



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 – 06 a 10 de outubro

Olinda – Pernambuco – Brasil

### Otimização da Alocação de Dispositivos de Proteção em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

**Eduardo Zambon**  
UFES – Universidade  
Federal do Espírito Santo  
zambon@inf.ufes.br

**Berilhes B. Garcia**  
UFES – Universidade  
Federal do Espírito Santo  
berilhes@inf.ufes.br

**Elias F. Azeredo**  
ESCELSA – Espírito Santo  
Centrais Elétricas S.A.  
eliasfa@enbr.com.br

#### Palavras-chave

Indicadores de Continuidade

Planejamento da Proteção de Redes de Distribuição

*Simulated Annealing*

#### Resumo

Uma empresa de distribuição de energia elétrica deve prestar aos consumidores um serviço confiável, com investimentos prudentes, sendo a qualidade do serviço quantificada por indicadores de continuidade definidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Um ponto chave para melhoria dos indicadores é a correta alocação de equipamentos de proteção e seccionamento (religadores, chaves fusíveis e chaves seccionadoras) na rede, dentre os quais, os religadores possuem um papel mais relevante e, também, um custo mais elevado. Este artigo apresenta métodos estudados e desenvolvidos para tratar o problema de otimização da alocação de religadores em redes de distribuição.

#### 1. Introdução

Este trabalho trata da otimização da alocação de religadores nas redes de distribuição. A partir dos indicadores de qualidade: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), que permitem mensurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica em uma rede, é desenvolvida uma ferramenta multi-plataforma (Windows/Linux), que permite ao usuário realizar, de forma interativa, um estudo de alocação de religadores na rede de distribuição.

A continuidade do fornecimento de energia elétrica causa um impacto direto aos consumidores de um modo geral e, principalmente, aos de grande porte, como indústrias, por exemplo. Nesta área de atividade, pequenas quedas na alimentação de energia podem implicar em um grande prejuízo. Muitos processos fabris não podem ser suspensos antes do seu término e devem ser retomados do início quando ocorre uma interrupção no fornecimento de energia, provavelmente acarretando perda de matérias-primas e necessidade de manutenção de equipamentos.

Interrupções no fornecimento de energia podem ser causadas por diversos fatores, tais como tempestades, curtos-circuitos provocados por árvores, animais, mau funcionamento de equipamentos, entre outros.

Além das medidas preventivas empregadas pelas concessionárias para tentar diminuir a ocorrência de falhas, as redes de distribuição contam com um sistema de proteção formado por diferentes tipos de dispositivos. Estes são responsáveis por isolar uma falha na rede e impedir a sua propagação. Por isso, uma alocação adequada dos dispositivos de proteção ao longo de uma rede melhora a sua confiabilidade e, portanto, melhora a qualidade de serviço prestada aos clientes.

## 2. Características da rede de distribuição

A energia elétrica produzida em usinas hidrelétricas, termoeletricas e outras fontes passa por um longo caminho até chegar aos consumidores. Entretanto, para efeito do problema aqui tratado, considera-se que o ponto inicial do fornecimento de energia em uma rede de distribuição é a subestação. O entorno geográfico da subestação está coberto por uma rede de distribuição que é composta por um ou mais alimentadores, os quais formam a linha de distribuição até os consumidores. Um alimentador, por sua vez, é constituído por diversos blocos, sendo estes delimitados por algum dispositivo de proteção ou seccionamento.

Este trabalho trata somente de alimentadores radiais, isto é, que possuem uma única fonte de energia (no caso, a subestação). Existem chaves ditas “normalmente abertas”, que podem interligar dois pontos de alimentadores distintos e ser utilizadas para realizar manobras que redirecionam o fluxo da energia na malha em caso de falhas. Uma vez que a determinação dos melhores pontos para a instalação destas chaves constitui por si só um problema bastante complexo, neste estudo as chaves normalmente abertas são desconsideradas: assume-se que todos os alimentadores são completamente isolados entre si.

