



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT 29  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO II**

### **GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS**

#### **ESTUDO DO IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOBRE AS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E SUBTRANSMISSÃO DE ENERGIA UTILIZANDO TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTICRITERIAIS**

**Alexandre Barin \*      Luis Pozzatti      Luciane Canha  
Ricardo Machado      Alzenira Abaide      Felix Farret**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM**

**Carlos Fernandes**

**COMPANHIA ESTADUAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CEEE-D**

## **RESUMO**

A presença da geração distribuída (GD), por meio da inserção de auto-produtores e produtores independentes nos sistemas elétricos, pode representar impactos significativos nas características operacionais das redes de distribuição, atingindo até, em casos mais extremos, o adequado funcionamento das subestações de energia elétrica. Por esta razão, novos métodos para identificação destes impactos precisam ser desenvolvidos com objetivo de analisar e evitar a operação inadequada dos sistemas elétricos. Durante o desenvolvimento deste trabalho pretende-se, além de descrever as principais conseqüências da aplicação da GD, observar o comportamento de um alimentador durante a instalação de uma fonte de GD, através da análise de perdas de potência, níveis de tensão e potência de curto-circuito.

Além disso, este estudo apresentará o emprego de análises multicriteriais, definindo-se parâmetros quantitativos e qualitativos a serem aplicados em uma metodologia utilizando o algoritmo de Bellman-Zadeh e a Lógica Fuzzy, com o objetivo de identificar a localização mais adequada de uma fonte de geração distribuída em um sistema de distribuição.

Deve-se observar que, a partir da localização adequada da fonte de GD, busca-se evitar, além de prejuízos nas características operacionais do sistema (em relação a perdas, níveis de tensão e freqüência), o surgimento de conseqüências negativas aos parâmetros de operação da sub-transmissão.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Geração Distribuída, Análise Multicriterial, Sistema de Distribuição, Lógica Fuzzy, Bellman-Zadeh.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Avaliando o momento atual do setor energético brasileiro, percebe-se a crescente necessidade de se encontrar novos caminhos para o avanço dos setores de distribuição de energia elétrica. Desta forma a inserção de fontes de geração distribuída apresenta-se como uma alternativa estratégica para o desenvolvimento do sistema. A adequada localização das fontes de GD é um importante aspecto citado nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 3 (1), sendo este um instrumento orientativo criado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). É importante observar que após a aprovação do PRODIST, este irá nortear os diversos processos que envolvem o planejamento e a operação dos sistemas de

distribuição. Desta forma, este trabalho pretende seguir as orientações do PRODIST, apresentando como resultado final da metodologia desenvolvida os dois locais mais adequados para a instalação de uma fonte de GD. Embora possua pouca penetração no mercado nacional, em países desenvolvidos, como por exemplo, EUA e Canadá, as fontes descentralizadas de geração já são utilizadas em larga escala, garantido a melhoria do desempenho e da confiabilidade nas redes elétricas (2).

A localização adequada para instalação de fontes de GD em redes de distribuição, buscando-se evitar prejuízos nas condições operacionais do sistema, pode ser realizada a partir de métodos de tomada de decisão multicriteriais (3,4) que podem levar em consideração os mais variados critérios de ordem quantitativa e qualitativa, conforme o interesse da empresa fornecedora de energia. Quanto aos critérios quantitativos, é possível considerar, por exemplo, violação dos níveis de tensão, carregamento dos cabos, perdas de potência e energia, número de consumidores atendidos, custos, entre outros. Em relação aos critérios qualitativos podem ser incluídos parâmetros como: acesso (ao local de instalação da fonte de GD), segurança, espaço físico (para a instalação da fonte de GD), serviços auxiliares (reserva de prontidão, capacidade auto-restabelecimento ou “black start”, reserva de potência), etc.

Neste estudo, pretende-se fazer uso de análises multicriteriais baseadas no algoritmo de Bellman-Zadeh e em Lógica Fuzzy (3,5), visando determinar a localização mais adequada de uma fonte de GD em um sistema de distribuição. Um importante fato a ser considerado é que os parâmetros podem ser estabelecidos de acordo com o interesse da empresa fornecedora de energia, para cada projeto proposto. Finalmente deve-se observar que a metodologia proposta neste estudo pode ser aplicada tanto na análise de um sistema de distribuição com intuito de determinar qual é o alimentador mais adequado a se instalar a fonte de GD, quanto em determinados alimentadores buscando especificamente qual é o local dentro de cada alimentador onde deve ser instalada a fonte de GD.

