

AValiação DOS EFEITOS DA CONEXÃO DE UMA UNIDADE GERADORA DISTRIBUÍDA A UM ALIMENTADOR DE 13,8 KV UTILIZANDO O ATP

Jaqueline O. Rezende, Larissa M. Peres, Geraldo C. Guimarães, Marcelo L. R. Chaves
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica,
Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, Uberlândia – MG
jaqueline.oliveirarezende@gmail.com, larissaa_mp@yahoo.com.br, gcaixetag@yahoo.com.br, lynce@ufu.br

Resumo – A presente pesquisa tem como objetivo avaliar os efeitos da conexão de um gerador distribuído a um alimentador de distribuição com respeito aos níveis de tensão, potência e perdas da rede. Para realização deste trabalho foi necessário modelar todos os componentes do sistema elétrico para atender os requisitos do *software* ATP. Nas simulações tal sistema foi primeiro considerado sem o gerador distribuído e depois ele foi conectado, permitindo assim comparar os valores de tensão em todos os barramentos bem como os valores de potência supridos pelo gerador e a subestação. Deste modo, os resultados obtidos tornaram possível levantar as influências da conexão de um gerador em um alimentador de distribuição existente.

Palavras-Chave – Gerador distribuído, potência, sistema elétrico, *software* ATP e tensão.

P Potência ativa.
Q Potência reativa.
R Resistência.
L Indutância.
 x_L Reatância indutiva.
 x_C Reatância capacitiva.
C Capacitância.
U Tensão.
S Potência aparente.
 P_G Potência ativa gerada pelo gerador distribuído.
 Q_G Potência reativa gerada pelo gerador distribuído.
 x_S Reatância síncrona.
 V_t Tensão no terminal do gerador distribuído.
 Z_b Impedância base.
 δ Ângulo da tensão interna do gerador.
 E_f Tensão interna do gerador distribuído.

EVALUATION OF CONNECTION EFFECTS OF A DISTRIBUTED GENERATION UNIT ONTO A 13.8 KV FEEDER USING ATP

Abstract – This research aims to evaluate the effects of the connection of a distributed generator at a distribution feeder with respect to voltage, power and loss levels of the grid. For this study it was necessary to model all components of the electrical system to meet the requirements of the *software* ATP. In the simulations, such system was first considered without the distributed generator and then it was connected, thus allowing to compare the voltages at all buses as well as the values of power supplied by the generator and substation. Thus, with the results obtained it was possible to analyze the influences of connecting a generator at an existing distribution feeder.

Keywords - Distributed generator, power, electrical system, *software* ATP and voltage.

NOMENCLATURA

GD Gerador distribuído.
SE Subestação.
CG Carga.

I. INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica no Brasil é atendida quase que em sua totalidade por grandes usinas geradoras, as quais se localizam em regiões distantes dos grandes centros de consumo. Estas centrais geradoras são interligadas através de linhas de transmissão e distribuição, constituindo o sistema elétrico de potência (SEP). Para atender o crescente aumento da demanda brasileira são requeridos estudos que visam identificar forma de viabilizá-lo, respeitando as questões políticas, ambientais e financeiras. Neste contexto, a geração distribuída representa uma excelente alternativa de geração de energia elétrica [1].

A geração distribuída é caracterizada pela geração de energia elétrica, em qualquer potência, que se conecta diretamente ao sistema elétrico de distribuição ou ao consumidor. Esta geração pode trabalhar de forma paralela ou isolada ao sistema elétrico da concessionária local [2], podendo ser empregada em locais distantes das grandes centrais geradoras, pois atende localmente o consumidor. Além disso, esta apresenta confiabilidade, flexibilidade de operação, apresenta baixos impactos ambientais e o seu período de instalação é consideravelmente menor comparado com uma grande central geradora [3].

A geração distribuída também contribui para o adiamento ou a redução das obras de reforço no sistema elétrico. Uma vez que, com a instalação do gerador distribuído, este reduzirá ou não solicitará nenhuma demanda de energia proveniente da concessionária. Dependendo da capacidade instalada do gerador distribuído, este poderá, além de, suprir toda a demanda local, também enviar o excedente de energia para o sistema elétrico [4]. Assim, quando essa máquina atende apenas a carga local, esta contribui para a diminuição do carregamento dos alimentadores, o que evita obras de



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

reforço e ao enviar o excedente de sua produção para o sistema elétrico, esta contribui para o aumento da geração da concessionária [5].