### 2.1. Interrupções e falhas

Uma interrupção no fornecimento de energia elétrica pode ser classificada como permanente ou temporária. De acordo com a resolução da ANEEL (2000), uma interrupção é definida como permanente quando sua duração exceder um período limite e, como temporária, caso contrário. Este período pode ser de 1 ou 3 minutos, conforme o contrato da concessionária. A mesma classificação pode ser utilizada para falhas no sistema de distribuição. Uma *falha permanente* gera uma interrupção permanente e requer que uma equipe de reparo seja despachada até o local de ocorrência da falha para realizar o conserto. Uma *falha temporária*, dependendo do tipo do equipamento de proteção que seja acionado a partir dela, pode gerar tanto uma interrupção permanente quanto uma interrupção temporária.

### 2.2. Equipamentos de proteção e seccionamento

Os equipamentos de proteção e seccionamento são instalados ao longo da rede com a intenção de evitar que os consumidores fiquem sem fornecimento de energia elétrica por muito tempo e com muita frequência. Suas posições devem ser adequadamente escolhidas, de acordo com os seus tipos e as características de cada trecho da rede. Os dispositivos foram divididos em três grupos: religadores, fusíveis e chaves.

- **Religador:** é um equipamento automático que interrompe e restabelece o fornecimento de energia de um trecho do alimentador enquanto houver falha, até uma certa quantidade de tentativas. Desta forma, ao atingir um religador, uma falha temporária é tratada, causando somente uma interrupção temporária. Já se a falha é permanente, o religador suspende o fornecimento após alcançar o seu limite de tentativas de religamento e deve ser reativado manualmente (ou remotamente caso possua esta funcionalidade), causando uma interrupção permanente. Este equipamento possui um custo elevado, portanto os pontos para sua alocação devem ser bem escolhidos.
- **Fusível:** é um equipamento de proteção simples e barato. Todo fluxo de corrente elétrica superior à sua corrente nominal interrompe o fornecimento e obriga a sua troca. Tanto falhas permanentes quanto temporárias causam uma interrupção permanente ao atingirem um fusível.
- **Chave:** uma chave não é um dispositivo de proteção e sim de seccionamento. Embora não respondam ativamente a uma contingência, as chaves podem ser utilizadas para isolar trechos com falha de um alimentador, permitindo que o fornecimento a alguns consumidores seja restaurado mais rapidamente que a outros.

### 2.3. Estrutura do alimentador

A Figura 1(a) apresenta a topologia do alimentador A1 e as áreas correspondentes aos seus oito blocos. As letras R, F e C indicam qual o tipo do equipamento delimitador do bloco: religador, fusível ou chave, respectivamente.