## 2.0 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE AS FONTES DE GD

Através da correta localização das fontes de geração distribuída, observa-se uma significativa redução nas perdas de potência (6) e uma grande melhoria nos níveis de tensão (2), colaborando para a redução destes níveis no período de pico. Este impacto contribui para que o sistema opere em condições próximas ao ideal.

Em se tratando do meio ambiente, as fontes renováveis de energia reduzem emissão de gases e, conseqüentemente, colaboram para redução do efeito estufa. Além disso, GDs não são restritas à potências centralizadas de fornecimento de energia, podendo estas serem alocadas em pontos estratégicos, atendendo de forma adequada aos seus consumidores ao longo da rede. Com isso, abrem-se caminhos para uma nova forma de reestruturação do sistema elétrico, diversificando as possibilidades na instalação destas fontes, o que proporciona uma maior flexibilidade no planejamento das redes de distribuição.

Por outro lado é importante observar que a injeção de potência destas fontes descentralizadas em lugares inapropriados, sem a regulação dos meios de controle de tensão, pode resultar em um aumento nas perdas de potência no sistema e em indesejáveis níveis de tensão, fora dos limites aceitáveis estabelecidos pela ANEEL (7). Como resultado, essas conseqüências podem ocasionar um aumento dos custos de operação, manutenção e planejamento (futuras expansões na rede), e até implicar em severas multas às companhias fornecedoras de energia. Um outro fato a ser verificado é que a geração distribuída pode introduzir um fluxo de potência reverso, interferindo no sistema de proteção da rede. Por estas razões a adequada localização da GD é de extrema importância, não apenas pelo fato de algumas destas fontes de GD exigirem determinadas condições geográficas, mas também pela possibilidade de ocorrência da degradação na confiabilidade da rede e na qualidade da energia fornecida aos consumidores.

## 3.0 - PROTÓTIPO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um protótipo de um sistema de distribuição foi desenvolvido com o software DigSilent®, com intuito de verificar o impacto da adequada localização da GD sobre perdas de potência e níveis de tensão. O modelo apresentado na Figura 1 é caracterizado por um alimentador em 13.8kV com 22 transformadores conectados à rede primária (13.8kV/380Y/220Δ). Ligado a cada alimentador há um grupo de consumidores, sendo estes caracterizados através de diferentes curvas de carga. A distância da Subestação (SE) até o último conjunto de consumidores G é de 105,4Km. Neste ponto foi conectada a rede uma fonte de geração distribuída de 130kVA, equivalente a 13% da demanda total do alimentador às 19h (horário de pico máximo). O objetivo desta fonte, neste caso específico, é gerar energia apenas entre os horários das 18 às 21h. Abaixo, podem-se observar os valores dos níveis de tensão nominal (TN) adequados para entrega ao consumidor, além dos limites precários e críticos, estabelecidos pela Resolução 505, 26 de novembro de 2001 – ANEEL (7).

- Níveis de Tensão Adequados (V):  $201 \leq TN \leq 231$ ;
- Limites dos Níveis Tensão Precários (V):  $189 \leq TN < 201$  ou  $231 < TN \leq 233$ ;
- Limites dos Níveis Tensão Críticos (V):  $TN < 189$  ou  $TN > 233$ .

