



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Avaliação dos Impactos das Gerações Distribuídas em Sistemas de Distribuição utilizando Métodos de Tomada de Decisão Multicriteriais e Lógica Fuzzy

Alexandre Barin	Luciane Neves Canha	Ricardo Quadros Machado
UFSM	UFSM	USP
chbarin@gmail.com	lncanha@ufsm.ct.br	ricardombr2002@yahoo.it
Alzenira da Rosa Abaide	Gustavo Arend	Heiner Niehues
UFSM	CEEE-D	UFSM
alzenira@ct.ufsm.br	GustavoA@ceee.com.br	heiner@megatecnologia-si.com

Palavras-chave

Análise Multicriterial, Critérios Qualitativos, Geração Distribuída, Lógica Fuzzy.

Resumo

Avaliando o momento atual do setor elétrico brasileiro, percebe-se a crescente participação das fontes de geração distribuída (GD) neste setor. Esta situação mostra uma tendência irreversível: a geração descentralizada, tanto nos níveis de operação em 138 kV e 69 kV quanto em 23 kV e 13,8 kV, terá uma presença significativa nos próximos anos.

Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados provenientes do projeto de P&D realizado na UFSM, no qual foi desenvolvido um software (ASD-GD) para analisar a influência da GD sobre as características operacionais dos sistemas de distribuição da CEEE-D. Este software toma como base métodos multicriteriais, utilizando a lógica fuzzy e uma metodologia para a avaliação de critérios qualitativos, visando indicar a localização mais adequada de uma fonte de GD. Esta indicação visa atender as orientações apresentadas no PRODIST, módulo 3.

O software livre GARP3® foi utilizado para demonstrar a importância dos parâmetros qualitativos em relação ao local de instalação da GD.

Este estudo permite que a concessionária de energia avalie a utilização de quaisquer parâmetros de acordo com seu interesse, podendo ser utilizado tanto na análise de um sistema de distribuição com vários alimentadores quanto na análise de um único alimentador, visando determinar os melhores locais para instalação de fontes de GD.

¹UFSM – Universidade Federal de Santa Maria (RS, Brasil);

USP – Universidade de São Paulo (SP, Brasil);

CEEE-D – Companhia Estadual de Energia Elétrica: Setor de Distribuição de Energia Elétrica (RS, Brasil).

1. Introdução

A expansão da geração distribuída (Ackermann, Andersson & Soder, 2000) requer estudos apropriados e análises minuciosas dos sistemas de distribuição que possuem a conexão destas fontes de geração de energia. Deve-se observar que a apropriada conexão das fontes de geração distribuída na rede, se realizada de forma ordenada e com estudos elétricos prévios sobre a localização, potências geradas e respectivas horas de atuação, tende a proporcionar uma significativa melhoria das características técnicas e econômicas do sistema (Dugan & Price, 2004). De outra forma, a entrada destas novas fontes de energia sem o devido estudo pode causar vários transtornos ao sistema, acarretando em problemas de natureza gerencial, regulatória e operacional, sendo estes aspectos constantemente analisados na atual realidade das concessionárias de energia brasileiras.

Em relação à natureza regulatória da geração distribuída, 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, 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. A partir disso, este trabalho pretende seguir as orientações do PRODIST de forma a possibilitar a identificação dos dois locais mais adequados para a instalação de uma fonte de GD.

Em se tratando da natureza operacional, se as concessionárias de energia, através do acesso e da utilização destes estudos técnicos, estiverem preparadas para enfrentar as prováveis alterações que irão surgir em seus sistemas, poderão obter consideráveis avanços nos sistemas de distribuição de energia. Este fato irá proporcionar, a partir dos diferentes meios e pontos de geração de energia, em significativos aumentos nos rendimentos das empresas e na confiabilidade dos sistemas de distribuição. (Bouskelá, 2004).

A partir do apropriado desenvolvimento das questões regulatórias e operacionais, cabe às concessionárias de energia o gerenciamento da participação das fontes de GD em seus sistemas de distribuição, desenvolvendo constantes estudos que avaliem a conexão e operação destas fontes.

Há vários métodos para analisar o impacto da GD em sistemas de distribuição (Ramirez-Rosado & Dominguez-Navarro, 2006). Estes métodos 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, níveis de tensão, carregamento dos cabos, perdas de potência e energia, número de consumidores atendidos, custos, potência de curto-circuito, estabilidade, entre outros. Este estudo pretende apresentar a utilização de alguns destes critérios a partir de resultados práticos obtidos com o desenvolvimento de um projeto de P&D entre a UFSM e a CEEE-D. Em relação aos critérios qualitativos, podem ser incluídos os mais diversos parâmetros, tais como: acesso (ao local de instalação da fonte de GD), segurança, espaço físico (para a instalação da fonte de GD), serviços ancilares (reserva de prontidão, capacidade auto-restabelecimento ou black start, reserva de potência), etc. Este estudo pretende apresentar a utilização de alguns destes parâmetros através do software GARP3®.

