

Análise do Impacto da Localização e Dimensão da Geração Distribuída na Confiabilidade, Perdas Elétricas e Perfil de Tensão de Redes de Distribuição

Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, Zulmar S. Machado Jr, Alessandro Manzoni - EE - COPPE/UFRJ

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados alcançados em projeto executado pela COPPE/UFRJ para a CERJ, dentro do Programa de P&D do Setor Elétrico Brasileiro coordenado pela ANEEL no ciclo 2002/2003. O projeto tratou do desenvolvimento de metodologia para localização e dimensionamento ótimo de geração distribuída em redes de distribuição de energia elétrica, levando em consideração o custo da instalação das unidades de GD e a melhoria nos índices de confiabilidade da rede, no perfil de tensão e nas perdas elétricas. A metodologia baseia-se na utilização de Algoritmos Genéticos combinados com um módulo de avaliação do impacto da geração distribuída nas redes de distribuição. A ferramenta computacional foi desenvolvida em linguagem de programação C++ considerando a Modelagem Orientada a Objetos e dispõe de interface gráfica amigável ao usuário para entrada de dados e visualização de resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de Distribuição, Geração Distribuída, Confiabilidade, Perdas Elétricas, Perfil de Tensão, Algoritmos Genéticos.

sumidores como empresas fornecedoras, especialmente em locais onde a geração central é impraticável ou existe deficiência do sistema de transporte de energia. As principais razões da crescente utilização de GD são:

1. As unidades de GD estão mais próximas dos consumidores de modo que os custos de transporte (transmissão e distribuição) são reduzidos;
2. As novas tecnologias disponibilizaram unidades variando de 10KW a 15MW;
3. O tempo de instalação é reduzido e os riscos de investimento não são tão altos;
4. As questões ambientais levantadas com a instalação de pequenas unidades são reduzidas, especialmente quando empregadas fontes alternativas de energia;
5. Oferece grande flexibilidade de escolha da combinação mais adequada de custo e confiabilidade;
6. A liberação do mercado de energia cria oportunidades para novos agentes produtores.

Neste contexto, a necessidade de prover acesso à rede de distribuição às empresas que desejam instalar unidades de GD confronta com a necessidade de controlar a rede e garantir níveis adequados de segurança e confiabilidade. As empresas de energia elétrica passam a ter de lidar não só com os problemas técnicos já conhecidos, mas também com novas tarefas. As incertezas envolvidas no planejamento e operação do sistema tornam-se maiores do que no passado e certamente novas ferramentas necessitam ser desenvolvidas para analisar e prever o comportamento do sistema.

O planejamento do sistema elétrico com a presença de GD requer a definição de vários fatores, tais como: a melhor tecnologia a ser utilizada, o número e a capacidade das unidades, a melhor localização, o modo de interconexão à rede, etc. O impacto da GD nas características operacionais do sistema, tais como perdas elétricas, perfil de tensão, confiabilidade, entre outras, precisa ser adequadamente avaliado. Este projeto visa analisar o impacto da localização e dimensão das unidades de GD nas perdas elétricas, confiabilidade e perfil de tensão das redes de distribuição. A instalação de unidades de GD em locais não ótimos pode resultar em aumento das perdas do sistema, implicando em aumento de custos e tendo

I. INTRODUÇÃO

Uma alternativa para o atendimento da demanda crescente de energia elétrica observada nas últimas décadas é a utilização de geração distribuída. Geração distribuída (GD) está relacionada com a utilização de pequenas unidades geradoras (10MW ou menos) instaladas em pontos estratégicos do sistema elétrico e, principalmente, próximos a centros de consumo. As tecnologias aplicadas em GD compreendem pequenas turbinas a gás, microturbinas, células combustíveis, geradores eólicos, energia solar, etc. A GD pode ser utilizada de modo isolado, suprimindo a demanda local do consumidor, ou de modo integrado, fornecendo energia ao restante do sistema elétrico. Em sistemas de distribuição, a GD pode fornecer benefícios tanto para con-

Este trabalho foi apoiado técnica e financeiramente pela CERJ – Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro, através de seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento ciclo 2002/2003.

