



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

GAT-25  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO IV  
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT**

**INFLUÊNCIA DA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
NA CONFIABILIDADE DO SISTEMA**

**Carmen L.T. Borges\***

**Zulmar S. Machado Jr  
EE – COPPE/UFRJ**

**Djalma M. Falcão**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliar o efeito na confiabilidade do sistema da alocação de dispositivos de proteção e manobra na presença de geração distribuída (GD). Tem como principal aplicação realizar a alocação ótima de dispositivos de proteção na rede de distribuição primária, com o objetivo de melhorar os índices de confiabilidade a custos mínimos, com GD instalada ao longo da rede. O efeito da presença da GD é avaliado baseado em técnicas analíticas de cálculo de índices de confiabilidade em sistemas de distribuição radial, modificado para tratar a representação de múltiplos geradores. A metodologia é baseada na técnica de Algoritmos Genéticos, que substitui o especialista na tarefa de gerar soluções potenciais para o problema.

**PALAVRAS-CHAVE**

Confiabilidade. Geração Distribuída. Sistemas de Distribuição. Alocação Ótima. Algoritmos Genéticos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A reestruturação do setor elétrico vem introduzindo novas preocupações a respeito da confiabilidade do sistema, pois novos conceitos como acesso aberto ao sistema de transmissão, co-geração, produtores independentes, etc, levam a condições operativas não verificadas anteriormente. Uma alternativa para o atendimento da demanda crescente de energia elétrica é a utilização de geração distribuída. Geração distribuída (GD) está relacionada com a utilização de pequenas unidades geradoras instaladas em pontos estratégicos do sistema elétrico e, principalmente,

próximos a centros de consumo [1]. São incluídas na categoria de GD pequenas centrais elétricas de qualquer natureza (hidrelétricas, eólicas, térmicas, fotovoltaicas, etc), sem restrição de qual seja o proprietário (produtor independente ou concessionária), podendo operar na base, na ponta ou em ambas as situações. As novas tecnologias aplicadas em GD compreendem pequenas turbinas a gás, microturbinas, células combustíveis, etc.

A GD pode ser utilizada de modo isolado, suprindo a demanda local do consumidor, ou de modo integrado, fornecendo energia ao restante do sistema elétrico. Neste contexto, a necessidade de prover acesso à rede elétrica confronta com a necessidade de controlar a mesma e garantir níveis adequados de segurança e confiabilidade. As incertezas envolvidas no planejamento e operação do sistema tornam-se maiores do que no passado e certamente novas metodologias necessitam ser desenvolvidas para analisar e prever o comportamento do sistema.

Do ponto de vista da confiabilidade do suprimento, pode-se afirmar que a maioria das interrupções do fornecimento ao consumidor final ocorre devido a falhas na rede de distribuição. A taxa de falha anual e o tempo médio de reparo de trechos e equipamentos da rede de distribuição são bem mais elevados do que os do sistema de transmissão e geração. Uma forma de reduzir a duração e a frequência dessas interrupções é a instalação de dispositivos de proteção e manobra em certos locais da rede de distribuição primária a fim de reduzir o número de consumidores afetados. Na presença de geração distribuída, este problema se torna ainda mais complexo. A coordenação da proteção convencional em sistemas de distribuição é feita com base no fluxo de potência radial a partir da subestação e a presença de geradores ao longo da rede altera este panorama.

\* Caixa Postal 68.516 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ – BRASIL  
Tel.: (021) 2562-8080 - Fax: (021) 2562-8081 - E-MAIL: carmen@dee.ufrj.br

Este trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para avaliar o efeito na confiabilidade do sistema da alocação de dispositivos de proteção e manobra, automatizados ou não, na presença de geração distribuída. A metodologia é aplicada a sistemas de distribuição de energia, sendo, no entanto, adaptável para sistemas de transmissão. Dessa forma, a metodologia tem como principal aplicação efetuar a alocação ótima de dispositivos de proteção na rede de distribuição primária, com o objetivo de melhorar os índices de confiabilidade a custos mínimos, com GD instalada ao longo da rede.