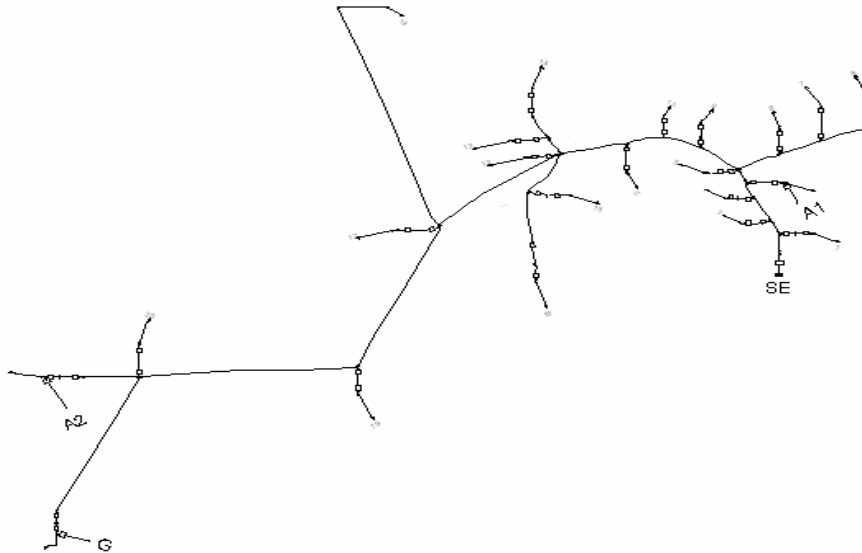


Figura 1 – Alimentador protótipo utilizado como base de estudo no software DigSilent®.

### 3.1 Análise dos resultados

Analisando o comportamento do sistema apresentado na Figura 1, após a adequada localização das unidades de GD, foi observado um impacto positivo no comportamento do sistema de distribuição, proporcionando a redução nas perdas e melhoria dos níveis de tensão. Os resultados das alterações nas perdas de potências e nos níveis de tensão podem ser verificados na Tabela 1, apresentada a seguir.

Tabela 1 – Análise nos níveis de tensão do grupo de consumidores localizados ao nó G e perdas de potência detectadas em todo sistema, com e sem a conexão da fonte de GD ao nó G.

Horas	Níveis de Tensão (v) - nó G			Perdas (p) em todo sistema		
	Sem DG	Com DG	$\Delta v$ (%) com DG	Sem DG	Com DG	$\Delta p$ (%) com DG
(h)	V	V	(%)	kW	kW	(%)
18	198,9	226,2	+ 13,7	38,2	18,8	- 50,7
19	193,4	222,1	+ 14,8	53,3	28,0	- 47,5
20	197,8	225,5	+ 14,1	38,5	18,2	- 52,6
21	202,2	228,5	+ 13,2	27,8	12,1	- 56,6

Nesta tabela observa-se uma considerável elevação nos níveis de tensão durante a atuação do gerador de 130kVA. Um fato importante a ser considerado é a elevação do nível de tensão neste nó às 21h. Neste momento o nível de tensão chega a 228,5V, quase extrapolando a faixa adequada estabelecida pela ANEEL, que deve permanecer abaixo de 231V. Embora a demanda máxima (kW) no conjunto de consumidores no nó G ocorra às 19h, provocando o menor valor na tensão em regime normal de funcionamento, (193,4V sem a atuação do gerador), deve-se sempre analisar todas as demandas dos horários onde haverá a atuação do gerador, para evitar a extrapolação dos limites de tensão adequados para fornecimento. Além disso, pode-se verificar a conseqüente redução das perdas em todo o alimentador, ou seja, em todos os trechos de rede à montante ao local de operação da fonte de GD até a SE.

### 4.0 - REGIME TRANSITÓRIO E POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO

Dependendo da posição em que é inserida uma fonte de GD em relação à fonte principal (SE) e aos equipamentos de proteção, têm-se diferentes alterações nos níveis de curto-circuito. Quando a GD é conectada conforme mostra a Figura 2 – (a), esta contribui para um aumento na corrente de curto-circuito que passa pelo religador. Isso fará com que tanto o religador quanto os demais equipamentos de proteção operem com maior velocidade, exigindo um redimensionamento nas curvas de calibração, com o objetivo de que não se perca a coordenação com os outros dispositivos de proteção do sistema. A situação apresentada na Figura 2 – (b) indica que ocorre uma diminuição na corrente de curto-circuito vista pelo religador. Nesse caso é preciso aumentar a sensibilidade do religador para que este possa atuar numa situação de falha. Na terceira hipótese, a inserção da fonte de GD causa uma inversão no sentido da corrente visto pelo religador (Figura 2 – (c)). Aqui, há duas soluções cabíveis: realocação do religador ou substituição do religador por um relé direcional.