O principal objetivo deste trabalho é corroborar os resultados obtidos até o momento, provenientes do projeto de P&D desenvolvido entre a UFSM e a CEEE-D. A partir disso será apresentada a eficácia da utilização de métodos de tomada de decisão multicriteriais baseados nos conjuntos fuzzy e em uma metodologia para análise de parâmetros qualitativos (Barin et al, 2007), visando determinar a localização mais adequada de uma fonte de GD utilizando dados de alimentadores reais pertencentes à CEEE-D.

2. Benefícios da aplicação de fontes de GD

Através da correta localização das fontes de GD observa-se uma significativa redução nas perdas de potência e uma grande melhoria nos níveis de tensão (El-Khattam & Salama, 2004), colaborando para a redução destes níveis no período de pico e contribuindo para que o sistema opere em condições próximas ao ideal.

Em se tratando de fontes alternativas de energia, a utilização de fontes renováveis reduz a emissão de gases colaborando para redução do efeito estufa. Deve-se observar que há uma grande disponibilidade de aproveitamento de fontes renováveis de energia ao longo do território nacional, tais como biomassa, eólica, solar, etc. Estas fontes são consideradas tecnologias ecologicamente amigáveis e com incentivos governamentais para a sua difusão através do PROINFA, Lei 10.438/2002.

As fontes de GD não são restritas a potências centralizadas de fornecimento de energia (Borbely & Kreiber, 2001), podendo ser alocadas em pontos estratégicos atendendo adequadamente aos seus consumidores ao longo da rede. Estes elementos mostram uma nova forma de reestruturação do sistema elétrico, diversificando as possibilidades na instalação destas fontes, o que proporciona uma redução geral de custos na atual manutenção e uma maior flexibilidade no planejamento das redes de distribuição (Dugan, McDermott & Ball, 2000).

3. Protótipo de Sistema de Distribuição - validação de parâmetros quantitativos

Esta seção descreve o protótipo de um sistema de distribuição desenvolvido simultaneamente com o software comercial DigSilent® e com o software ASD-GD desenvolvido durante o projeto de P&D. Esta etapa do trabalho tem como objetivo validar a precisão dos resultados obtidos nos cálculos de fluxo de potência implementados no software desenvolvido pela UFSM em comparação com o software comercial DigSilent®. Pretende-se também apresentar a importância da utilização de critérios quantitativos a serem aplicados posteriormente em uma tomada de decisão multicriterial.

Os protótipos apresentados na Figura 1 são caracterizados por um alimentador em 13,8 kV com 21 transformadores conectados à rede primária (13,8 kV/380 V/220 V; conexão $\Delta - Y_{\Delta}$).

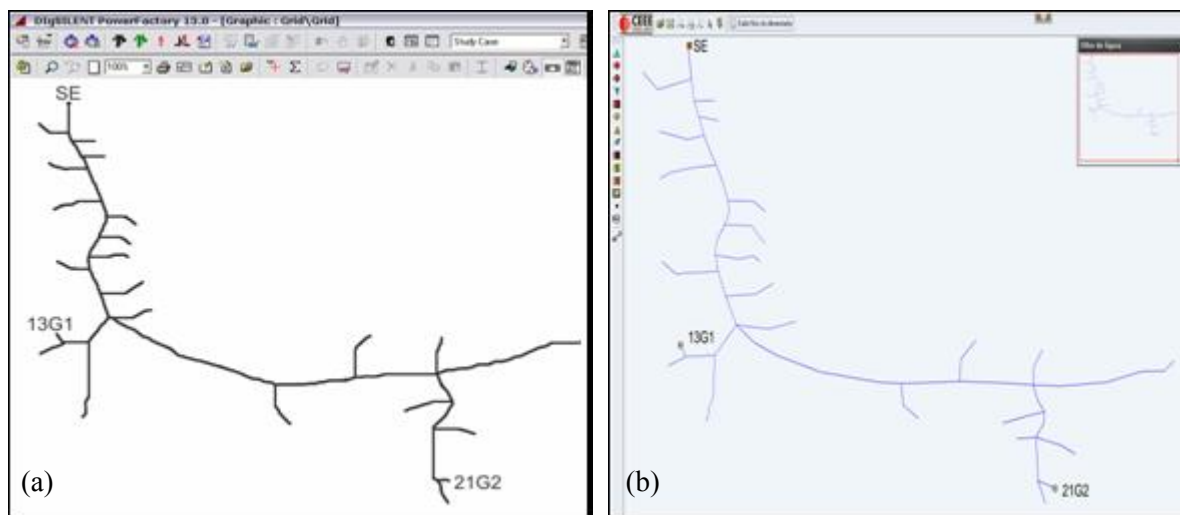


Figura 1 – Alimentador protótipo simulado no software DigSilent® (a) e no software ASD-GD (b).

Um grupo de consumidores foi conectado a cada transformador, sendo estes consumidores caracterizados através de diferentes curvas de carga.