A geração distribuída no Brasil é regulamentada pela Resolução Normativa N° 482 de 17 de Abril de 2012, a qual estabelece as condições gerais para o acesso do gerador distribuído ao sistema de distribuição de energia elétrica. Nesta norma, além de especificar o acesso ao sistema de distribuição, também é relatado às condições do sistema de compensação de energia elétrica, a forma de medição da energia elétrica e as responsabilidades por danos ao sistema elétrico [6].

Desta forma, com o aumento da utilização da geração distribuída no Brasil e os seus impactos positivos para o setor elétrico brasileiro, esta pesquisa destinou-se a estudar a conexão de um gerador distribuído à um alimentador de distribuição. Assim, o principal objetivo deste trabalho consiste em analisar a contribuição da geração distribuída para um alimentador de 13,8 kV, comparando os valores de tensão, potência e perdas que o alimentador apresenta sem o gerador distribuído e após a conexão do mesmo.

Para a realização deste trabalho foi empregado o *software* ATP (“Alternative Transients Program”), o qual possibilitou modelar o sistema elétrico estudado com todos os seus componentes e analisar os resultados sem/com a conexão de um gerador distribuído.

II. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico utilizado nos estudos consiste de um alimentador de distribuição de 13,8 kV, no qual está conectado seis cargas e que posteriormente receberá a conexão do gerador distribuído. Os dados deste sistema elétrico foram retirados do livro Lora, E. E. S. e Haddad, J. *Geração Distribuída - Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais*, Rio de Janeiro: Interciência, 2006 [3].

O alimentador estudado se refere ao GUL-115 da distribuidora Bandeirantes. Este alimentador se localiza na cidade de São Paulo e atende uma área residencial. Devido a capacidade do alimentador se situar próxima do seu limite, foi realizado estudos para analisar os níveis de tensão, potência e perdas após a conexão de um gerador distribuído neste alimentador, objetivando atender ao aumento da demanda.

A Figura 1 mostra o diagrama unifilar do sistema elétrico estudado.

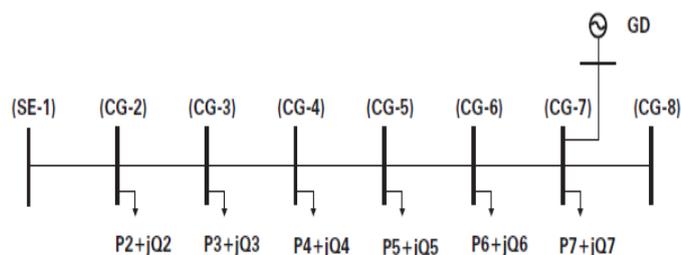


Fig. 1. Diagrama unifilar do sistema elétrico estudado.

Para a realização do estudo por meio do *software* ATP foi necessário considerar todos os componentes do sistema

elétrico sendo que as modelagens empregadas para representá-los serão apresentadas a seguir.

A. Modelagem das Cargas

O circuito elétrico do sistema em estudo é composto por seis cargas cujos valores das potências ativas e reativas foram extraídos diretamente da referência [3]. Para representar as cargas no *software* ATP foi necessário calcular os valores de resistência e indutância correspondente de cada carga. A Tabela I apresenta os valores das cargas.

Tabela I – Dados Correspondentes às Cargas.

Barramento	P[kW]	Q[kVar]	R[Ω]	L[mH]
CG2	870	275	193,86	162,52
CG3	800	255	196,51	166,16
CG4	1160	370	132,85	112,39
CG5	1260	400	121,48	102,28
CG6	470	150	323,83	274,14
CG7	2170	690	69,54	58,65

B. Modelagem da Linha de Distribuição

A linha de distribuição também necessitou ser modelada para ser representada corretamente no *software* ATP. O condutor utilizado para a linha de distribuição é o CAA 336,4. Os dados deste condutor foram retirados do catálogo do fabricante Nexans [7]. Os valores dos parâmetros desse cabo são:

$$R = 0,2051 \Omega/\text{Km}$$

$$x_L = 0,3770 \Omega/\text{Km}$$

$$x_C = 0,2266 \text{ M.}\Omega.\text{Km}$$

A partir destes dados, e considerando também a distância de cada trecho da linha de distribuição, foram calculados os valores de resistência, indutância e capacitância para cada trecho correspondente. Assim, cada ramo da linha pode ser representado através do conhecido Modelo PI, ou seja, com os valores totais de resistência e indutância colocadas em série e o valor total de capacitância dividida ao meio e inseridas em paralelo nas duas extremidades da linha [8].