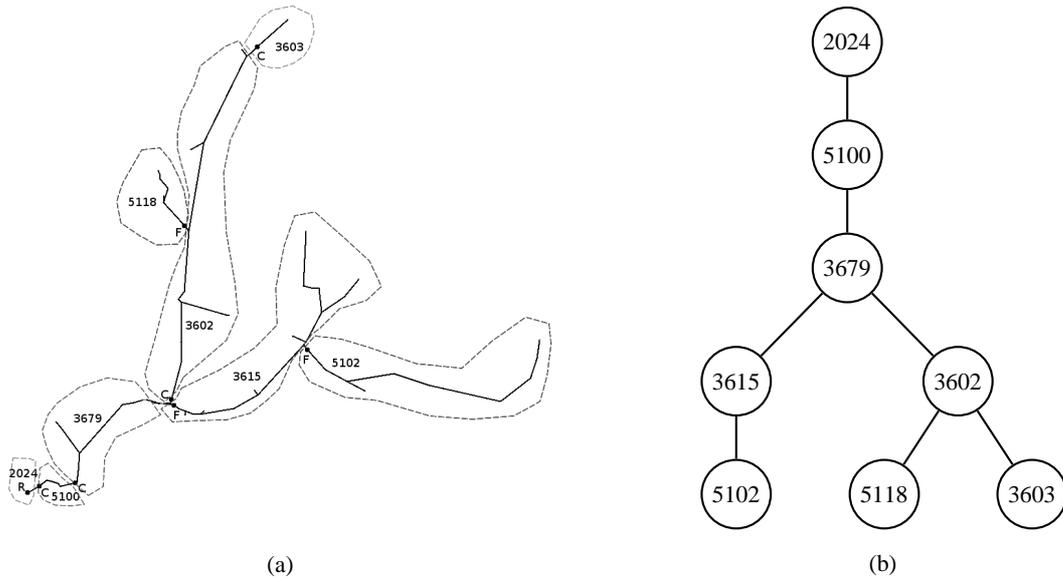


Figura 1: Topologia e árvore do alimentador A1

Analisando a estrutura de um alimentador, verifica-se de imediato a existência de uma hierarquia de distribuição em que um bloco possui um pai (exceto o primeiro), de onde chega a energia, e zero ou mais filhos, para onde ela flui. Esta forma de estruturação dos alimentadores permite a sua representação como uma árvore, em que cada nó corresponde a um bloco. O nó raiz da árvore corresponde ao primeiro bloco do alimentador, onde restrições operacionais obrigam a instalação de um religador automático de subestação (disjuntor). A Figura 1(b) mostra a representação em forma de árvore do alimentador A1.

A cada nó associa-se uma dada quantidade de consumidores que estão localizados na área geográfica correspondente àquele bloco. Uma aresta entre dois nós indica uma ligação (cabearmento elétrico) entre eles. Uma falha em um trecho da rede de distribuição pode levar a uma desconexão (remoção de uma aresta) de um nó, criando uma subárvore formada pelo nó desconectado e todos os seus filhos. Enquanto a aresta removida não for reinserida (i.e., a falha não for consertada), todos os consumidores associados aos nós pertencentes à subárvore ficarão sem energia elétrica.

A partir da árvore do alimentador A1 e tomando como exemplo a ocorrência de uma falha no bloco 3615, observa-se que os consumidores dos blocos 3615 e 5102 ficarão sem fornecimento de energia até que a falha seja restaurada. Define-se que o bloco 5102 está localizado em uma posição a jusante do bloco 3615 por pertencer à subárvore formada a partir deste bloco. Por outro lado, os consumidores do bloco 3615 também ficarão sem fornecimento de energia caso haja uma falha nos blocos 2024, 5100 ou 3679. Estes três blocos são ditos localizados em posição a montante do bloco 3615.

#### 2.4. Indicadores de continuidade

Dois indicadores de continuidade foram estudados: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). O DEC de um alimentador pode ser estimado por

$$DEC = \frac{\sum_{i \in B} H_i N_i}{N_T} \quad [\text{horas / ano}] \quad (1)$$

e o FEC por

$$FEC = \frac{\sum_{i \in B} I_i N_i}{N_T} \quad [\text{interrup. / ano}] \quad (2)$$

onde  $B$  é o conjunto formado por todos os blocos de um alimentador,  $N_i$  é o número de consumidores do bloco  $i$ ,  $N_T$  é o número total de consumidores do alimentador e  $D_i$  e  $F_i$  correspondem a estimativas do número de horas por ano que o bloco  $i$  fica interrompido e de quantas interrupções ele sofreu, respectivamente.

Uma vez que se busca estimar como as mudanças nos equipamentos de proteção afetam estes índices, é necessária a utilização de taxas que indiquem uma expectativa para o número de falhas de cada bloco de um alimentador. Para isso, são definidas a *taxa de falha de permanente* ( $\lambda$ ) e a *taxa de falha de temporária* ( $\gamma$ ), que descrevem uma expectativa para o número de vezes por ano que um bloco deve sofrer uma falha permanente e uma falha temporária, respectivamente. Ambas podem ser obtidas através do histórico de falhas dos alimentadores mantido pela concessionária. Para os casos onde não há dados suficientes ou confiáveis para se determinar as taxas de falhas, Brown & Ochoa (1998) apresentam um método que permite estimá-las.

### 3. Simulação Analítica

A Simulação Analítica é um método para estimar os índices de confiabilidade de um alimentador. Esta simulação assume que a rede de distribuição permanece em seu estado normal de operação a maior parte do tempo e que as contingências são independentes e mutuamente exclusivas. Segundo Brown (2002), esta técnica é capaz de modelar características físicas e operacionais detalhadas.

Esta forma de simulação analisa as respostas do sistema de proteção às contingências, permitindo determinar o impacto que uma falha exerce sobre cada componente. Este impacto é ponderado pela sua probabilidade de ocorrência ( $\lambda$  ou  $\gamma$ ), resultando em uma estimativa do efeito de uma falha em cada componente. Os valores de  $D$  e  $F$  são obtidos acumulando-se as contribuições individuais de cada contingência.