A seleção dos locais para a instalação dos dispositivos de proteção em sistemas de grande porte é um problema de otimização combinatorial muito complexo. Os métodos convencionais de otimização, em geral, requerem elevado esforço computacional e impõem modelagens simplificadas. A metodologia desenvolvida é baseada na técnica de Algoritmos Genéticos, que substitui o especialista na tarefa de gerar soluções potenciais para o problema.

## 2.0 - ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Dispositivos de proteção, tais como disjuntores, religadores, seccionizadores, chaves fusíveis, etc., são utilizados em redes primárias de distribuição para:

- Isolamento de defeitos;
- Melhoria da confiabilidade;
- Reconfiguração da rede.

Os dispositivos de proteção desempenham um papel decisivo nos índices de continuidade do suprimento da rede de distribuição. A determinação dos tipos e locais de instalação desses dispositivos é uma tarefa relevante no planejamento da rede primária de distribuição, devido ao elevado custo desses equipamentos e ao diferente efeito dos mesmos nos índices de continuidade. Essa determinação é ainda mais importante no caso de redes automatizadas, isto é, nas quais os seccionizadores possam ser ativados remotamente [2].

As empresas de distribuição, em geral, seguem normas ou instruções operativas para orientar a instalação de novos dispositivos de proteção. Essas normas são preparadas a partir dos conceitos básicos de proteção de sistemas de distribuição e da experiência dos engenheiros. O número, tipo e localização de dispositivos de proteção a serem instalados em um determinado alimentador depende da impedância do sistema, da carga atendida, e da exposição dos alimentadores a situações que possam ocasionar defeitos. Como essas normas têm um caráter geral, em cada situação o engenheiro deve se valer de sua experiência para encontrar a melhor solução. As recentes exigências de ordem econômica e regulatória, causadas pela reestruturação e privatização do setor elétrico brasileiro, impõem a necessidade de uma forma mais otimizada de solução desse problema.

O problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em redes radiais de distribuição primária de grande porte consiste em determinar o local e tipo de equipamento de proteção a ser instalado, em determinados pontos pré-selecionados da rede, com o objetivo de atender determinados objetivos técnicos e

econômicos. De um ponto de vista matemático, esse problema pode ser formulado na forma de um problema de otimização combinatorial não-linear. Problemas dessa natureza, em geral, apresentam grande dificuldade de solução quando apresentam um número elevado de variáveis, como é caso do problema em questão.

## 3.0 - INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída oferece uma série de vantagens, na maioria decorrentes de sua proximidade do local de consumo, que podem ser resumidas como [3]:

1. Atendimento mais rápido ao crescimento da demanda, por ter um tempo de implantação menor do que a implantação centralizada combinada com os reforços na rede de transporte;
2. Aumento da confiabilidade do suprimento, por adicionar fontes não sujeitas às falhas dos sistemas de transmissão e distribuição;
3. Redução das perdas elétricas no transporte de energia e adiamento de investimentos para reforçar os sistema de transmissão e distribuição.

Por outro lado, a geração distribuída possui também desvantagens, devidas em geral ao aumento do número de empresas e entidades envolvidas, que podem ser resumidas como:

1. Maior dificuldade na coordenação de atividades administrativas, comerciais, de manutenção e de segurança;
2. Maior complexidade do planejamento e da operação do sistema elétrico.

A aplicação de GD mais comum é como "backup" de geração. Depois de ocorrida uma falha do fornecimento da concessionária, o gerador entra em operação para fornecer energia às cargas interrompidas. Para cargas sensíveis, os geradores de "backup" podem ser combinados com baterias e inversores para assegurar continuidade de potência. Para efeitos de confiabilidade, esta situação pode ser modelada configurando o tempo de chaveamento da chave de transferência para conexão do gerador como sendo igual ao tempo de partida da unidade de GD.

A segunda mais comum aplicação de GD é para operação no pico do sistema. Durante os períodos de alta demanda e/ou altos preços de energia, os geradores entram em operação para atender parte das cargas. Além de reduzir a conta de energia dos consumidores, esta aplicação de GD pode aumentar a confiabilidade, já que reduz o carregamento global do alimentador.