A Tabela II apresenta os valores calculados para cada trecho da linha de distribuição.

Tabela II – Dados da Linha de Distribuição.

Trecho	Distância [m]	R [Ω]	L [mH]	C [μF]
SE1 - CG2	1000	0,2051	1,000	0,0117
CG2 - CG3	3000	0,6153	3,000	0,0351
CG3 - CG4	1000	0,2051	1,000	0,0117
CG4 - CG5	500	0,1025	0,500	0,0058
CG5 - CG6	500	0,1025	0,500	0,0058
CG6 - CG7	1000	0,2051	1,000	0,0117
CG7 - CG8	1000	0,2051	1,000	0,0117

C. Modelagem do Gerador Distribuído

A modelagem do gerador distribuído no *software* ATP foi realizada considerando-se o mesmo como sendo uma fonte de tensão em série com sua reatância síncrona. O gerador distribuído durante todo o estudo também foi considerado fornecendo uma potência inferior a soma das potências de todas as cargas.

Os dados do gerador distribuído fornecidos pelo livro são [3]:

$$U = 13,8 \text{ kV}$$

$S = 3 \text{ MVA}$
 $P_G = 2700 \text{ kW}$
 $Q_G = 1400 \text{ kVAr}$
 $x_s = 40,8\%$
 $V_t = 12,89 \text{ kV}$

Com esses dados foi possível calcular os parâmetros necessários para modelar o gerador no *software* ATP. Assim, os cálculos realizados foram os seguintes:

Cálculo da impedância base:

$$Z_b = \frac{U^2}{S} = \frac{(13800)^2}{3000000} = 63,48\Omega \quad (1)$$

Cálculo da reatância síncrona:

$$x_s = x_s \times Z_b = 0,408 \times 63,48 = 25,899\Omega \quad (2)$$

Cálculo da indutância:

$$L = \frac{x_s}{2 \times \pi \times 60} = \frac{25,899}{2 \times \pi \times 60} = 68,699 \text{ mH} \quad (3)$$

Cálculo do ângulo da tensão interna do gerador:

$$\delta = \arctg \left(\frac{P_G}{Q_G + \frac{V_t^2}{x_s}} \right) = \arctg \left(\frac{2700k}{1400k + \frac{(12,89k)^2}{25,899}} \right) = 19,06^\circ \quad (4)$$

Cálculo da tensão interna do gerador distribuído:

$$E_F = \frac{P_G \times x_s}{V_t \times \text{sen} \delta} = \frac{2700k \times 25,899}{12,89k \times \text{sen}(19,06^\circ)} = 16,61 \text{ kV} \quad (5)$$

Dessa forma, obtêm-se os valores do módulo e do ângulo da tensão interna do gerador distribuído, sendo que o valor da indutância calculada acima é utilizada para determinar a reatância síncrona em série.

D. Modelagem da Subestação

A subestação de potência também é representada por uma fonte de tensão em série com uma indutância no *software* ATP. Como o alimentador possui um nível de tensão nominal de 13,8 kV, a fonte de tensão que representa a SE receberá este mesmo valor para o módulo da tensão.

O ângulo da tensão também deve ser ajustado na fonte de tensão. Para se determinar este ângulo foi necessário utilizar um *software* que realiza os cálculos de fluxo de potência. Para tanto, foi utilizado o UFUFlow, o qual é um programa utilizado na UFU para esta finalidade.

A potência ativa e a potência reativa que a subestação deveria fornecer para atender às cargas foi obtida mais uma vez por meio da fonte de referência [3], sendo:

$P = 4100 \text{ kW}$

$Q = 400 \text{ kVAr}$

Entrando com todos estes dados no programa UFUFlow e processando o Fluxo de Carga, foi encontrado que o valor do ângulo da tensão para o circuito elétrico estudado é de $3,23^\circ$.