Carmen L.T. Borges é Prof. Adjunto da EE e COPPE/UFRJ (carmen@dee.ufrj.br). Djalma M. Falcão é Prof. Titular da COPPE/UFRJ (falcão@nacad.ufrj.br). Zulmar S. Machado Jr é aluno de D.Sc. da COPPE/UFRJ (zulmar@pee.coppe.ufrj.br). Alessandro Manzoni é aluno de D.Sc. da COPPE/UFRJ (manzoni@coep.ufrj.br).

efeito contrário ao pretendido. Por essa razão, a utilização de uma ferramenta de otimização capaz de indicar a melhor solução para uma dada rede de distribuição pode ser de grande valia para o planejador do sistema frente ao aumento da penetração da GD que vem ocorrendo.

A seleção dos locais para instalação e dimensões das unidades de GD em sistemas de distribuição de grande porte é um problema de otimização combinatorial muito complexo. As técnicas convencionais de otimização requerem elevado esforço computacional e impõem modelagens simplificadas. Recentemente, uma nova classe de métodos de otimização, chamados de Métodos Metaheurísticos, tem sido aplicada com sucesso a problemas de otimização combinatorial em sistemas de potência.

A ferramenta computacional desenvolvida neste projeto visa otimizar a localização e a dimensão da GD de modo a minimizar as perdas na rede de distribuição primária e garantir níveis aceitáveis de confiabilidade e perfil de tensão. Para tanto, foi explorada a combinação da técnica de Algoritmos Genéticos com um método para avaliar os impactos da GD no desempenho do sistema, no tocante a confiabilidade, nível de perdas e perfil de tensão.

A ferramenta computacional foi implementada baseada numa plataforma de desenvolvimento (Modelagem Orientada a Objetos), a qual apresenta grande vantagem em termos de manutenção, expansão e re-utilização do código. O programa foi desenvolvido levando-se em consideração as características específicas da rede da CERJ e contém uma interface gráfica amigável ao usuário.

II. METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS

A ferramenta computacional desenvolvida neste projeto visa otimizar a localização e a dimensão da GD de modo a minimizar as perdas na rede de distribuição primária e garantir níveis aceitáveis de confiabilidade e perfil de tensão. Para tanto, foi explorada a combinação da técnica de Algoritmos Genéticos com um método para avaliar os impactos da GD no desempenho do sistema, no tocante a confiabilidade, nível de perdas e perfil de tensão. Conceitualmente, a ferramenta envolveu o desenvolvimento dos seguintes métodos:

- Método para avaliação do impacto da localização e da dimensão das unidades de geração distribuída (GD) nas perdas elétricas, confiabilidade e perfil de tensão das redes de distribuição. A avaliação das perdas elétricas e do perfil de tensão é baseada em programa para cálculo do fluxo de potência com representação de geradores (barras PV) [1]. A avaliação da confiabilidade é baseada em métodos analíticos [2,3]. Os indicadores de continuidade são calculados de acordo com a resolução No 024 da Aneel. O método desenvolvido pode ser utilizado de forma autônoma para avaliar soluções propostas por um especialista ou como parte integrante do método automático de localização e dimensionamento ótimo de GD descrito a seguir.

- Método automático para localização e dimensionamento ótimo de unidades de GD, de modo a minimizar as perdas na rede de distribuição primária e garantir níveis aceitáveis de confiabilidade e perfil de tensão. O método é baseado na técnica de Algoritmos Genéticos (AG), o qual utiliza o método de avaliação do impacto da GD acima descrito na avaliação das candidatas potenciais à solução do problema [4]. O AG desempenha o papel do especialista na tarefa de produzir candidatas potenciais à solução do problema de forma automática.

A. Método de Avaliação do Impacto da GD

A ferramenta básica para avaliação do impacto da GD nas perdas e perfil de tensão da rede de distribuição é o fluxo de potência. Existem vários trabalhos publicados na literatura que propõem metodologias para avaliação do fluxo de potência em redes de distribuição com representação de geradores. Alguns trabalhos apresentam grandes similaridades, como por exemplo, o fato de todos converterem as redes originais em redes radiais visando à utilização de métodos de varredura para a resolução de fluxos de potência. As principais diferenças observadas estão no tipo de método de varredura escolhido para resolver o problema de fluxo de potências e na forma de obter as atualizações das variáveis envolvidas no processo de convergência. No desenvolvimento deste projeto, foi adotado o método proposto por [1], por utilizar o método da soma das potências para resolver o fluxo de potência, por incorporar a presença de barras PV e por ser de uma simplicidade adequada aos objetivos do projeto.