Outra aplicação de GD que vem ganhando popularidade é a injeção de potência na rede de distribuição, que acontece quando existe uma capacidade excedente àquela necessária para atender as cargas locais. A energia que é injetada na rede é medida e a conta de energia do consumidor passa a ser a diferença entre a energia consumida do sistema de distribuição e a injetada no mesmo. Esta modalidade provoca alguns impactos na confiabilidade do sistema de distribuição devido à mudança nos fluxos de potência nos alimentadores.

De um modo geral, se o método de avaliação da confiabilidade consegue trabalhar com sistemas com múltiplas fontes de GD operando em paralelo, as unidades de GD podem ser modeladas como fontes de

tensão constantes. O sistema pode ser modelado usando uma configuração radial e alocando chaves de transferência para conexão da GD.

#### 4.0 - METODOLOGIA DESENVOLVIDA

##### 4.1 Alocação Ótima Baseado em Algoritmos Genéticos

A metodologia para solução do problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em redes de distribuição primária desenvolvida consiste na combinação de dois métodos:

1) Um método de avaliação do impacto da instalação de dispositivos de proteção nos índices de continuidade do suprimento de energia elétrica, baseado em técnicas analíticas de cálculo de índices de confiabilidade em sistemas de distribuição radial [4], modificado para tratar a presença de múltiplos geradores.

2) Um método automático de alocação ótima de dispositivos de proteção baseado no uso de Algoritmos Genéticos (AG) [5], o qual utiliza o método de avaliação da confiabilidade acima descrito na avaliação das candidatas potenciais à solução do problema. O AG desempenha o papel do especialista na tarefa de produzir candidatas potenciais à solução do problema de forma automática. Considerações relativas à seletividade e coordenação da proteção podem ser incluídas no método através de ponderação na função de adequabilidade do AG.

A solução encontrada pelo método utilizando AG é um compromisso entre os custos incorridos na instalação dos equipamentos de proteção e a melhoria nos índices de continuidade, levando-se em consideração restrições de ordem prática relativas à proteção de sistemas de distribuição.

A alocação dos dispositivos é otimizada baseada no fornecimento prévio dos locais candidatos à instalação e da relação dos possíveis dispositivos a serem considerados para instalação em cada local. Baseado nas informações técnicas dos dispositivos e nas informações relativas aos custos de instalação, manutenção e aquisição dos mesmos, o método fornece a melhor solução para a rede que maximiza o benefício, medido pela melhoria da confiabilidade, e minimiza os custos. Pode ser considerada também a possibilidade de deslocamento de dispositivos ao longo do sistema, substituição ou até mesmo remoção de dispositivos já instalados, desde que a solução fornecida pelo AG seja melhor do que o caso base.

##### 4.2 Função Adequabilidade

A função de adequabilidade utilizada para dirigir o AG para a solução é formulada como a razão entre o benefício alcançado pela instalação dos dispositivos de proteção, medida pelo Valor Esperado do Custo da Energia Não Distribuída (CEND), e os custos de investimento e custos operacionais incorridos na instalação dos equipamentos. Essa função é definida por:

$$F = K \frac{\text{Benefício (B)}}{\text{Custo Total (C)}} \quad (1)$$

onde:

*Benefício (B)* = CEND (antes) - CEND (depois);

Custo Total (C) =  $C_{inv} + C_{inst} + C_{man}$  ;

$C_{inv}$  : custo do investimento;

$C_{int}$  : custo de instalação;

$C_{inv}$  : custo de manutenção;

$K < 1$ : constante utilizada para penalizar soluções potenciais que não satisfazem totalmente as restrições relativas a aspectos práticos da proteção de redes de distribuição. Algumas dessas restrições são: o número de elos fusíveis instalados em série não deve exceder a 3, um seccionizador só pode ser instalado quando existir equipamento de proteção com religamento na retaguarda, etc.

Para cálculo do CEND, é necessário o fornecimento do Custo de Interrupção do Consumidor em função do KW não atendido. O custo de interrupção varia de acordo com o tipo do consumidor (residencial, industrial, comercial, etc) ou o nível de tensão ao qual está conectado (AT, BT, etc).