III. REPRESENTAÇÃO NO SOFTWARE ATP

Com a modelagem de todo o sistema elétrico foi possível representá-lo no *software* ATP. A Figura 2 apresenta o circuito analisado.

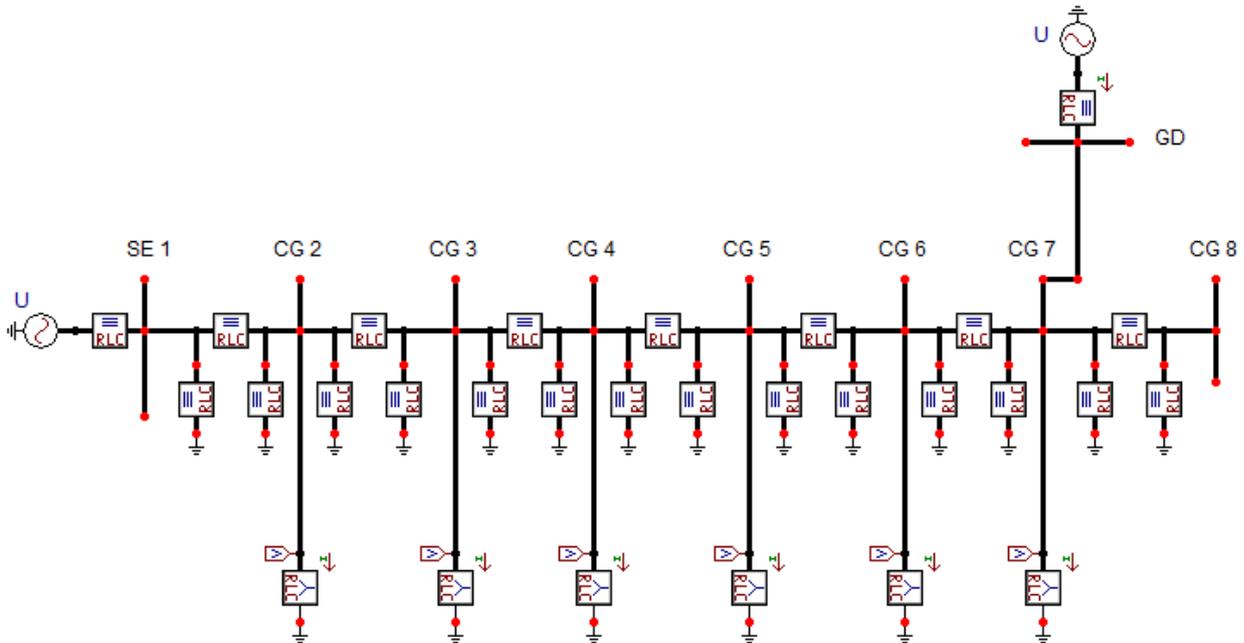


Fig. 2. Representação do sistema elétrico no *software* ATP.

IV. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Com a topologia do sistema elétrico já inserida no software ATP foi possível realizar a análise da conexão do gerador distribuído no alimentador de distribuição. A seguir serão apresentados os resultados das simulações, considerando inicialmente o sistema elétrico sem a conexão do gerador distribuído e depois os resultados com a conexão do mesmo.

A. Situação Antes da Conexão do Gerador Distribuído

Realizada a modelagem do circuito, foram observados os valores de tensão, potência e perdas do sistema antes da ligação do gerador distribuído.

Assim, os valores de tensão apresentados pelos barramentos são apresentados na Tabela III. Observando os dados desta tabela constata-se que o nível de tensão a partir do barramento da SE1 apresenta quedas em relação a tensão nominal de 13,8 kV de até 6,5%.

Tabela III – Valores de Tensão Antes do GD.

Barramento	Tensão [kV]	Tensão [pu]
SE1	13,80	1,000
CG2	13,62	0,987
CG3	13,17	0,954
CG4	13,04	0,945
CG5	12,99	0,941
CG6	12,96	0,939
CG7	12,91	0,935
CG8	12,91	0,935

O barramento no qual foi conectado o gerador distribuído é o CG7. Este apresenta 12,91 kV antes da interligação do mesmo e a tensão de linha deste barramento pode ser observada na Figura 3.