Estes grupos foram conectados ao longo do alimentador havendo um dimensionamento adequado para cada trecho da rede [ABNT-NBR-14039, 2005].

A distância da Subestação (SE) até o último conjunto de consumidores 21G é de 118,9 Km. Neste ponto foi conectada a rede uma fonte de geração distribuída de 175 kVA, equivalente a 16% da demanda total do alimentador às 19h (horário de pico máximo). Em um conjunto de consumidores anterior, denominado 13G, localizado a 25,9 km de distância da SE, foi conectado à rede uma fonte de geração distribuída de mesma potência (175 kVA) com o intuito de verificar os resultados obtidos em diferentes pontos do sistema. O objetivo destas fontes, neste caso específico, é gerar energia apenas entre os horários das 18 às 21 h.

Analisando o comportamento do sistema apresentado na Figura 1, após a atuação da unidade de GD ao ponto 21G, verificou-se um impacto positivo no comportamento do sistema de distribuição, proporcionando a redução de perdas e melhoria dos níveis de tensão, conforme os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Análise nos níveis de tensão do grupo de consumidores localizados ao nó 21G e perdas de potência detectadas em todo sistema, com e sem a conexão da fonte de GD ao nó 21G.

Horas	Sem GD	Com GD	Com GD	Sem GD	Com GD	Com GD
h	V	V	ΔV (%)	kW	kW	ΔkW (%)
18	200,4	228,6	+ 14,07	33,50	9,48	- 71,70
19	192,6	222,6	+ 15,58	54,67	17,79	- 67,46
20	198,5	227,1	+ 14,41	38,76	11,56	- 70,18
21	203,2	230,8	+ 13,58	26,95	7,17	- 73,40

Tabela 2 – Análise nos níveis de tensão do grupo de consumidores localizados ao nó 13G e perdas de potência detectadas em todo sistema, com e sem a conexão da fonte de GD ao nó 13G.

Horas	Sem GD	Com GD	Com GD	Sem GD	Com GD	Com GD
h	V	V	ΔV (%)	kW	kW	ΔkW (%)
18	221,2	230,7	+ 4,29	33,50	26,61	- 20,57
19	219,0	228,8	+ 4,47	54,67	45,15	- 17,41
20	220,4	230,0	+ 4,36	38,76	31,02	- 19,97
21	222,2	231,6	+ 4,23	26,95	21,15	- 21,52

Em relação à atuação de uma fonte de mesma potência ao nó 13G, como pode ser observado na Tabela 2, há menos variações nos níveis de tensão e uma menor redução de perdas, em comparação a instalação da fonte de GD ao nó 21G. Estes fatos estão diretamente relacionados à potência de curto-circuito no local onde a fonte de GD é conectada. Esta característica será considerada posteriormente em conjunto com a análise multicriterial.

4. Protótipo GARP3® - validação de parâmetros qualitativos

Com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros qualitativos sobre o local de instalação de uma fonte de geração distribuída, fez-se uso do software livre GARP3®. Este software é uma ferramenta de simulação qualitativa que utiliza blocos para a construção de modelos baseados em raciocínio qualitativo, possibilitando ao usuário analisar as relações que existem entre os parâmetros e o objeto em questão (Salles & Bredeweg, 1997 apud Araújo, 2005).

O modelo desenvolvido neste artigo expressou o interesse por uma área (local) onde se prevê a instalação de uma fonte de geração distribuída, supostamente para otimização do serviço à população. Desta forma, o raciocínio qualitativo apresentado com este modelo foi analisado sob diferentes domínios, considerando aspectos sociais (vandalismo/segurança), ambientais (vegetação/acesso) e econômicos (custo à instalação da fonte).

A partir disso, as relações de causa e efeito entre o objeto (local de instalação da fonte de GD) e as características (parâmetros selecionados para análise) pertencentes a este modelo foram avaliadas. Na Figura 2 estão apresentadas as relações de causalidade estipuladas na montagem do cenário desenvolvido com o software GARP3®. Os critérios analisados estão apresentados na Figura 2: A) vandalismo (parâmetro segurança); B) vegetação (parâmetro acesso); C) custos de instalação.