O CEND de cada configuração (base ou candidata à solução) é calculado como:

$$CEND = \prod_{p=1}^{np} \prod_{j=1}^{nj} CIC_p(d_j) P_p \square_{jp} \quad [\$/\text{ano}] \quad (2)$$

onde:

$CIC_p(d_j)$ : Custo de Interrupção do Consumidor conectado ao ponto  $p$  para uma interrupção de duração  $d_j$  [\$/KW];

$P_p$ : Carga conectada ao ponto  $p$ , desatendida devido à interrupção  $j$  [KW];

$\square_{jp}$ : Taxa de falha do ponto  $p$  devido à interrupção  $j$  [/ano].

Na avaliação do benefício propiciado pela instalação dos dispositivos, podem também ser utilizados outros indicadores de desempenho diferentes do CEND, a saber:

- A diferença entre a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) na condição inicial e após a instalação dos dispositivos;
- A diferença entre a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) na condição inicial e após a instalação dos dispositivos.

##### 4.3 Avaliação da Confiabilidade na Presença de GD

O método de avaliação da confiabilidade desenvolvido neste projeto é baseado em técnicas analíticas de cálculo de índices de confiabilidade em sistemas de distribuição radial. O método foi projetado visando analisar o impacto da instalação de dispositivos de proteção e de geração distribuída nos indicadores de continuidade individuais e de conjunto do sistema. Foi utilizado o conceito de bloco de carga ao invés de pontos de carga, onde um bloco de carga corresponde ao conjunto de cargas, trechos e elementos da rede

conectados entre dispositivos de proteção ou manobra da rede. Como os índices de confiabilidade de todos os pontos de carga pertencentes a um mesmo bloco de carga são iguais, a adoção do conceito de bloco de carga aumenta a eficiência do método de avaliação da confiabilidade.

O efeito da presença de geração distribuída na confiabilidade do sistema foi considerado baseado em [6]. 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. O caso de GD com disponibilidade variável, como geradores eólicos, pode ser tratado através da associação de uma probabilidade de disponibilidade da unidade durante o período considerado.

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 isolamento 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.

## 5.0 - RESULTADOS

### 5.1 Sistema Exemplo

#### 5.1.1 Sem geração distribuída

A Figura 1 mostra o sistema exemplo utilizado para alocação ótima dos dispositivos de proteção, extraído de [4].

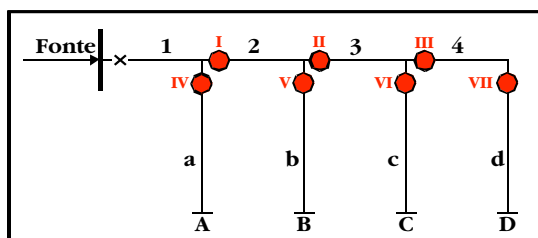


Figura 1 – Sistema Exemplo sem GD

Os círculos representam pontos candidatos a serem instalados dispositivos de proteção. Neste exemplo o

alimentador possui apenas o disjuntor principal. É importante destacar que o método de alocação ótimo desenvolvido permite que os pontos candidatos possuam dispositivos já existentes.

A Tabela 1 apresenta os dados dos pontos candidatos à alocação de dispositivos com os Custos Totais de Compra, Instalação e Manutenção. Considerou-se nos ramos principais (pontos I, II, & III) a possibilidade de alocação de Religador e de Chave Seccionadora e nos ramos laterais (pontos IV, V, VI & VII) a possibilidade de alocação de Chave Seccionadora e Fusível. Os valores dos custos dos equipamentos são ilustrativos. O Custo de Interrupção do Consumidor foi considerado constante para qualquer duração de interrupção, valendo 0,01488 R\$/kWh para os pontos de carga A e B e 0,01488 R\$/kWh para os pontos C e D.