O efeito da presença de geração distribuída na confiabilidade do sistema foi considerado baseado em [5]. O método desenvolvido considera a possibilidade da GD suprir toda ou parte da carga interrompida na indisponibilidade da alimentação principal. A ocorrência de uma falha provoca a atuação dos dispositivos de proteção do sistema principal e da geração distribuída, caso em operação, seguida pela abertura dos dispositivos de isolamento adequados e posterior conexão da geração distribuída novamente ao sistema. Dessa forma, índices de confiabilidade relacionados à frequência de falha não são alterados pela presença da GD. Por outro lado, existe uma melhoria significativa nos índices relacionados a tempo de indisponibilidade devido ao suprimento de parte da carga pela GD enquanto a geração principal está sendo reparada. Esse benefício é maior se a GD for considerada como sempre disponível, como seria o caso de geradores a diesel, gás, microturbinas, etc.

De um modo geral, a GD é modelada de forma semelhante a um recurso com capacidade de suprimento limitada pela capacidade do gerador. No cálculo dos índices de confiabilidade dos blocos de carga, são comparadas a carga instalada do bloco com a capacidade total de geração diretamente conectada ao bloco. Caso a capacidade de geração seja maior que a carga, o tempo de indisponibilidade do bloco corresponde ao tempo de manobra para isola-

mento do defeito e conexão da GD ao bloco. Caso contrário, o tempo de indisponibilidade do bloco corresponde ao tempo de reparo do elemento onde ocorreu o defeito. Os índices de confiabilidade que estão sendo calculados neste projeto são DIC, FIC, DEC e FEC e CEND.

A implementação do algoritmo de confiabilidade com geração distribuída considera que quando há uma falha em algum trecho do alimentador, os dispositivos de proteção serão abertos no sentido de isolar a falha, neste instante analisa-se a possibilidade da geração distribuída alimentar aquelas cargas que ficaram desligadas mas que poderiam se conectar à GD. Assim, estas cargas que são religadas terão apenas que esperar o tempo de transferência para a GD, enquanto que as demais irão esperar o tempo de reparo da falha. Caso o valor das cargas seja superior à capacidade de geração então no algoritmo todas as cargas irão esperar o tempo de reparo.

B. Método Automático de Localização e Dimensionamento Ótimo de GD

A metodologia desenvolvida visa otimizar a localização e a dimensão da GD de modo a minimizar as perdas na rede de distribuição primária e garantir níveis aceitáveis de confiabilidade e perfil de tensão. Para tanto, foi explorada a combinação da técnica de Algoritmos Genéticos com um método para avaliar os impactos da GD no desempenho do sistema. A otimização da localização e do tamanho das unidades de GD é baseada no fornecimento prévio dos locais candidatos à instalação e da relação dos possíveis unidades a serem considerados para instalação em cada local. Baseado nas informações técnicas das unidades geradoras e nas informações relativas aos custos de instalação, manutenção e aquisição das mesmas, o programa fornece a melhor solução para a rede que maximiza o benefício, medido pela redução das perdas elétricas, e minimiza os custos. O número e o tamanho das unidades selecionadas para instalação dependem da penetração da GD desejada para o sistema em estudo, ou seja, da potência total (MW) que deve ser suprida pelas unidades de GD alocadas no processo de otimização.

Dentre as premissas adotadas na modelagem do problema está a consideração da topologia da rede e dos valores das cargas constantes durante o período do estudo. Isso significa otimizar a instalação de unidades de GD para uma dada configuração de cargas e da rede elétrica, sem considerar o crescimento da carga ou a expansão da rede. Outra premissa é a não consideração da curva diária de variação da carga e, conseqüentemente, os índices de confiabilidade são calculados para valores médios de demanda das cargas. A END - Energia Não Distribuída, por exemplo, é calculada baseada na potência média demandada nos transformadores de distribuição sem considerar as variações diárias de carga.

O problema de otimização solucionado neste projeto pode ser caracterizado como a maximização da relação Benefício/Custo, onde o Benefício é medido pela redução das

perdas propiciada pela instalação de GD e o Custo corresponde aos investimentos de aquisição das unidades de GD, instalação e manutenção das mesmas. O problema de otimização pode ser expresso como:

$$\text{Maximizar } F = \frac{\text{Benefício}}{\text{Custo}}$$

s.a.