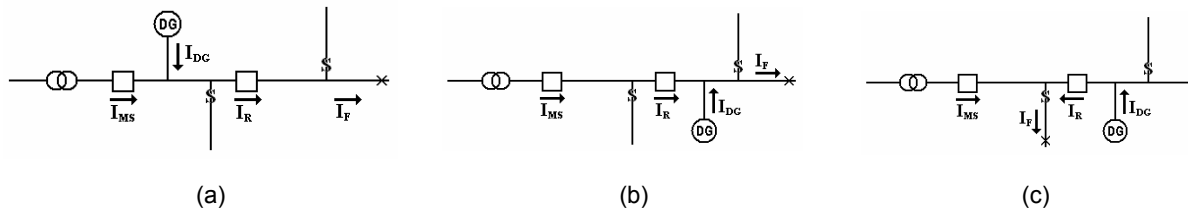


Figura 2 – (a) representa a inserção de uma fonte de GD antes do religador e do ponto de curto-circuito; (b) representa a inserção de uma fonte de GD entre o religador e o ponto de curto-circuito; (c) representa a inserção de uma fonte de GD após o religador e o ponto de curto-circuito.

Onde:  $I_{MS}$ : parcela da corrente de curto-circuito fornecida pela rede principal;  $I_{DG}$ : parcela da corrente de curto-circuito fornecida pela fonte de GD;  $I_R$ : parcela da corrente de curto-circuito que circula pelo religador;  $I_F$ : corrente de curto-circuito.

Durante o desenvolvimento deste estudo a corrente de curto-circuito será analisada em função da potência de curto-circuito ( $P_{cc}$ ) e aplicada como critério quantitativo. A potência de curto-circuito representa a capacidade do sistema de energia de controlar a variação de tensão elétrica em um ponto, podendo ser compreendido como a capacidade da rede de aceitar perturbações. Neste trabalho serão avaliadas, em regime transitório, as conseqüentes alterações de freqüência a partir das simulações realizadas com determinadas variações de  $P_{cc}$ .

Seguindo as orientações do PRODIST, a freqüência do sistema deve ser mantida dentro de certos limites em determinadas situações, como segue:

- operando em regime permanente, deve-se manter a freqüência dentro dos limites de 59.9 Hz e 60.1 Hz;
- em situações de distúrbios no sistema de distribuição, a freqüência deve retornar à faixa de 59.5 Hz a 60.5 Hz no período de 30s.

Assim sendo, esta análise foi realizada considerando o valor mínimo de  $P_{cc}$  da rede igual ao valor da carga total instalada no sistema de distribuição somada ao valor da potência do gerador (aproximadamente 13% da carga total instalada). Isto se justifica pelo fato de que na pior situação de curto-circuito (dentro do gerador), o gerador passará a ser visto pelo sistema também como uma carga.

## 5.0 - EXEMPLO PRÁTICO COM APLICAÇÃO DE ANÁLISE MULTICRITERIAL

Um dos principais critérios (parâmetros) que deve ser analisado para se encontrar o local mais adequado para instalação das fontes de GD é o critério de perdas de energia (6). Por outro lado, este critério não pode ser adotado como o único fator de tomada de decisão. Desta forma, com objetivo de obterem-se resultados mais harmônicos, devem ser levados em consideração não apenas um, mas diversos critérios, tanto quantitativos como qualitativos. É importante observar que estes critérios são escolhidos de acordo com o interesse de cada companhia fornecedora de energia. Vários artigos apresentaram o uso de algoritmos inteligentes para otimizar a localização de fontes de GD (4,5,6). Assim, através de um processo de tomada de decisão multicriterial utilizando o algoritmo de Bellman-Zadeh em conjunto com a lógica fuzzy (3,5), este estudo pretende encontrar o local mais adequado para a instalação de uma fonte de GD, buscando evitar prejuízos nas condições operacionais do sistema (em relação a perdas, níveis de tensão e freqüência). Visa-se, desta forma, a redução de conseqüências negativas sobre os parâmetros operacionais da sub-transmissão e a preservação do adequado regime de funcionamento das subestações.

### 5.1 Análise Quantitativa e Lógica Fuzzy

Resumidamente, a Lógica Fuzzy é uma técnica inteligente que faz uso da representação da forma humana de pensar, simulando a habilidade de tomar decisões em ambientes imprecisos, permitindo-se lidar com problemas de natureza incerta ou nebulosa (Fuzzy). Em diversos artigos empregou-se o uso da lógica Fuzzy em modelos de sistemas de distribuição (3,5). Neste trabalho a lógica Fuzzy será aplicada na análise de critérios quantitativos, levando em consideração que esses resultados podem ser quantificados e facilmente aplicados nesta lógica. Com relação aos conjuntos de pertinência Fuzzy, seus modelos de curva podem variar de acordo com o comportamento de cada parâmetro. Neste artigo foram avaliados dois tipos de funções as quais melhor caracterizam os critérios escolhidos.