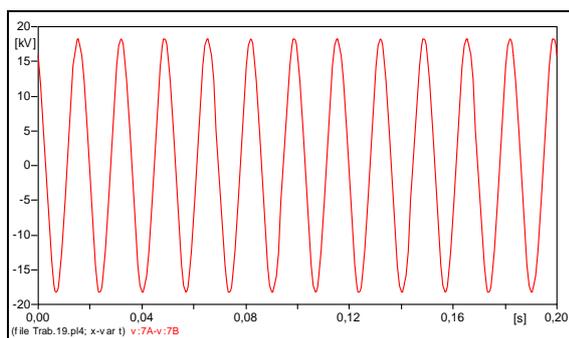


Fig. 3. Tensão de linha do barramento CG7 sem a conexão do gerador distribuído.

Os valores de potência ativa e potência reativa fornecidos pela subestação são, respectivamente, 7 MW e 2,61 MVar. Estes dados podem ser observados na Figura 4.

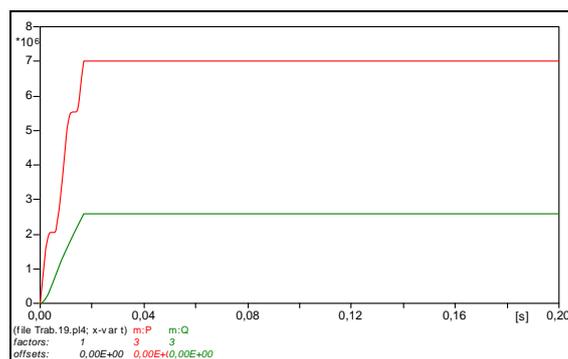


Fig. 4. Potência ativa (curva vermelha) e potência reativa (curva verde) fornecidas pela SE1 sem a conexão do gerador distribuído.

Para calcular a perda apresentada pelo sistema elétrico, foi inicialmente observado os valores das correntes presentes em cada trecho do circuito. Com os valores das resistências e correntes dos trechos foram calculados os valores das perdas em cada intervalo do alimentador. Estes dados podem ser vistos na Tabela IV.

Em seguida, somando as perdas obtidas separadamente obtém-se 254,39 kW de perdas total do sistema elétrico sem a conexão do gerador distribuído.

Tabela IV – Perdas nos Trechos Antes do GD.

Trecho	R [Ω]	I [A]	P [kW]
SE1 - CG2	0,2051	312,4	60,05
CG2 - CG3	0,6153	273,8	138,38
CG3 - CG4	0,2051	236,9	34,53
CG4 - CG5	0,1025	183,0	10,29
CG5 - CG6	0,1025	124,1	4,73
CG6 - CG7	0,2051	102,1	6,41
CG7 - CG8	0,2051	0,016	0,0002
Total			254,39

B. Situação Após à Conexão do Gerador Distribuído

Observado os valores de tensão, potência e perdas do sistema elétrico em estudo sem a influência do gerador distribuído, foi conectado o mesmo. Os resultados de tensão nos diversos barramentos são apresentados na Tabela V a seguir.

Tabela V – Valores de Tensão Após o GD.

Barramento	Tensão [kV]	Tensão [pu]
SE1	13,80	1,000
CG2	13,70	0,993
CG3	13,46	0,975
CG4	13,41	0,972
CG5	13,40	0,971
CG6	13,40	0,971
CG7	13,42	0,972
CG8	13,42	0,972

Com a análise da tabela anterior constata-se que a queda de tensão em todos os barramentos do sistema elétrico é menos acentuada comparando com os resultados de tensão sem a conexão do gerador distribuído.

O barramento CG7, o qual foi conectado o gerador apresentou uma tensão de linha de 13,42 kV e o gráfico desta tensão pode ser observado na Figura 5.

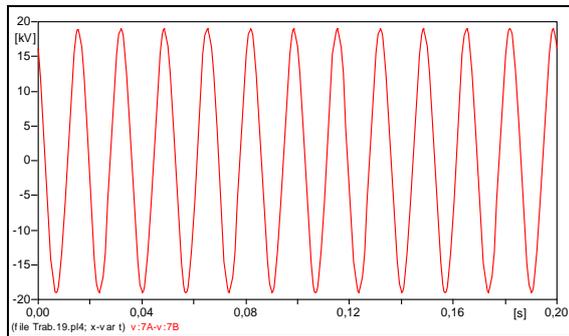


Fig. 5. Tensão de linha do barramento CG7 com a conexão do gerador distribuído.