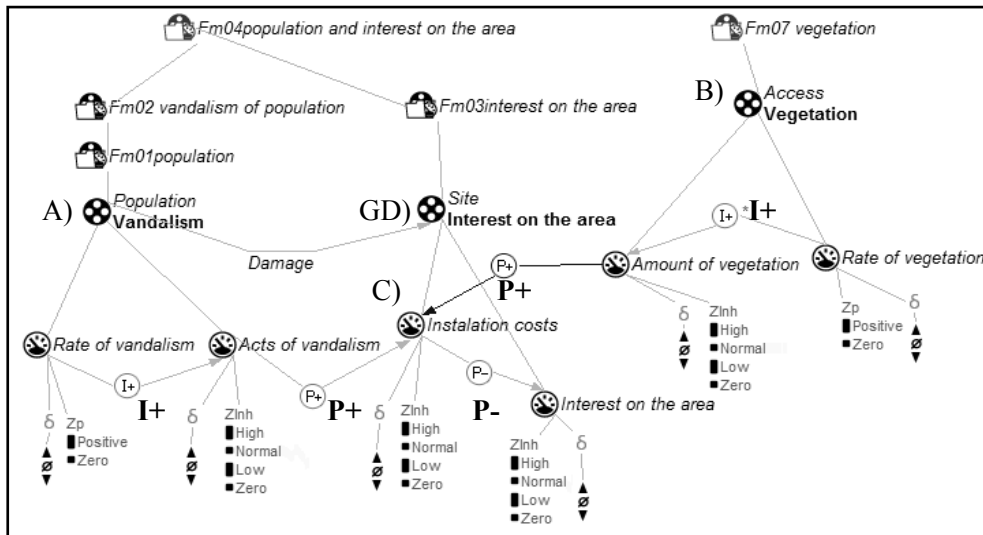


Figura 2 – Cenário de ações conjuntas e suas inter-relações.

Como pode ser observado na Figura 2, o interesse no local de instalação da fonte de GD (representado por GD na Figura 2) está diretamente relacionado com a população que pode danificar a fonte com seus atos de vandalismo (letra A na Figura 2) e a vegetação que tende a cobrir a área inviabilizando o acesso à fonte (letra B na Figura 2). Além disso, deve-se observar que quanto maior forem os atos de vandalismo na área e quanto maior for o crescimento da vegetação no local, o custo na instalação da fonte aumenta (parâmetro custos de instalação, representado pela letra C na Figura 2). Ainda na análise desta figura, a atribuição I representa a influência direta entre as características em questão representando a dinâmica do sistema (expressa equações diferenciais), sendo I+ a taxa que será adicionada ao valor da quantidade e I- a taxa que será subtraída do valor da mesma, durante um determinado período de tempo. A atribuição I+ pode ser observada na Figura 2 atuando entre a taxa de vandalismo e os atos de vandalismo, assim como entre a taxa de vegetação e a quantidade de vegetação existente.

A atribuição P representa a proporcionalidade qualitativa entre as características analisadas, sendo que P+ é uma relação direta e P- uma relação indireta de proporcionalidade. A atribuição P+ pode ser observada na Figura 2 atuando entre atos de vandalismo e custos de instalação, assim como entre quantidade de vegetação e custos de instalação. Por fim, a atribuição P- pode ser observada na Figura 2 atuando entre custos de instalação e o interesse no local de instalação da fonte de GD.

É importante salientar que este software permite a avaliação da quantidade e das taxas de crescimento referentes às características em questão. Após a simulação, o software apresenta a análise das ações conjuntas e suas inter-relações, observadas na Figura 3.

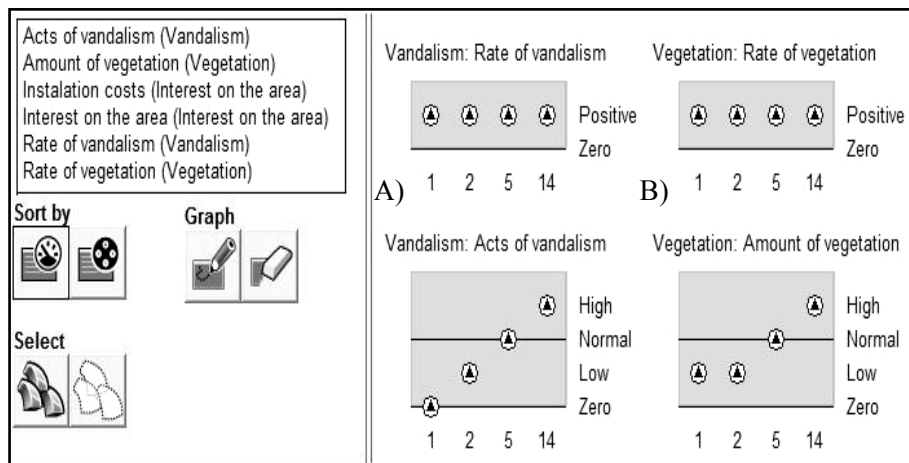


Figura 3 – Inter-relações estipuladas para vegetação e vandalismo.

A partir destas relações, pode-se observar na Figura 3 (A) que considerando uma taxa de vandalismo positiva, a quantidade de atos de vandalismo aumenta, dentro do espaço quantitativo atribuído à análise (zero, baixo, normal e alto). De forma semelhante, pode-se observar na Figura 3 (B) que se a taxa de vegetação for positiva (condição natural sem poda constante), então a quantidade de vegetação aumenta dentro do espaço quantitativo atribuído à análise, podendo ser relacionado, neste caso, ao tipo de vegetação existente no local.

Na Figura 4, os resultados das relações de causa e efeito simuladas entre o objeto (local de instalação da fonte) e os parâmetros em análise podem ser visualizadas.