Tabela 1 – Dados dos Pontos Candidatos – Sistema Exemplo

Dispositivo	Custo Total
<b>Pontos Candidatos I, II &amp; III</b>	
RELIGADOR	R\$ 1.200,00
SECCIONADORA	R\$ 890,00
<b>Pontos Candidatos IV, V, VI &amp; VII</b>	
SECCIONADORA	R\$ 890,00
FUSÍVEL	R\$ 290,00

A Tabela 2 apresenta os índices de confiabilidade do alimentador considerando sua configuração original.

Tabela 2 – Índices de Confiabilidade Configuração Original

FEC	DEC	CEND
[falhas/ano]	[horas/ano]	[R\$/ano]
2,2	6,0	5.531,00

No processo de alocação ótima, foram consideradas algumas restrições, como por exemplo, o valor do DEC não pode ser superior a 2.7 horas/ano e a cota orçamentária disponível é de no máximo R\$ 5.000,00.

A Tabela 3 apresenta a solução fornecida pela metodologia considerando como função objetivo a relação Benefício/Custo, onde o benefício corresponde à melhoria do DEC, FEC e CEND, e o custo corresponde ao Custo Total dos equipamentos instalados.

Tabela 3 – Solução da Alocação – Sistema Exemplo

Ponto Candidato	Dispositivo Lógico	Custo do Dispositivo
I	RELG	R\$ 1.200,00
II	RELG	R\$ 1.200,00
III	---	---
IV	FUSV	R\$ 290,00
V	FUSV	R\$ 290,00
VI	SECC	R\$ 890,00
VII	SECC	R\$ 890,00

A Tabela 4 apresenta os índices de confiabilidade obtidos após a instalação dos dispositivos de proteção. Pode-se observar a melhora nos índices de confiabilidade em relação à configuração original.

Tabela 4 – Índices de Confiabilidade Após Alocação

FEC	DEC	CEND
[falhas/ano]	[horas/ano]	[R\$/ano]

0,820	2,573	2.759,30
-------	-------	----------

O custo total de instalação dos dispositivos foi de R\$ 4.760,00, o qual atende a restrição de orçamento de R\$ 5.000,00. Além disto, o valor do DEC é menor que o valor estipulado para a restrição de DEC máximo de 2.70 horas/ano.

### 5.1.2 Influência da geração distribuída

A Figura 2 apresenta o sistema exemplo considerando um gerador instalado no final do alimentador, com capacidade de geração de 4000kW.

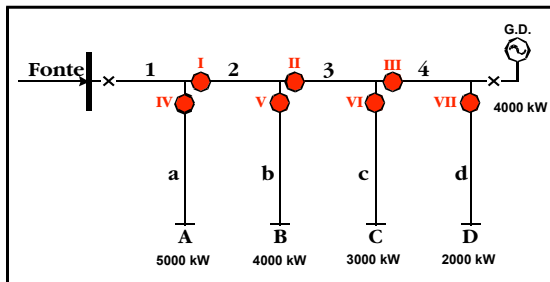


Figura 2 - Caso Exemplo com GD

A Tabela 5 apresenta os índices de confiabilidade do sistema considerando a presença da GD. Comparando o resultado com a Tabela 2, observa-se que não há mudança nos índices de confiabilidade. Isto acontece porque o alimentador em questão possui apenas um disjuntor como dispositivo de proteção. Qualquer falha que ocorrer nos trechos do alimentador fará com que todos os pontos de carga tenham que esperar o reparo da falha, já que não há como isolar o trecho em falta para alimentar o resto do sistema com a GD.

Tabela 5 – Índices de Confiabilidade - Configuração com GD

FEC	DEC	CEND
[falhas/ano]	[horas/ano]	[R\$/ano]
2,2	6,0	5.531,00

A Tabela 6 apresenta a solução fornecida pela metodologia considerando como função objetivo a mesmo do caso anterior, com as mesmas restrições.

Tabela 6 – Solução da Alocação – Com GD

Ponto Candidato	Dispositivo Lógico	Custo do Dispositivo
I	RELG	R\$ 1200,00
II	RELG	R\$ 1200,00
III	SECC	R\$ 890,00
IV	FUSV	R\$ 290,00
V	FUSV	R\$ 290,00
VI	FUSV	R\$ 290,00
VII	FUSV	R\$ 290,00

A Tabela 7 apresenta os índices de confiabilidade obtidos após a instalação dos dispositivos de proteção. Novamente, observa-se a melhora nos índices de confiabilidade em relação à configuração original provocada pela instalação dos dispositivos.