#### 3.1. Algoritmo para estimativa de índices de confiabilidade

Para se realizar uma estimativa dos índices DEC e FEC é necessário considerar a estrutura do alimentador. Assim, inicialmente, deve-se construir a árvore do alimentador, na qual cada nó da árvore corresponde a um bloco e contém as seguintes informações:

- Tipo e identificação do equipamento instalado no bloco;
- Número de consumidores do bloco ( $N$ );
- Taxa de falhas permanentes ( $\lambda$ );
- Taxa de falhas temporárias ( $\gamma$ );
- Tempo médio de reparo (MTTR); e
- Tempo médio de chaveamento (MTTS).

Esta representação em árvore é a entrada do algoritmo de Simulação Analítica, adaptado de Brown (2002) e mostrado no Algoritmo 1. Os índices DEC e FEC obtidos como saída do algoritmo têm um período de apuração correspondente à unidade das taxas  $\lambda$  e  $\gamma$ . Assim, se estas taxas estão indicadas em [falhas/ano], os índices de DEC e FEC calculados correspondem a [horas/ano] e [interrupções/ ano], respectivamente.

O algoritmo simula uma falha permanente (ponderada pelo  $\lambda$ ) e uma temporária (pelo  $\gamma$ ) para cada bloco do alimentador. Seja  $b$  o bloco onde uma contingência está sendo simulada. Para se determinar o equipamento de proteção  $p$  que atua sobre a falha, basta realizar uma busca a montante de  $b$ . Quando  $b$  é definido por um religador ou um fusível,  $p$  e  $b$  correspondem ao mesmo nó.

O Algoritmo 1 pode ser facilmente modificado para contabilizar outros aspectos que venham a ser considerados relevantes. Por exemplo, caso se tenha interesse em investigar o número de interrupções temporárias ocorridas em um alimentador basta incluir um procedimento que contabiliza as falhas temporárias limpas por religadores.

Algoritmo 1: Simulação Analítica

```

1  {Entrada: a árvore de um alimentador com os parâmetros  $N$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $MTTR$  e  $MTTS$ 
2    definidos para todos os blocos}
3
4  {Variáveis:
5    -  $D_i$  = estimativa do número de horas por ano que o bloco  $i$  fica interrompido
6    -  $F_i$  = estimativa do número de interrupções por ano sofridas pelo bloco  $i$ 
7    -  $t_b$  = taxa de falha (permanente ou temporária) do bloco  $b$ }
8
9  {Saída: estimativa dos índices DEC e FEC para a configuração do alimentador
10   de entrada}
11
12 { $B$  é o conjunto formado por todos os blocos do alimentador}
13  $\forall i \in B: F_i \leftarrow 0$ 
14  $\forall i \in B: D_i \leftarrow 0$ 
15 Para todo  $b \in B$  faça
16   Gere uma falha temporária e uma permanente em  $b$ .
17   Seja  $p$  o equipamento de proteção a montante mais próximo da falha.
18   Se a falha é permanente  $\vee$  (a falha é temporária  $\wedge p$  é um fusível) então
19     {Ocorreu uma interrupção permanente}
20     Se a falha é permanente então
21        $t_b \leftarrow \lambda_b$ 
22     Senão
23        $t_b \leftarrow \gamma_b$ 
24     Fim se
25     Para todo bloco  $i$  a jusante do bloco definido por  $p$  (inclusive) faça
26        $F_i \leftarrow F_i + t_b$ 
27        $D_i \leftarrow D_i + t_b \times MTTR_b$ 
28     Fim faça
29   Fim se
30 Fim faça
31 Calcule os valores de DEC e FEC utilizando as equações (1) e (2)

```

#### 4. Busca Exaustiva

Por se tratar de um método de solução força bruta, a idéia geral do algoritmo da Busca Exaustiva é bastante simples, como pode ser visto no Algoritmo 2. A árvore de entrada é a mesma definida para a Simulação Analítica e o valor de  $r$  corresponde ao número de religadores que se deseja alocar no alimentador.

Para se explorar todas as configurações possíveis para a alocação dos  $r$  religadores nos blocos do alimentador (definidos pelo conjunto  $B$ ), deve-se enumerar o conjunto  $C$ , formado por todas as combinações  $r$  a  $r$  dos blocos de  $B$ .