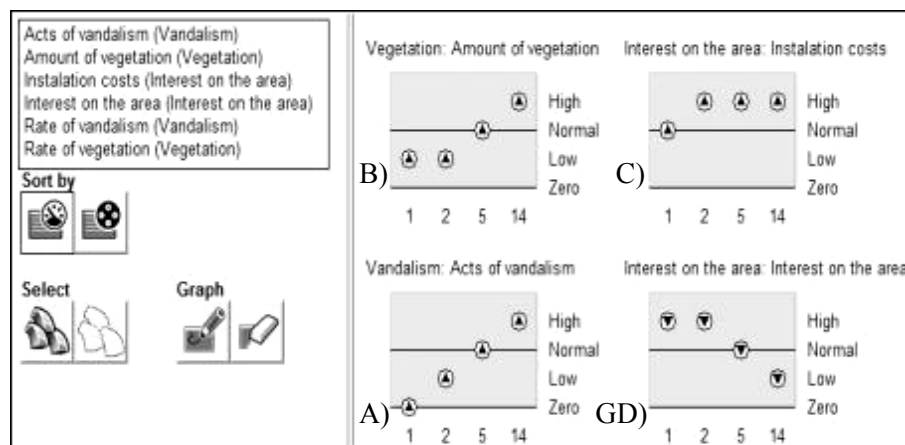


Figura 4 – Resultados das relações entre as características e o objeto em questão.

Analisando os resultados acima, observa-se que considerando uma taxa positiva de vandalismo e o conseqüente aumento do número de ações de vandalismo na área (A), o custo para manter a segurança deste local aumenta (C), diminuindo assim o interesse no local de instalação da fonte (GD). De forma semelhante, considerando uma taxa positiva de crescimento da vegetação (B) e o conseqüente aumento na quantidade de vegetação no local (B), o que dificultando o acesso ao mesmo, o custo para manter o acesso a este local aumenta (C), diminuindo o interesse na área de instalação (GD).

Por fim, deve-se salientar que este software permite fazer inúmeras alterações no modelo apresentado, podendo-se analisar diferentes ações de causalidades dentre as características e o objeto em questão.

5. Exemplo prático com aplicação de análise multicriterial

Esta seção demonstra a metodologia de análise multicriterial desenvolvida juntamente com os resultados provenientes do software ASD-GD, com o objetivo de determinar os dois locais mais adequados para a inserção de uma fonte de geração distribuída em alimentador real da CEEE-D, atendendo assim as orientações do PRODIST. Para isso, serão utilizados parâmetros quantitativos e qualitativos escolhidos de acordo com o interesse da companhia fornecedora de energia. A Figura 5 apresenta o alimentador real simulado. Este alimentador opera em 13,8 kV, pertencendo à Subestação Porto Alegre 9 (PAL 9) sob domínio da CEEE-D. Aos nós G1, G2, G3, G4, G5 e G6 prevê-se a possibilidade da conexão de fontes de geração distribuída de 660 kVA, equivalente a 14% da demanda total do alimentador às 19h (horário de pico máximo).

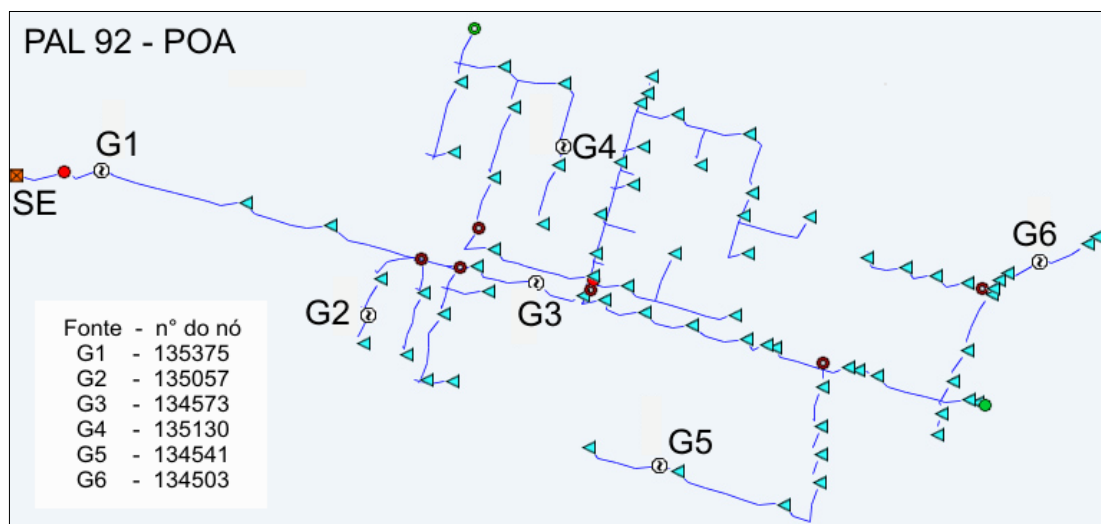


Figura 5 – Alimentador PAL 92 (CEEE-D), região de Porto Alegre – RS.