Com a simulação também foi observado o valor das potências ativa e reativa que a SE1 passou a fornecer após a ligação do gerador distribuído, isto é, 4,59 MW e 1,17 MVar, respectivamente. Estes dados podem ser vistos na Figura 6. Assim, houve uma redução de 34,43% na potência ativa solicitada da subestação e 55,17% de redução na potência reativa.

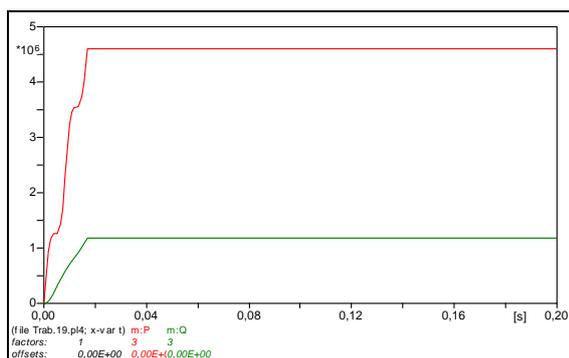


Fig. 6. Potência ativa (curva vermelha) e potência reativa (curva verde) fornecidas pela SE1 com a conexão do gerador distribuído.

Na simulação também foram determinados os valores das potências fornecidas pelo gerador distribuído, sendo de 2,63MW para a potência ativa e de 1,23 MVar para a potência reativa. Estes valores são apresentados na Figura 7.

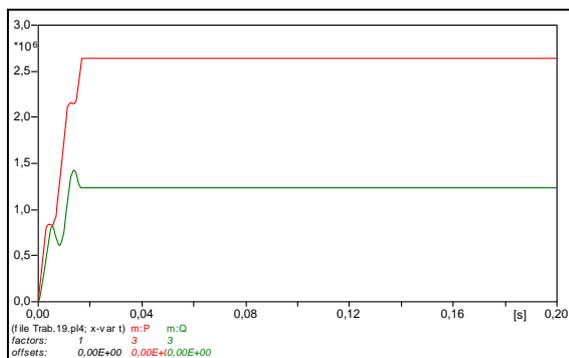


Fig. 7. Potência ativa (curva vermelha) e potência reativa (curva verde) fornecidas pelo gerador distribuído.

Com a inserção do gerador distribuído também foi observado o valor das perdas. Estas foram determinadas da mesma forma que na simulação sem o gerador, ou seja, observou primeiramente o valor das correntes em cada trecho do sistema elétrico. Em seguida o valor da perda do sistema foi calculada através da soma das perdas de cada intervalo do alimentador. Sendo as perdas separadas determinadas por meio dos cálculos utilizando os dados de resistência e corrente de cada trecho.

As perdas com o gerador distribuído foram de 82,08 kW, representando uma redução de 67,76% nas perdas comparado com o sistema sem o gerador. Os dados utilizados para os cálculos podem ser vistos na Tabela VI.

Tabela VI – Perdas nos Trechos Após o GD.

Trecho	R [Ω]	I [A]	P[kW]
SE1 - CG2	0,2051	198,2	24,170
CG2 - CG3	0,6153	159,4	46,900
CG3 - CG4	0,2051	122,0	9,160
CG4 - CG5	0,1025	67,44	1,390
CG5 - CG6	0,1025	17,22	0,091
CG6 - CG7	0,2051	24,51	0,369
CG7 - CG8	0,2051	0,017	0,0002
Total			82,08

Realizada a simulação do sistema elétrico antes da conexão do gerador distribuído e após a ligação deste, foi possível analisar a influência do gerador nos níveis de tensão. Dessa forma, a Tabela VII apresenta a diferença percentual entre os valores de tensão antes e após a ligação do gerador distribuído.

Tabela VII – Comparação dos Valores de Tensão.