Com o objetivo de validar a metodologia apresentada neste trabalho, foi desenvolvido um exemplo prático, considerando uma Subestação com 6 alimentadores (sistema em 13.8 kV). Seguindo a orientação apresentada no PRODIST - módulo 3 (ANEEL), serão determinados os dois locais mais adequados para a instalação de uma fonte de GD de potência fixa. Para isso serão avaliados tanto parâmetros quantitativos como qualitativos, estabelecidos de acordo com os interesses da companhia fornecedora de energia.

Em relação aos critérios quantitativos, avaliaram-se os seguintes parâmetros: violação dos níveis de tensão ( $V_{TN}$ ), perdas de potência ( $P_e$ ) e carregamento dos cabos da rede ( $C_{cb}$ ), analisados em regime permanente, e potência de curto-circuito ( $P_{cc}$ ) analisada em regime transitório. Seguindo as análises gráficas das funções de pertinência fuzzy definidas para cada parâmetro, atribuíram-se os devidos valores de ( $x$ ) para análise de cada critério, encontrando desta forma os níveis de prioridade  $\mu(x)$  para cada função.

Para a análise da violação dos níveis de tensão deve-se ter conhecimento dos seguintes valores dos níveis de tensão nominal (TN) adequados para entrega ao consumidor em 13.8kV, além dos limites precários e críticos. Estas restrições são estabelecidas pela Resolução 505, 26 de novembro de 2001 – ANEEL (7).

- Níveis de Tensão Adequados (kV):  $12.83 \leq TN \leq 14.49$ ;
- Limites dos Níveis Tensão Precários (kV):  $12.42 \leq TN < 12.83$ ;
- Limites dos Níveis Tensão Críticos (kV):  $TN < 12.42$  ou  $TN > 14.49$ .

Para a análise dos parâmetros de violação dos níveis de tensão, de perdas e de potência de curto-circuito utilizou-se uma função trapezoidal. A definição básica desta função é estabelecida pelas fórmulas apresentadas na Equação 1. Nesta equação apresentam-se as relações entre os valores dos critérios ( $x$ ) com seus níveis de prioridade  $\mu(x)$ .

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \text{ ou se } x > d \\ 1 & \text{se } b < x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)}{(b-a)} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & \text{se } c < x \leq d \end{cases} \quad (1)$$

Para a análise do parâmetro de carregamento dos cabos fez-se uso de uma função linear. Nesta função, a relação entre os valores atribuídos aos parâmetros ( $x$ ) com seus níveis de prioridade  $\mu(x)$  é estabelecida diretamente, pela análise gráfica da mesma.

A função de pertinência trapezoidal, utilizada para análise de perdas de potência, esta representada na Figura 3 – (a), enquanto a função de pertinência linear crescente, utilizada para análise do carregamento dos cabos, esta representada na Figura 3 – (b). Na Figura 3 – (c) apresenta-se uma variação da função trapezoidal, utilizada para a análise dos níveis de tensão. A Figura 3 – (d) representa uma variação da função trapezoidal, utilizada para a análise da potência de curto-circuito ( $P_{cc}$ ). Este valor mínimo de  $P_{cc}$  será representado na curva de pertinência fuzzy utilizada na análise como  $1x$ . Isto significa que as variações na frequência da rede extrapolam os limites estabelecidos no PRODIST. Por outro lado, quando a  $P_{cc}$  da rede é  $10x$  superior ao valor considerado mínimo, os valores de frequência estão próximos do ideal (60hz), entrando na faixa admissível estabelecida pelo PRODIST.