A metodologia apresentada neste artigo visa determinar a localização mais adequada de uma fonte de geração distribuída utilizando os conjuntos fuzzy para a análise dos parâmetros quantitativos. O trabalho também faz uso de uma metodologia baseada em raciocínio qualitativo para a análise dos parâmetros qualitativos e, além do algoritmo de Bellman-zadeh na análise conjunta dos resultados finais provenientes dos dois primeiros métodos utilizados.

5.1. Análise Quantitativa e Lógica Fuzzy

Resumidamente, a lógica fuzzy (Zadeh, 1988) é uma técnica inteligente que faz uso da representação da forma humana de pensar, simulando a habilidade de tomar decisões em ambientes imprecisos (Shaw & Simões 1999). Em diversos artigos empregou-se o uso da lógica fuzzy em modelos de sistemas de distribuição (Ekel & Popov, 1995). Neste trabalho a lógica fuzzy será aplicada na análise de critérios quantitativos, levando em consideração que esses resultados podem ser quantificados e devidamente aplicados nesta lógica. Com relação aos conjuntos fuzzy (Tanscheit, 1999) seus modelos de curva podem variar de acordo com o comportamento de cada parâmetro. Neste estudo foram avaliados dois tipos de funções as quais melhor caracterizam os critérios escolhidos.

Seguindo as análises gráficas das funções de pertinência fuzzy definidas a cada parâmetro, atribuíram-se os valores reais (x) dos critérios em cada função encontrando assim os níveis de prioridade $\mu(x)$ para cada análise.

Na análise dos parâmetros níveis de tensão, variação de perdas de potência e potência de curto-circuito optou-se pela utilização de 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 reais dos parâmetros (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 optou-se pelo 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.

Deve-se observar que a corrente de curto-circuito é analisada em função da potência de curto-circuito (S_{cc}) e aplicada como critério quantitativo. Desta forma, pode-se avaliar em regime transitório as conseqüentes alterações de freqüência a partir das simulações realizadas com determinadas variações de S_{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 entre 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 30 s.

Assim sendo, esta análise considera o valor mínimo de S_{cc} da rede igual ao valor da carga total instalada no sistema de distribuição somada ao valor da potência do gerador. 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.

A função trapezoidal, utilizada para análise de variação de perdas de potência após a atuação da fonte de GD, esta representada na Figura 6 – (a). A Figura 6 – (b) representa uma variação da função trapezoidal, definida para a análise da potência de curto-circuito (S_{cc}). Este valor mínimo de S_{cc} será representado na curva de pertinência fuzzy utilizada na análise como 1x. Isto significa que as variações na freqüência da rede extrapolam os limites estabelecidos no PRODIST. Por outro lado, quando a S_{cc} da rede é 10x superior ao valor considerado mínimo, os valores de freqüência estão próximos do ideal (60 Hz), entrando na faixa admissível estabelecida pelo PRODIST. A Figura 6 – (c) apresenta uma variação da função trapezoidal, utilizada para a análise dos níveis de tensão. A Figura 6 – (d) apresenta a função linear crescente, definida para análise do carregamento dos cabos.

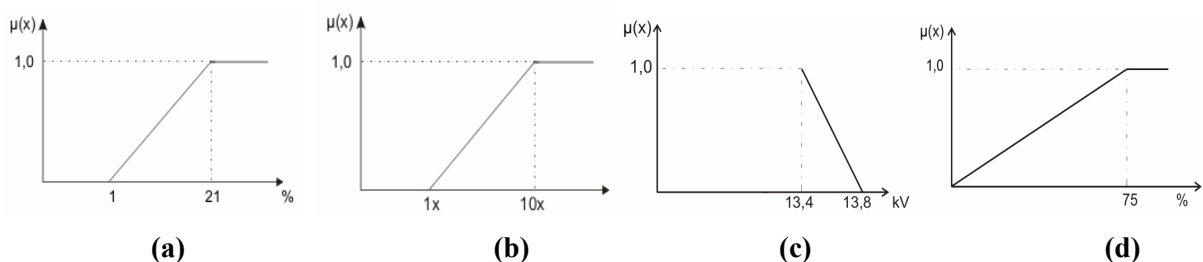


Figura 6 – Funções de pertinência definidas aos parâmetros em análise.

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 parâmetros sob o ponto de vista da importância destes

critérios. 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.

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

Neste trabalho foram avaliados os seguintes parâmetros qualitativos: acesso, segurança e custos de instalação. Primeiramente, cinco especialistas avaliaram a importância entre os parâmetros, comparando-os entre si. Desta forma, seguindo a Equação 2, foram assumidos valores para esta comparação. No passo seguinte, deve-se construir a Tabela 3 de forma a facilitar a aplicação desta metodologia. Para preencher as colunas desta tabela devem ser calculadas 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} representa a estimativa do nível de importância, obtida através da Equação 2;
 m é o número de especialistas.

b) estimativa k_2 , apresentada na Equação 4, considerando os resultados provenientes das Equações 2 e 3.