Tabela 7 – Índices Confiabilidade com GD – Após Alocação

FEC	DEC	CEND
-----	-----	------

[falhas/ano]	[horas/ano]	[R\$/ano]
0,773	2,212	1.930,30

O custo total de instalação dos dispositivos foi de R\$ 4.450,00, o qual atende com folga a restrição de orçamento de R\$ 5.000,00. Além disto, o valor do DEC é menor que o valor estipulado para a restrição de DEC máximo de 2.70 horas/ano. Pode-se observar a grande redução no valor do CEND propiciado pela combinação da alocação de dispositivos de proteção e utilização de GD. Ao considerar a geração distribuída, em particular, observa-se que o DEC, FEC e CEND são menores (comparar Tabela 4 e Tabela 7) e que o custo total de instalação dos dispositivos de proteção também é menor. Assim, observa-se que a utilização da geração distribuída contribuiu para a melhoria nos índices de confiabilidade, bem como, reduziu os custos de instalação de novos dispositivos de proteção.

## 5.2 Sistema Real

### 5.2.1 Sem geração distribuída

A Figura 3 apresenta um alimentador real de uma distribuidora de eletricidade do país. Os resultados que serão apresentados nesta seção não consideram a geração distribuída instalada no ponto 34. Este alimentador já apresenta instalado um religador e um seccionizador nos trechos 16-17 e 22-23, respectivamente.

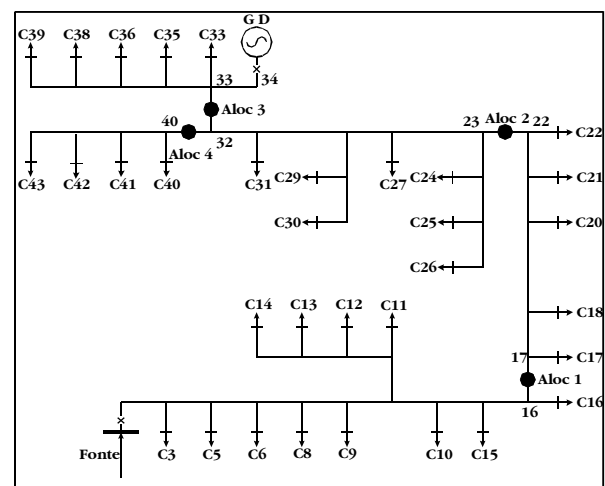


Figura 3 – Sistema Real

Os dispositivos candidatos que foram considerados para instalação são: religador, seccionizador e chave fusível. Os custos totais associados a instalação e compra destes equipamentos estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dispositivos Candidatos – Sistema Real

Dispositivos	Custo Total
RELIGADOR	R\$ 46.650,31
SECCIONADORA	R\$ 24.853,21
FUSIVEL	R\$ 257,48

A Tabela 9 apresenta os índices de confiabilidade do sistema na configuração original. Estes valores elevados nos índices se devem ao fato de que vários

dispositivos de proteção do tipo fusível ou elo-fusível foram desprezados ao se fazer agrupamento de cargas no sistema. Assim, acredita-se que os valores reais dos índices de confiabilidade para este alimentador sejam melhores.

Tabela 9 - Índices de Confiabilidade Configuração Original

FEC	DEC
[falhas/ano]	[horas/ano]
44,538	72,436

Para alocação ótima dos dispositivos de proteção foram considerados 4 pontos candidatos (círculos na Figura 3) nos seguintes trechos:

- (1) Trecho Religador que está localizado entre os nós 16 – 17;
- (2) Trecho Seccionadora que está localizado entre os nós 22 – 23;
- (3) Trecho entre os nós 32 – 33;
- (4) Trecho entre os nós 32 – 40.

Considerou-se como função objetivo a relação Benefício/Custo, onde o benefício corresponde à melhoria do DEC e do FEC, e o custo corresponde ao Custo Total dos equipamentos instalados. Os resultados da alocação ótima e os índices de confiabilidade obtidos estão apresentados na Tabela 10 e Tabela 11, respectivamente.