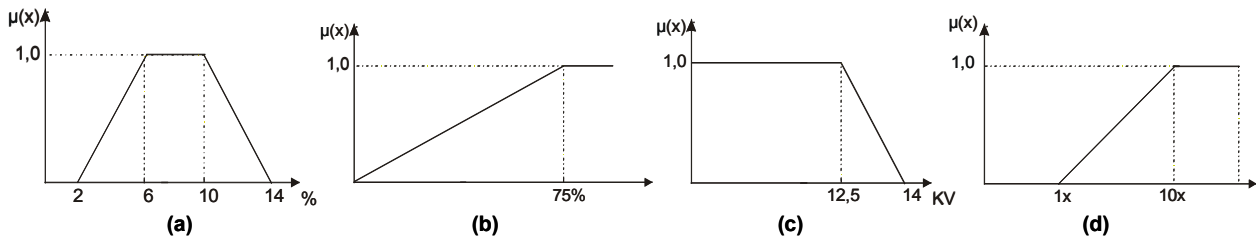


Figura 3 – (a), (c) e (d) Funções de pertinência trapezoidal; (b) Função de pertinência linear.

Onde: na Figura (a),  $a = 2\%$ ,  $b = 6\%$ ,  $c = 10\%$  e  $d = 14\%$ ; na Figura (c),  $c = 12,5kV$  e  $d = 14kV$ ; na Figura (d),  $a = 1x$  e  $b = 10x$ .

## 5.2 Análise Qualitativa

Esta sessão apresenta algumas considerações básicas sobre o método de análise qualitativa e de estimativa de especialistas. Em geral, as estimativas devem ser realizadas por um conjunto de especialistas, proporcionando uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Como passo inicial, os especialistas devem realizar a ordenação dos critérios sob o ponto de vista de sua importância. Na Equação 2, abaixo, está apresentado um exemplo desta análise, onde os parâmetros ( $X_i$  e  $X_j$ ) são analisados, implicando em um fator  $x_{ij}$  para cada par de parâmetros comparados.

$$X_i \succ X_j \rightarrow x_{ij} = 1,5; x_{ji} = 0,5 \quad X_i \approx X_j \rightarrow x_{ij} = x_{ji} = 1 \quad (2)$$

Neste trabalho foram avaliados os seguintes parâmetros qualitativos: acesso, segurança, espaço físico, capacidade auto-restabelecimento e reserva de prontidão (pertencentes aos serviços ancilares estabelecidos pela ANEEL). Primeiramente, quatro especialistas avaliaram a importância entre os parâmetros, comparando-os entre si. Desta forma, seguindo a Equação 2, foram assumidos valores para esta comparação a partir da opinião dos especialistas. No passo seguinte, deve-se construir a Tabela 2 de forma a facilitar a aplicação desta metodologia. Para preencher as colunas desta tabela devem-se calcular as seguintes variáveis:

a) Estimativa média  $k_1$  para cada par de parâmetros, definida através da Equação 3:

$$k_1 = \frac{\sum x_{ij}}{m} \quad (3)$$

Onde:  $x_{ij}$  = estimativa do nível de importância, obtida através da equação 2.  
 $m$  = o número de especialistas.

b) Estimativa  $k_2$ , apresentada na Equação 4, tomando como base os valores de  $k_1$  definidos na Equação 3.

$$k_2 = 2 - k_1 \quad (4)$$

A Tabela 2, apresentada a seguir, é completada com as informações da Equação 2, juntamente com as soluções obtidas das Equações 3 e 4.

TABELA 2 – Ordenação das estimativas

Pares de Parâmetros	Especialistas				Estimativas	
	1	2	3	4	$k_1$	$k_2$
$x_1, x_2$	1,5	1,0	1,5	1,5	1,375	0,625
$x_1, x_3$	1,5	1,5	1,0	1,5	1,375	0,625
$x_1, x_4$	1,5	1,5	1,5	1,0	1,375	0,625
$x_1, x_5$	1,5	1,5	1,5	1,0	1,375	0,625
$x_2, x_3$	1,5	1,5	0,5	1,5	1,250	0,750
$x_2, x_4$	1,5	1,5	1,0	0,5	1,125	0,875
$x_2, x_5$	1,5	1,5	1,0	0,5	1,125	0,875
$x_3, x_4$	1,5	1,5	1,5	0,5	1,250	0,750
$x_3, x_5$	1,5	0,5	1,5	0,5	1,000	1,000
$x_4, x_5$	1,0	0,5	1,0	1,0	0,875	1,125

Calculados os valores de  $k_1$  e  $k_2$ , verificados na Tabela 2, constrói-se a Tabela 3 (comparação entre os parâmetros). Na janela central desta tabela todas as células que ficam acima da diagonal principal da matriz são completadas com os dados que estão na coluna  $k_1$  da Tabela 2. Células que ficam abaixo da diagonal principal desta mesma matriz são completadas com os dados da coluna  $k_2$  também extraídos da Tabela 2. Para completar o preenchimento da Tabela 3, calcula-se o coeficiente de prioridade para cada fator  $k_p$ , definido a partir da Equação 5:

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n(n-1)} \quad (5)$$

Onde  $n$  é o número de parâmetros que devem ser comparados.