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

A Tabela 3 é elaborada com os resultados da Equação 2, juntamente com as soluções obtidas das Equações 3 e 4, considerando a comparação realizada pelos especialistas (E1, E2, E3, E4 e E5) avaliando os parâmetros em pares, onde x_1 representa acesso, x_2 segurança e x_3 custos de instalação.

Tabela 3 – Ordenação das estimativas

Comparação	E1	E2	E3	E4	E5	k_1	k_2
x_1, x_2	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,3	0,7
x_1, x_3	1,5	1,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
x_2, x_3	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	0,8	1,2

Calculados os valores de k_1 e k_2 , verificados na Tabela 3, constrói-se a Tabela 4. 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 3. Células que ficam abaixo da diagonal principal desta mesma matriz são completadas com os dados da coluna k_2 também extraídos da Tabela 3. Ainda nesta etapa, calcula-se o coeficiente de prioridade para cada fator k_p , definido a partir da Equação 5, onde n é o número de parâmetros que devem ser comparados.

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

Fazendo uso da Equação 5 e da metodologia apresentada, encontraram-se os valores de k_p para cada um dos parâmetros, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficiente de prioridade de cada parâmetro

Parâmetros	x_1	x_2	X_3	Σ	k_p
X_1	-	1,3	1,0	2,3	0,383
X_2	0,7	-	0,8	1,5	0,250
X_3	1,0	0,2	-	1,2	0,367

A Figura 7 mostra os dados resultantes de metodologia implementada no software ASD-GD, apresentando os valores das comparações entre os pares de parâmetros (Tabela 3), e os valores de k_p calculados pelo programa (Tabela 4).

	1	2	3	4	5
x1, x2	>	=	>	=	>
x1, x3	>	>	<	<	=
x2, x3	=	>	<	<	<

x1	x2	x3
0,383	0,25	0,367

Figura 7 – Comparação entre os parâmetros e cálculo de k_p , com uso do software ASD-GD.

No passo seguinte da análise, avalia-se o nível de influência de cada um dos parâmetros para cada objeto através de uma escala de 0 a 10. Desta forma, cada especialista atribuiu uma nota para cada parâmetro, avaliando separadamente a relação existente entre estes parâmetros e cada objeto em estudo, conforme apresentado na tela do software ASD-GD, representada na Figura 8. Nesta mesma figura pode ser observada a multiplicação das médias das notas pelo valor do coeficiente k_p , definido para cada um dos parâmetros na etapa anterior. Por fim, a partir da soma destes valores a prioridade “QA” é calculada, resultando nos valores finais normalizados desta análise.

Geração	Caracter...	S1	S2	S3	S4	S5	Média
135375	x1	10	3	3	4	8	5,6
	x2	2	6	1	2	4	3,0
	x3	2	4	2	2	3	2,6
135130	x1	4	2	7	5	4	4,4
	x2	1	4	5	6	7	4,6
	x3	1	2	4	5	6	3,6
134503	x1	2	2	3	4	2	2,6
	x2	9	8	4	3	6	6,0
	x3	9	4	5	6	7	6,2
134573	x1	1	6	3	6	5	4,2
	x2	7	7	6	4	9	6,6
	x3	2	3	4	5	4	3,6
134541	x1	1	9	9	6	6	6,2
	x2	5	4	3	2	6	4,0
	x3	7	2	9	3	5	5,2
135057	x1	2	3	6	3	4	3,6
	x2	1	9	8	1	4	4,6
	x3	10	3	5	8	6	6,4

Multiplicação das médias de cada parâmetro por k_p

Geração	x1	x2	x3	Somatório	*QA*
135375	2,147	0,75	0,953	3,85	0,729
135130	1,687	1,15	1,32	4,157	0,787
134503	0,997	1,5	2,273	4,77	0,903
134573	1,61	1,65	1,32	4,58	0,867
134541	2,377	1,0	1,907	5,283	1,0
135057	1,38	1,15	2,347	4,877	0,923

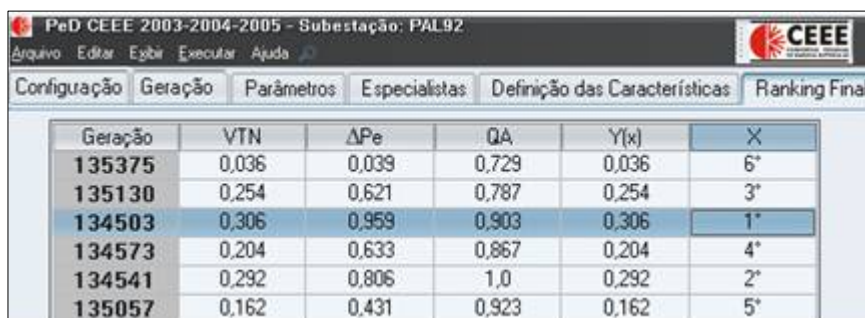
Figura 8 – Definição da prioridade qualitativa para cada um dos objetos (locais).

