga apresentadas para o alimentador principal, na Fig. 5, o consumo de energia, para cada um dos cenários, é obtido por integração através da Regra 3/8 de Simpson Composta [13].

Antes de aplicar a integração é conveniente tornar as curvas de carga mais próximas à realidade, pois os valores estão dispostos de hora em hora, enquanto que a medição de energia elétrica para fins de faturamento, os dados devem estar disponíveis a cada 15 minutos. Integrando uma curva com mais pontos, obtém-se um resultado mais próximo a realidade.

Sendo assim é necessário aplicar uma interpolação para as curvas de potência ativa, de tal forma que os dados fiquem disponíveis a cada 15 minutos.

Pela facilidade de aplicação e de acesso optou-se por utilizar a Spline Cúbica [13], da plataforma Octave, e após realizar a integração pela regra mencionada, apresenta-se de forma resumida, os valores de consumo e as respectivas reduções obtidas pelos SFCR estão apresentadas na Tabela V.

TABELA V
CONSUMO DE ENERGIA

Cenário	Consumo [kWh]	Redução [kWh]	Redução [%]
1	55459	---	---
2	52586	2873	5,18
3	54906	553	0,99

Observa-se que sem a presença de SFCR, o consumo total de energia é de 55459 kWh, enquanto que no cenário 2 há uma redução de 2873 kWh, o que é suficiente para alimentar esta rede elétrica por 1 h e 17 min.

Já o cenário 3, que apresenta uma redução de 553 kWh, que seria capaz de atender esta demanda por aproximadamente 17 min.

V. CONCLUSÕES

Uma parte de um sistema de distribuição foi analisada. Com os reais dados de ramos e de carga, foram obtidos os fluxos de potência e perfis de tensão de cada barra, através do fluxo de carga fundamentado na soma de potências [7].

O estudo foi complementado com a inserção de SFCR em duas proporções diferentes. Com base nos resultados vistos anteriormente, pode-se afirmar como aspectos positivos:

- Redução do fluxo de potência nas linhas;
- Melhoria do perfil de tensão nas barras;
- Redução das perdas e do consumo de energia.

Com essas melhorias novos consumidores podem ser atendidos pela mesma rede elétrica.

Já como aspectos que exigem cautela por parte da concessionária, podem-se citar:

- Redução do fator de potência durante o período de geração solar;
- Elevação da tensão para consumidores com baixa demanda durante o dia (barra 34);

Cabe ressaltar, que de acordo com as normas IEEE 1547 [13] e UL1741 [15], o inversor não deve atuar na tensão do ponto de acoplamento comum (PCC), assim

deve atuar com fator de potência unitário. Tal consideração foi levada em conta no estudo feito em [3] e neste também.

No entanto, o inversor pode ter um limite mínimo e máximo para compensação de potência reativa, podendo atuar como capacitor e como indutor, com a vantagem de não produzir os efeitos inconvenientes dos chaveamentos [9].

Neste trabalho os dados de ramos e de cargas são reais, no entanto, a potência fornecida pelos SFCR foi obtida com base em dados meteorológicos.

Os resultados obtidos aqui não podem ser generalizados para qualquer rede elétrica, pois além das condições do tempo como temperatura e incidência solar, a rede está localizada numa região do planeta com bastante predominância do sol, próxima ao paralelo 10°11'04" Sul. Assim, em outro paralelo os resultados seriam diferentes.

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar um estudo similar considerando os seguintes aspectos:

- Utilizar valores reais do fluxo de potência injetado pelos SFCR;
- Confrontar cenários que incluam dias ensolarados e nublados;
- Inclusão de sombreamento em edificações vizinhas;
- Analisar uma rede elétrica com a presença de banco de capacitores e reguladores de tensão.

REFERENCIAS

- [1] *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UN., Kyoto, 1998, pp. 1-20.
- [2] *Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica*.
- [3] A. R. Piccini, "Análise da Viabilidade da Conexão de Geração Solar Fotovoltaica na Rede de Distribuição de Palmas-TO via MATLAB/PSAT" M.S. Dissertation. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, 2014.
- [4] W.F. Tinney, C.E. Hart, "Power flow solution by Newton's Method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, pp. 1449-1460. November, 1967.
- [5] D. Das, H.S. Nagi, D.P. Kothari, "Novel method for solving radial distribution networks", *IEE. Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, pp.291-298. July, 1994.
- [6] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, G.X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, n°2 pp.753-762. May, 1988.
- [7] R. G. Cespedes, "New method for the analysis of distributions networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, n°1 pp. 391-396. January, 1990.
- [8] J. M. Rupa, S. Ganesh, "Power flow Analysis for radial distribution systems using backward/forward sweep method" *World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 8, n. 10 pp. 1621-1625. 2014.
- [9] F. L. Albuquerque, "Sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica operando como gerador de potência ativa e compensador de potência reativa" PhD Theses. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, 2012.
- [10] *Requisitos para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição de baixa tensão*. NTD-18, December, 2012.
- [11] *Fornecimento de energia elétrica em tensão primária*. NDU-002, September, 2014.
- [12] *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST módulo 8- Qualidade da energia elétrica*, 2017.
- [13] S.C. Chapra, R.P. Canale. (2010). *Numerical Methods for engineers*. (6th.) McGraw Hill.
- [14] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547, 2003.
- [15] UL Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnections Systems Equipment for Use with Distributed Energy Resources, UL Standard 1741, 2010.