Fazendo uso da Equação 5 e da metodologia apresentada, encontraram-se os valores de  $k_p$  para cada um dos parâmetros, conforme apresenta a Tabela 3.

TABELA 3 – Coeficiente de prioridade de cada parâmetro

Parâmetros	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$\Sigma$	$k_p$
$x_1$	-	1,375	1,375	1,375	1,375	5,500	0,275
$x_2$	0,625	-	1,250	1,125	1,125	4,125	0,206
$x_3$	0,625	0,625	-	1,250	1,000	3,500	0,175
$x_4$	0,625	0,750	0,875	-	0,875	3,125	0,156
$x_5$	0,875	0,750	1,000	1,125	-	3,750	0,187

No passo seguinte da análise, avalia-se o nível de influência de cada um dos parâmetros para cada objeto, por exemplo, através de uma escala de 0 a 10. Desta forma, cada especialista atribuirá uma nota para cada parâmetro, avaliando separadamente a relação existente entre estes parâmetros e cada objeto em estudo. Na análise prática realizada neste trabalho, cada um dos 4 especialistas atribuiu 5 notas, uma para cada um dos 5 parâmetros em questão. Os 6 locais possíveis para instalação de uma fonte de GD foram analisados separadamente.

A Tabela 4 foi elaborada através da multiplicação das médias das notas atribuídas pelos especialistas, para cada parâmetro, pelo correspondente valor do coeficiente  $k_p$ , definido para cada um dos parâmetros na Tabela 3. Depois de realizada a soma dos valores das linhas da Tabela 4, encontram-se as prioridades através da normalização dos valores encontrados na coluna " $\Sigma$ ". Assim, divide-se cada uma das linhas desta coluna pelo valor máximo verificado na mesma. Os resultados são transportados para a coluna "Prioridade QA", onde se obtém os valores finais normalizados desta análise.

TABELA 4 – Definição das características integrais dos objetos

ALs	Multiplicação das médias de cada parâmetro por $k_p$					$\Sigma$	QA
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$		
1	2,227	1,444	1,575	1,251	1,612	8,109	0,982
2	2,337	1,856	1,487	1,125	1,143	7,948	0,963
3	2,475	1,691	1,663	1,078	1,350	8,257	1,000
4	2,117	1,630	1,347	0,953	1,237	6,331	0,767
5	1,981	1,877	1,417	0,906	1,537	6,812	0,825
6	2,475	1,505	1,312	1,172	1,031	7,495	0,908

### 5.3 Análise Final

Nesta etapa os resultados finais das análises qualitativas e quantitativas são avaliados de forma conjunta, considerando as Equações 6 e 7, apresentadas abaixo.

$$Y(x) = \arg \min \mu(x) \quad (6) \qquad X^0 = \arg \max Y(x) \quad (7)$$

Onde  $Y(x)$  representa o índice final e  $X^0$  indica o ranking dos locais mais adequados para a instalação da fonte de GD. Estes resultados são apresentados na Tabela 5, onde foram enfatizados os dois alimentadores indicados para instalação da fonte de GD.

TABELA 5 – Ranking Final

ALs	$V_{TN}$	$C_{cb}$	$P_e$	$P_{cc}$	QA	$Y(x)$	$X^0$
1	0,226	0,933	1,000	1,000	0,982	0,226	5°
2	0,320	0,800	0,525	0,944	0,963	0,320	2°
3	0,200	0,907	0,400	0,922	1,000	0,200	6°
4	0,593	0,733	1,000	0,466	0,767	0,466	1°
5	0,933	0,466	0,375	0,244	0,825	0,244	4°
6	0,733	0,560	0,800	0,300	0,908	0,300	3°

## 6.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresenta um estudo visando à adequada localização de uma fonte de GD em um sistema de distribuição. Neste trabalho são abordadas algumas considerações básicas em relação à operação das fontes de GD nas redes de distribuição. Além disso, foram demonstradas as alterações nos níveis de frequência (análise da potência de curto-circuito) durante a operação de uma fonte de GD em um sistema de distribuição. Posteriormente, fazendo uso do software DigSilent®, foram analisados resultados de perdas de potência e de níveis de tensão (regime permanente).