5.3. Análise Final e Bellman-Zadeh

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

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

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 pelo software ASD-GD na Figura 9, onde foram encontrados os dois locais mais indicados para instalação da fonte de GD.



Geração	VTN	ΔPe	QA	Y(x)	X
135375	0,036	0,039	0,729	0,036	6*
135130	0,254	0,621	0,787	0,254	3*
134503	0,306	0,959	0,903	0,306	1*
134573	0,204	0,633	0,867	0,204	4*
134541	0,292	0,806	1,0	0,292	2*
135057	0,162	0,431	0,923	0,162	5*

Figura 9 – Ranking final da instalação de uma fonte de GD.

No caso desta análise, os nós números 134503 (G6) e número 134541 (G5) são os locais mais adequados para a instalação de uma fonte de geração distribuída, considerando a análise dos parâmetros quantitativos variação de perdas de potência e níveis de tensão, além dos parâmetros qualitativos acesso, segurança e custos de instalação.

6. Conclusão

Este artigo apresenta os resultados obtidos a partir do projeto de P&D, desenvolvido na UFSM para analisar as características operacionais dos sistemas de distribuição da CEEE-D.

As simulações realizadas com os softwares ASD-GD e DigSilent® avaliaram a importância de parâmetros quantitativos enquanto as simulações desenvolvidas no software GARP3® corroboraram a importância de parâmetros qualitativos, considerando a instalação de fontes de GD em sistemas de distribuição de energia.

O trabalho demonstra as análises realizadas com o software ASD-GD desenvolvido pela UFSM, no qual foram analisados os parâmetros quantitativos variação de perdas de potência e níveis de tensão, além dos parâmetros qualitativos acesso, segurança e custos de instalação.

Desta forma, tomando como base o estudo de métodos de tomada de decisão multicriteriais através do uso da lógica fuzzy e de uma metodologia específica para análise dos parâmetros qualitativos, foram determinados os 2 locais mais adequados para a instalação de uma fonte de GD em um alimentador real da CEEE-D, seguindo as orientações estabelecidas pelo PRODIST.

É importante observar que a metodologia apresentada neste artigo pode ser aplicada tanto na análise de um conjunto de alimentadores visando à obtenção do melhor AL para a conexão de uma fonte de GD, quanto na análise de um único AL com o objetivo de identificar os melhores locais para instalação de fontes de GD dentro deste alimentador.

Levando em consideração as orientações do PRODIST, juntamente com o constante crescimento da utilização da GD nos sistemas de distribuição, deve-se reconhecer que a identificação da adequada localização das fontes de GD é fator preponderante no desenvolvimento e planejamento das redes de distribuição.

7. Referências bibliográficas

Ackermann, T.; Andersson, G.; Soder L. Distributed Generation: A Definition. Department of Electric Power Engineering, Royal Institute of Technology. Electric Power Systems, Sweden. Electric Power Systems Research. 2000.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (Módulo 3), 2006.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 505, 26 de novembro de 2001.

Dugan, R. C.; Price, S.K. Including Distributed Resources In Distribution Planning. IEEE. 2004.

Bouskelá, A. Geração Distribuída: Oportunidades no Brasil. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference: Latin America. SP. 2004.

Ramirez-Rosado, I. J.; Dominguez-Navarro, J. A. New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems. Power Systems, IEEE Transactions. vol. 21, Issue:1, pp. 224- 233. 2006.

Barin, A.; Pozatti, L.F.; Canha, L. N.; Farret, F.A.; Machado, R.Q.; Abaide, R.A.; Carvalho, C.; Fernandes, C.E.M. Analysis of the Impact of Distributed Generation Sources on the Operational Characteristics of the Distribution Systems for Planning Studies. 19th International Conference on Electricity Distribution. Viena, Áustria. 2007.

El-Khattam, W.; Salama, M.M.A. Distributed generation technologies, definitions and benefits. Department of Electrical and Computer Engineering. University of Waterloo. Canada. 2004.

Borbely, A, M.; Kreiber, J. F. Distributed Generation - The power paradigm for the new millennium. CRC Press LLC, USA. pp. 400. 2001.

Dugan, R. C.; McDermott, T.E.; Ball, G.J. Distribution Planning For Distributed Generation. Electrotek Concepts Energy and Environmental Economics, Inc. Knoxville, TN, Rural Electric Power Conference. USA. 2000.

Zadeh, L.A. Fuzzy Logic. University of California, Berkeley. IEEE 1988.

Shaw, I.S.; Simões, M.G. Controle e modelagem fuzzy. Ed. Edgard Blucher Ltda, Brasil. SP. pp. 165. 1999.

Ekel, P.; Popov, V. Fuzzy Set Theory and Problems of the Design and Control of Power Systems and Subsystems. Proceedings of the 4-th IEEE Conference on Control Applications. pp. 46-51. Albany, USA. 1995.

Tanscheit, R. Sistemas fuzzy; DEE-PUC-Rio, Rio de Janeiro.1999.

8. Agradecimentos

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