Tabela 10 – Solução da Alocação – Sistema Real

Ponto Candidato	Dispositivo Lógico	Custo do Dispositivo
Trecho RELG	Manter RELG	R\$ 219,17
Trecho SECC	Manter SECC	R\$ 219,17
Trecho 32 - 33	FUSV	R\$ 257,48
Trecho 32 - 40	FUSV	R\$ 257,48

Observa-se pela Tabela 10 que a alocação ótima obtida mantém o religador e seccionadora já existentes e instala 2 novos fusíveis no alimentador. Isto se dá pelo elevado custo associado aos dispositivos do tipo religador e seccionadora. Com o baixo custo associado ao fusível, o algoritmo determinou apenas a compra de fusíveis para melhoria na confiabilidade do sistema.

Tabela 11 - Índices de Confiabilidade Após Alocação

FEC	DEC
[falhas/ano]	[horas/ano]
35,677	55,317

Observa-se pela Tabela 11 que os valores dos índices são bem menores que o caso base. Melhores resultados destes índices poderão ser obtidos utilizando-se as restrições de DEC e FEC máximo.

### 5.2.2 Influência da geração distribuída

Nesta seção serão apresentados os resultados do sistema real considerando-se a geração distribuída mostrada na Figura 3. A capacidade máxima da geração distribuída é de 4000kW.

A Tabela 12 apresenta os índices de confiabilidade do sistema real considerando a presença da GD. Comparando com a Tabela 9, observa-se a melhoria

do DEC propiciado pela presença da GD, sem que no entanto haja alteração do FEC.

A Tabela 13 apresenta a solução obtida pela metodologia de alocação. Observa-se que este resultado é o mesmo apresentado na Tabela 10. Isto se deve ao fato de que os custos associados ao fusível são muitos baixos em comparação com os custos associados com o religador ou com a seccionadora.

Tabela 12 – Índices de Confiabilidade – Config.com GD

FEC	DEC
[falhas/ano]	[horas/ano]
44,538	63,802

Tabela 13 – Solução da Alocação – Com GD

Ponto Candidato	Dispositivo Lógico	Custo do Dispositivo
Trecho RELG	Manter RELG	R\$ 219,17
Trecho SECC	Manter SECC	R\$ 219,17
Trecho 32 - 33	FUSV	R\$ 257,48
Trecho 32 - 40	FUSV	R\$ 257,48

A Tabela 14 apresenta os índices de confiabilidade do sistema considerando a GD.

Tabela 14 – Índices Confiabilidade com GD Após Alocação

FEC	DEC
[falhas/ano]	[horas/ano]
35,677	40,059

Comparando a Tabela 9 e Tabela 14, observa-se a considerável melhoria tanto no DEC como no FEC obtida pela combinação da alocação de dispositivos de proteção com a utilização de GD.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para avaliar o efeito na confiabilidade do sistema da alocação de dispositivos de proteção e manobra, na presença de geração distribuída (GD). Foram apresentados resultados de melhoria da confiabilidade para um sistema exemplo retirado da literatura e para um sistema de distribuição real brasileiro.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Notas sobre Geração Distribuída, *Relatório Técnico do Fórum de Cogeração do Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE)*, Julho 2001.
- [2] R.M.G. Velasquez, D.M. Falcão, "Optimal Switching and Protection Devices Placement in Distribution Networks for Reliability Improvement Using Genetic Algorithms", *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP)*, Budapest, Hungary, June 2000.
- [3] R. E. Brown, L. A. Freeman, "Analyzing the Reliability Impact of Distributed Generation", *Proceedings of the IEEE Summer Meeting*, pp. 1013-1018, July 2001.
- [4] R. Billinton, R. Allan, " *Reliability Evaluation of Power Systems*", Plenum Press – New York, Second Edition, 1996.

[5] D. Goldberg, "*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*", Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.

[6] R. Allan, R. Billinton, "Probabilistic Assessment of Power Systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No. 2, pp. 140-162, February 2000.