O objetivo principal deste trabalho é apresentar a aplicação de uma metodologia de análise multicriterial que leve em conta critérios quantitativos e qualitativos aplicados em conjunto a lógica fuzzy, na identificação dos locais mais adequados para a instalação de uma fonte de GD. O artigo apresenta um exemplo prático cujos resultados foram obtidos a partir de um protótipo de sistema de distribuição. Desta forma, fazendo uso das devidas análises provenientes da metodologia aqui aplicada, obteve-se um ranking dos locais mais adequados à instalação de uma fonte de GD. Esta metodologia pode ser aplicada em um conjunto de alimentadores ou em um único AL com o objetivo de identificar os melhores locais para instalação de fontes de GD. Levando em consideração as indicações do PRODIST, juntamente com o constante crescimento da utilização da GD nos sistemas de distribuição, preocupando-se com a qualidade e a confiabilidade das redes elétricas, é necessário reconhecer que a correta localização das fontes de GD é fator preponderante no desenvolvimento e planejamento das redes de distribuição.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (Módulo 3), 2006.
- (2) Oak Ridge National Laboratory / U.S. Department Of Energy: Connecting Distributed Energy Resources to the Grid: Their benefits to the der owner/customer, the utility, and society, February 2002.
- (3) Ramírez-Rosado, J., Domínguez-Navarro, J. A.; Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks, IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 4, 2004.
- (4) Nara, K., Hayashi, Y., Ikeda, K., Ashizawa, T.; Application of tabu search to optimal placement of distributed generators; Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 2, pp. 918-923; January, 2001.
- (5) Kyu-Ho Kim, Yu-Jeong Lee, Sang-Bong Rhee, Sang-Kuen Lee, Seok-Ku You; Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems; Dept. of Electr. Eng, Ansan Coll. of Tech, South Korea, Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Vol 3, pp. 1148- 1153; 2002.
- (6) Griffin, T., Tomsovic, K., Secrest, D., Law, A.; Siting of dispersed generation systems for reduced losses; in Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Systems Sciences, 2000.2004.
- (7) Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 505, 26 de novembro de 2001.

## 8.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEEE-D e ao programa CAPES/PRODOC, por seu apoio financeiro e também pelas informações do sistema elétrico que foram disponibilizadas.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Alexandre Barin – Barin, A.

Nascido em Santa Maria, RS em 04 de agosto de 1980;

Graduação (2005) em Engenharia Elétrica: UFSM – Universidade Federal de Santa Maria –RS;

Mestrando do PPGEE da Universidade Federal de Santa Maria.

Luis Pozzatti – Pozzatti, L.

Nascido em Santa Maria, RS em 05 de maio de 1980.

Graduação (2004) em Engenharia Elétrica: UFSM – Universidade Federal de Santa Maria -RS

Mestrando do PPGEE da Universidade Federal de Santa Maria.

Luciane Neves Canha

Nascida em Santa Maria, RS em 16 de março de 1971.

Doutora em Engenharia Elétrica (2004): UFSM – Universidade Federal de Santa Maria -RS

Professora Adjunta do Curso de Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria

Ricardo Machado – Machado, R.

Nascido em Santa Maria, RS em 12 de dezembro de 1970.

Doutor em Engenharia Elétrica (2005): UNICAMP – Universidade de Campinas

Bolsista CAPES/PRODOC

Alzenira Abaide - Abaide

Nascido em Santa Maria, RS em 04 de setembro de 1957.

Doutora em Engenharia Elétrica (2005): UFSM – Universidade Federal de Santa Maria -RS

Professora Adjunta do Curso de Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria

Felix Farret – Farret, F.

Nascido em Santa Maria, RS em 02 de novembro de 1947.

PhD em Engenharia Elétrica (1984): Universidade de Londres, Inglaterra

Professor Titular do Curso de Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria

Carlos Eduardo Monteiro Fernandes - Fernandes, C. E. M.

Nascido em Presidente Prudente, SP em 20 de outubro de 1979;

Graduação (2002) na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul;

Mestrado (2006) em Sistemas de Potência na Universidade Federal de Santa Catarina.