A cada passo do *loop* da linha 26 uma Simulação Analítica é realizada sobre a nova árvore do alimentador (com os  $r$  religadores alocados nos blocos indicados por  $c$ ), para estimar os índices desta configuração. Ao final do algoritmo, as variáveis  $DEC^*$  e  $FEC^*$  correspondem ao DEC e FEC ótimos para o alimentador. É importante notar que os conjuntos dos pontos de alocação de religadores para se obter estes valores ótimos ( $R_{DEC^*}$  e  $R_{FEC^*}$ ) podem ser diferentes. Isto ocorre porque as otimizações do DEC e do FEC são objetivos potencialmente conflitantes: os melhores pontos de alocação para o FEC não necessariamente correspondem aos melhores pontos para o DEC (e vice-versa). Nestas situações, pode-se buscar minimizar os índices simultaneamente de forma ponderada, como mostrado na seção seguinte.

Quando um alimentador já possui um certo número  $r_i$  de religadores instalados, estes podem ser realocados retirando-os da árvore e realizando uma Busca Exaustiva com  $r = r_i$ . Combinações de realocação e alocações de novos dispositivos também são possíveis.

A partir de uma análise do Algoritmo 2, chega-se à conclusão que a Busca Exaustiva é um algoritmo exponencial, o que significa que o seu tempo de execução só é aceitável quando aplicada a alimentadores com poucos blocos ou quando  $r$  é muito pequeno.

```

1  {Entrada :
2  - a árvore de um alimentador com os parâmetros  $N$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $MTR$  e  $MTTS$ 
3    definidos para todos os blocos
4  -  $r$  = o número de religadores a serem instalados
5
6  {Variáveis :
7  -  $DEC^*$  = o melhor  $DEC$  obtido até o momento
8  -  $R_{DEC^*}$  = conjunto dos blocos onde os religadores devem ser instalados para
9    se obter o  $DEC^*$ 
10 -  $FEC^*$  = o melhor  $FEC$  obtido até o momento
11 -  $R_{FEC^*}$  = conjunto dos blocos onde os religadores devem ser instalados para
12   se obter o  $FEC^*$ }
13
14 {Saída: os valores ótimos de  $DEC$  e  $FEC$  e os blocos onde os religadores devem
15   ser instalados}
16
17  $DEC^* \leftarrow \infty$ 
18  $R_{DEC^*} \leftarrow \emptyset$ 
19  $FEC^* \leftarrow \infty$ 
20  $R_{FEC^*} \leftarrow \emptyset$ 
21 { $B$  é o conjunto formado por todos os blocos do alimentador}
22 { $C$  é o conjunto de todas as combinações  $r$  a  $r$  dos blocos de  $B$ }
23 Para todo  $c \in C$  faça
24   Substitua os equipamentos dos  $r$  blocos de  $c$  por religadores
25   Execute uma Simulação Analítica nesta nova configuração da árvore
26   { $DEC_S$  e  $FEC_S$  são os resultados da simulação}
27   Se  $DEC_S < DEC^*$  então
28      $DEC^* \leftarrow DEC_S$ 
29      $R_{DEC^*} \leftarrow c$ 
30   Fim se
31   Se  $FEC_S < FEC^*$  então
32      $FEC^* \leftarrow FEC_S$ 
33      $R_{FEC^*} \leftarrow c$ 
34   Fim se
35   Restaure a configuração original do alimentador
36 Fim faça

```

## 5. Simulated Annealing

Acredita-se que o problema aqui tratado pertença à classe de complexidade *NP-hard*, o que, unido ao fato de a Busca Exaustiva ser um algoritmo exponencial, motivou a decisão de se tentar utilizar meta-heurísticas como forma de solução.

Dentre as meta-heurísticas mais comuns foi escolhida a de *Simulated Annealing*, criada por Kirkpatrick et al. (1983), por se tratar de um algoritmo de simples implementação, empregado em variados problemas de otimização e que normalmente apresenta bons resultados.