- Nível de Tensão dentro de limites aceitáveis
- Índices de Confiabilidade abaixo de limites aceitáveis
- Penetração da GD menor ou igual ao especificado
- Custo Total da instalação da GD menor que o orçamento

III. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos em testes realizados com o programa de localização ótima de geração distribuída desenvolvido. Serão utilizados dois sistemas para avaliação: o primeiro é um sistema exemplo extraído da literatura [2], cujo diagrama unifilar está mostrado na Figura 1, e o segundo é um sistema representando um alimentador real fornecido pela CERJ, cujo unifilar está mostrado na Figura 2.

A. Sistema Exemplo

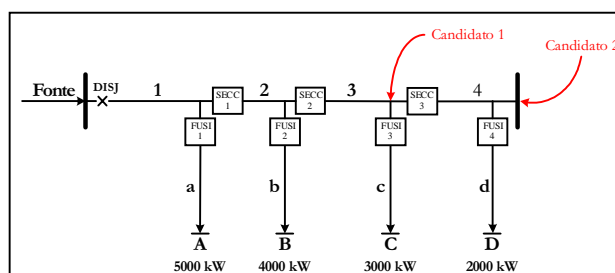


FIGURA 1 - Sistema Exemplo

As setas indicam os pontos candidatos à instalação de unidades de geração distribuída. Neste exemplo especificamente, o alimentador possui um disjuntor principal, e dispositivos de proteção e manobra do tipo chave seccionadora e chave fusível, como pode ser visto na figura.

Por se tratar de um caso teste, os dados apresentados aqui não representam os valores reais dos custos das unidades a serem alocados.

A Tabela 1 apresenta os geradores candidatos a instalação em ambos os pontos candidatos. O tempo de religamento da geração distribuída considerada foi de 0.5 hora, o custo de perdas do alimentador foi de R\$ 100,00/KW.

TABELA 1
Dados das Unidades de GD

Tipo de Gerador	Custo de Aquisição	Potência	Nível de Tensão
Gerador #1	R\$ 1000,00	2000 kW	13.8 kV
Gerador #2	R\$ 1500,00	3000 kW	13.8 kV
Gerador #3	R\$ 2000,00	4000 kW	13.8 kV

A Tabela 2 apresenta os índices de confiabilidade do alimentador sem considerar a instalação da geração distribuída. A queda de tensão máxima calculada pelo fluxo de potência antes da alocação da GD foi de 0.018503 pu e as perdas foram de 209.9 KW.

TABELA 2
Índices de Confiabilidade - Config. Original

INDICES DE CONFIABILIDADE			
FEC	DEC	FEP	DEP
[/ano]	[h/ano]	[KW-ano]	[h/KW-ano]
1.153	2.577	1.157	2.514
END	CEND		
KWh/ano	R\$/ano		
35200.00	2624.69		

A Tabela 3 apresenta a solução ótima obtida pelo AG, A Tabela 3 apresenta a solução ótima obtida pelo AG, onde uma unidade de GD de 4000kW foi instalada no ponto candidato 1 e uma outra unidade de GD de 3000kW foi instalada no ponto candidato 2.

TABELA 3
SOLUÇÃO ÓTIMA DO AG

Ponto	Tipo de Gerador	Custo de Aquisição	Potência
Candidato 1	Gerador #3	R\$ 2000,00	4000 kW
Candidato 2	Gerador #2	R\$ 1500,00	3000 kW

A Tabela 4 apresenta os índices de confiabilidade do alimentador considerando a instalação da GD obtida pelo algoritmo genético. O que se observa em termos de confiabilidade é que os valores dos índices relacionados à duração (DEC, DEP e CEND) diminuem, pois com a instalação da GD, a duração da interrupção às cargas fica menor quando falha a alimentação principal. No entanto, os índices relacionados à frequência permanecem inalterados. Em termos de análise de fluxo de potência, o valor da queda de tensão máxima é reduzido para 0.007422 pu e as perdas passam a ser de 74.26 kW após a alocação da GD.

TABELA 4
Índices de Confiabilidade após alocação da GD

INDICES DE CONFIABILIDADE			
FEC	DEC	FEP	DEP
[/ano]	[h/ano]	[KW-ano]	[h/KW-ano]
1.153	2.262	1.157	2.239
END	CEND		
KWh/ano	R\$/ano		
31350.00	2136.92		

A Tabela 5 mostra uma comparação entre os valores de perdas antes e após a instalação da GD. O que se observa é que houve uma melhora significativa nas perdas do alimentador, causando uma redução percentual nas perdas de 64.62%. Observa-se também uma melhora no perfil de tensão do sistema, tornando-se praticamente plano.