Barramento	Tensão Antes [kV]	Tensão Após [kV]	Diferença Percentual
SE1	13,80	13,80	0,00 %
CG2	13,62	13,70	0,58 %
CG3	13,17	13,46	2,20 %
CG4	13,04	13,41	2,84 %
CG5	12,99	13,40	3,16 %
CG6	12,96	13,40	3,40 %
CG7	12,91	13,42	3,95 %
CG8	12,91	13,42	3,95 %

Com a análise da tabela anterior observa-se um aumento significativo na amplitude da tensão com a inserção do gerador distribuído no sistema elétrico. O barramento CG7, o qual recebeu a ligação do gerador, apresentou o maior aumento de tensão, sendo este de 3,95%. Além disso, o gerador possibilitou o aumento de tensão não apenas no barramento no qual foi inserido, mas também em todos os barramentos do sistema.

V. CONCLUSÕES

A realização desta pesquisa possibilitou observar as influências da geração distribuída nos valores de tensão, potência e perdas do sistema elétrico em estudo. Com a utilização do *software* ATP foi realizado as simulações

considerando o sistema elétrico antes da conexão do gerador distribuído e após a ligação do mesmo ao sistema.

Com a realização das simulações foi verificado os gráficos de tensão em todos os barramentos, a potência ativa e potência reativa fornecidas pela subestação e pelo gerador distribuído e, também, as perdas do sistema.

Para possibilitar uma análise mais completa dos níveis de tensão apresentados, estes dados foram expressos em tabelas contendo os valores em volts e também em por unidade. Com a observação das tabelas, dos valores antes e após a conexão do gerador distribuído, nota-se que, após a inserção do gerador, os níveis de tensão de todos os barramentos do sistema apresentaram uma melhoria. O maior aumento percentual no nível de tensão foi no barramento CG7, no qual ocorreu a conexão do gerador.

Como as potências fornecidas pelo gerador distribuído possuem um valor um pouco maior que o valor da carga ligada ao barramento CG7, este contribuiu para elevar a tensão deste barramento e também dos demais barramentos do sistema em estudo. Caso a potência do gerador fosse maior que a simulada, constataríamos uma diferença maior na elevação da tensão de todos os barramentos.

O gerador distribuído ao fornecer potência para o sistema elétrico colaborou de forma significativa para reduzir a demanda de potência ativa e reativa proveniente da subestação. Como a diminuição da potência reativa foi elevada, isto coopera para que seja possível fornecer mais potência ativa por este alimentador, melhorando, assim, o aumento da capacidade deste.

O sistema elétrico simulado com o gerador distribuído apresentou uma expressiva redução nas perdas. Isto se verifica principalmente devido a inserção do gerador contribuir para que a corrente elétrica que circula no sistema seja menor e, assim, reduza as perdas do mesmo.

Dessa forma, com a realização deste estudo foi possível analisar as contribuições que a conexão do gerador distribuído apresenta nos níveis de tensão, potência e perdas do sistema elétrico. Com a conexão deste, elevam-se os níveis de tensão dos barramentos, diminui-se a demanda solicitada da subestação, aumenta-se a capacidade de transmissão de energia do alimentador e reduzem-se as

perdas. Assim, o gerador distribuído traz grandes vantagens ao ser conectado a um alimentador de distribuição.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro dado ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] L. F. Gonçalves. *Contribuições Para o Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída*. 2004. 156 f. Dissertação (Mestre) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- [2] Requisitos para a Conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição da Cemig (2013). Acedido em 2 de Abril de 2013, em: <http://www.cemig.com.br>.
- [3] E. E. S. Lora, J. Haddad, *Geração Distribuída - Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais*, Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- [4] A. S. Filho. *Análise Regulatória das Condições de Interconexão da Geração Distribuída: Requisitos Para os Procedimentos de Distribuição*. 2005. 120 f. Dissertação (Mestre) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- [5] A. R. R. de Souza. *Conexão de Geração Distribuída em Redes de Distribuição*. 2009. 108 f. Dissertação (Mestre) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [6] Agência Nacional de Energia Elétrica (2013). *Resolução Normativa Nº 482, 17 de Abril de 2012*. Acedido em 5 de Abril de 2013, em <http://www.aneel.gov.br>.
- [7] Nexans Ficap (2013). *Alumínio*. Acedido em 9 de Maio de 2013, em <http://www.nexans.com.br>.
- [8] D. R. Fuchs. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*, 2ª ed., Rio de Janeiro: LTC/EFEI, 1979.