TABELA 5
Perdas e Perfil de Tensão Antes e Após a GD

Comparação	Antes da GD	Após a GD
Perdas (kW)	209.90	74.26
Queda Tensão Max	0.018503	0.007422

Considere, agora, a restrição de penetração da GD de maneira a limitar a geração máxima em 5000kW. Assim, tem-se a nova solução do algoritmo genético apresentada na Tabela 6, na qual a potência total dos geradores determinada na solução do AG é de 5000kW, o que atende a restrição de penetração.

TABELA 6
Solução AG com restrição de penetração da GD

Ponto	Tipo de Gerador	Custo de Aquisição	Potência
Candidato 1	Gerador #2	R\$ 1500,00	3000 kW
Candidato 2	Gerador #1	R\$ 1000,00	2000 kW

Em contra partida, como a capacidade máxima de geração da GD agora é menor do que o apresentado na solução da Tabela 3, as perdas aumentaram, como mostra a Tabela 7 em comparação com a Tabela 5. Por razões equivalentes, a melhoria no perfil de tensão se torna ligeiramente menor.

TABELA 7
Perdas e Perfil Tensão com restrição penetração

Comparação	Antes da GD	Após a GD
Perdas (kW)	209.90	129.37
Queda de Tensão Max	0.018503	0.007417

B. Sistema CERJ

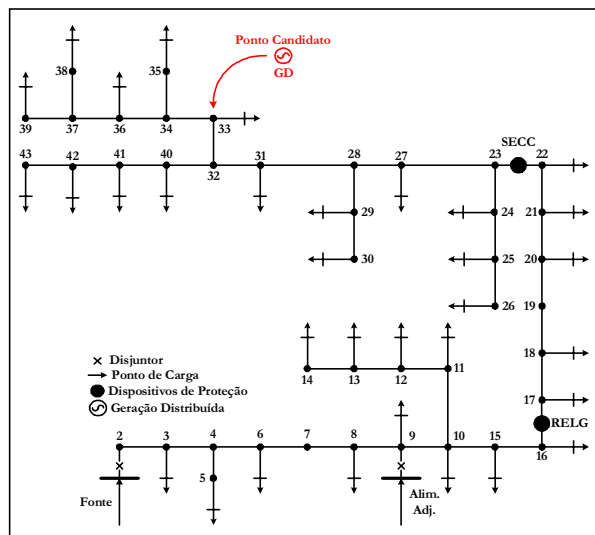


FIGURA 2 - Sistema CERJ

A Figura 2 mostra um alimentador da CERJ, o qual possui como dispositivos de proteção instalados um religador no trecho 16-17 e uma seccionizadora no trecho 22-23. Para estudos de alocação da geração distribuída, considerou-se o ponto 33 como candidato a

instalação da GD, e desconsiderou-se a participação do alimentador adjacente conectado no ponto 9 através de dispositivo de proteção normalmente a-berto (chave de recurso).

A Tabela 8 apresenta os geradores candidatos a instalação no ponto 33. O tempo de religamento da geração distribuída considerada foi de 0.5 horas, o custo de perdas do alimentador foi de R\$ 100,00/KW.

TABELA 8
Dados das Unidades de GD

Tipo de Gerador	Custo de Aquisição	Potência	Nível de Tensão
Gerador#1	R\$ 18750,00	3000 kW	13.8 kV
Gerador#2	R\$ 25000,00	4000 kW	13.8 kV
Gerador#3	R\$ 31250,00	5000 kW	13.8 kV

A Tabela 9 apresenta os índices de confiabilidade do alimentador sem considerar a instalação da geração distribuída. A queda de tensão máxima calculada pelo fluxo de potência antes da alocação da GD foi de 0.147978 pu e as perdas foram de 525.4 KW.

A Tabela 10 apresenta a solução ótima obtida pelo AG, onde uma Geração Distribuída de 3000 kW foi instalada no ponto candidato.

A Tabela 11 apresenta os índices de confiabilidade do alimentador considerando a instalação da GD obtida pelo algoritmo genético. O que se observa em termos de confiabilidade é que os valores dos índices relacionados à duração e custo (DEC, DEP, e CEND) diminuíram, pois com a instalação da GD, a duração da interrupção às cargas fica menor quando falha a alimentação principal. No entanto, os índices relacionados à frequência permanecem inalterados. Em termos de análise de fluxo de potência, o valor da queda de tensão máxima é reduzido para 0.016818 pu e as perdas passam a ser de 65.95 kW após a alocação da GD.

TABELA 9
Índices Confiabilidade - Configuração Original

INDICES DE CONFIABILIDADE			
FEC	DEC	FEP	DEP
[/ano]	[h/ano]	[/KW-ano]	[h/KW-ano]
44.538	72.436	43.296	69.862
END		CEND	
KWh/ano		R\$/ano	
385883.8		3,027,544.00	

TABELA 10
Solução Ótima do AG

Ponto	Tipo de Gerador	Custo de Aquisição	Potência
Candidato 1	Gerador #1	R\$ 18750,00	3000 kW

TABELA 11
Índices de Confiabilidade após alocação da GD

INDICES DE CONFIABILIDADE			
FEC	DEC	FEP	DEP
[/ano]	[h/ano]	[/KW-ano]	[h/KW-ano]
44.538	68.642	43.296	66.198
END		CEND	
KWh/ano		R\$/ano	
365643.2		2,849,640.0	

A Tabela 12 mostra uma comparação entre os valores de perdas antes e após a instalação da GD. O que se observa é que houve uma melhora significativa nas perdas do alimentador, causando uma redução percentual nas perdas de 87,44%. Observa-se também uma melhora no perfil de tensão do sistema.

TABELA 12
Perdas e Perfil de Tensão Antes e Após a GD

Comparação	Antes da GD	Após a GD
Perdas (kW)	525.37	65.95
Queda de Tensão Max	0.147978	0.016818

Considere, agora, a restrição de DEC para a GD de maneira a limitá-lo em 65.0 horas/ano. Assim, tem-se a nova solução do algoritmo genético apresentada na Tabela 13, na qual o gerador a ser instalado é de 4000 kW.

TABELA 13
Solução AG com restrição de DEC

Ponto	Tipo de Gerador	Custo de Aquisição	Potência
Candidato 1	Gerador #2	R\$ 25000,00	4000 kW

A Tabela 14 apresenta os índices de confiabilidade do alimentador considerando a instalação da GD obtida pelo algoritmo genético considerando a restrição de DEC. O que se observa em termos de confiabilidade é que os valores dos índices relacionados à duração e custo (DEC, DEP e CEND) diminuíram. Isto acontece porque o AG busca obter soluções que atendam a restrição de DEC. Em termos de análise de fluxo de potência, o valor das perdas passa a ser 85.4 kW e a queda de tensão máxima passa a ser de 0.022404 pu após a alocação da GD.

TABELA 14
Índices de Confiabilidade após alocação da GD com Restrição

INDICES DE CONFIABILIDADE			
FEC	DEC	FEP	DEP
[/ano]	[h/ano]	[/KW-ano]	[h/KW-ano]
44.538	63.802	43.296	61.920
END		CEND	
KWh/ano		R\$/ano	
342016.3		2,682,183.00	

A Tabela 15 mostra uma comparação entre os valores de perdas antes e após a instalação da GD considerando a restrição. O que se observa é que novamente houve uma melhora significativa nas perdas do alimentador, causando uma redução percentual nas perdas de 83,74%.

TABELA 15
Perdas e Perfil de Tensão Antes e Após a GD com Restrição

Comparação	Antes da GD	Após a GD
Perdas (kW)	525.37	85.4
Queda de Tensão Max	0.147978	0.022404

IV. CONCLUSÕES

Este projeto desenvolveu metodologia para localização e dimensionamento ótimo de geração distribuída em redes de distribuição de energia elétrica, levando em consideração o custo da instalação das unidades de GD e a melhoria nos índices de confiabilidade da rede, no perfil de tensão e nas perdas elétricas. A metodologia baseia-se na utilização de Algoritmos Genéticos, que desempenha o papel do especialista na tarefa de produzir candidatas potenciais à solução do problema de forma automática. Os programas computacionais desenvolvidos encontram-se em condições de serem utilizados pelos engenheiros da empresa em estudos de planejamento e operação da rede de distribuição.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G.X. Luo and A. Semlyen, "Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [2] R. Billinton and R. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques", Plenum Press - New York, Second Edition, 1992.
- [3] R. Billinton and R. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press - New York, Second Edition, 1996.
- [4] D. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [5] R. Allan and R. Billinton, "Probabilistic Assessment of Power Systems", Proceedings of the IEEE, Vol.88, No.2, February 2000.