### 5.1. Idéia geral do algoritmo

O *Simulated Annealing* é um algoritmo de busca de soluções capaz de escapar de ótimos locais. Seu nome vem de uma analogia com o processo de resfriamento de sólidos, em que um material é aquecido e então deixado esfriar lentamente até atingir uma certa temperatura final. A meta-heurística baseia-se nesta idéia para direcionar a busca pelo ótimo global em problemas de otimização. Mais detalhes sobre a história e desenvolvimento do *Simulated Annealing*, bem como resultados sobre a sua convergência pode ser vistos em Glover & Kochenberger (2002).

O Algoritmo 3 apresenta a forma geral do *Simulated Annealing* adaptada de Atallah (1998). A cada iteração do algoritmo, uma nova solução é gerada e comparada com a solução atual. Em caso de melhoria, o novo estado é aceito. Já as soluções piores são aceitas com uma probabilidade que é inversamente

proporcional à temperatura atual do sistema ( $T$ ), o que pode levar a busca a escapar de ótimos locais. Uma vez que  $T$  é não-crescente, os piores estados são aceitos com menos frequência à medida que o sistema esfria, até o seu “congelamento”: o momento de parada do algoritmo.

Algoritmo 3: Forma geral do *Simulated Annealing*

1	{ <i>Entrada</i> :
2	– $AR =$ taxa de resfriamento ( <i>Annealing rate</i> ). $AR \in (0, 1)$
3	– $T_0 =$ a temperatura inicial. $T_0 \in (0, 1)$
4	– $S_0 =$ o estado inicial do sistema}
5	
6	{ <i>Variáveis</i> :
7	– $T =$ temperatura atual
8	– $S =$ o estado atual do sistema}
9	
10	{ <i>Saída</i> : $S$ corresponde à melhor solução encontrada}
11	
12	$T \leftarrow T_0$
13	$S \leftarrow S_0$
14	<b>Enquanto</b> (critério de parada não for satisfeito) <b>faça</b>
15	<b>Enquanto</b> (o número mínimo de estados não for gerado) <b>faça</b>
16	Gere um novo estado $S'$ na vizinhança de $S$
17	{ $E$ é a função de avaliação de um estado }
18	$\Delta E = E(S') - E(S)$
19	<b>Se</b> $\Delta E < 0$ <b>então</b> { $S'$ é um estado melhor, aceite-o }
20	$S \leftarrow S'$
21	<b>Senão</b> { $S'$ é um estado pior }
22	Gere uma variável aleatória $\alpha$ , $0 \leq \alpha \leq 1$
23	<b>Se</b> $\alpha \leq e^{(-\Delta E)/T}$ <b>então</b>
24	$S \leftarrow S'$ { aceite $S'$ para tentar escapar de um ótimo local }
25	<b>Fim se</b>
26	<b>Fim se</b>
27	<b>Fim faça</b>
28	$T \leftarrow T \times AR$ { a temperatura do sistema diminui }
29	<b>Fim faça</b>

Para o problema aqui tratado, o sistema citado no algoritmo corresponde a um alimentador e um estado ou solução equivalem aos pontos de alocação dos  $r$  religadores. A temperatura inicial  $T_0$  e a taxa de resfriamento  $AR$  são parâmetros do algoritmo e devem ser calibradas adequadamente. O estado inicial é gerado escolhendo-se aleatoriamente  $r$  blocos do alimentador como os locais para alocação dos  $r$  religadores.

O critério de parada do *loop* da linha 14 deve ser escolhido de forma a levar o algoritmo a terminar quando a solução estiver congelada. Para este critério, buscou-se estabelecer um compromisso entre o tempo de execução do algoritmo e a qualidade das soluções encontradas.

A cada temperatura  $T$ , um certo número de soluções deve ser gerado, como definido no laço da linha 15. Para este problema, convencionou-se que o número mínimo de soluções corresponde a  $r$  configurações distintas para a alocação dos  $r$  religadores. Um novo estado  $S'$  pode ser gerado a partir de  $S$  (linha 16) de variadas formas.

Dada uma solução proposta pelo *Simulated Annealing*, é preciso avaliá-la e compará-la com a solução atual. Como já dito na seção anterior, as buscas para minimizar o DEC e o FEC podem ser conflitantes. Assim, definiu-se a função de avaliação  $E$  (linha 17) como:

$$E(DEC, FEC) = W_{DEC} \left( \frac{DEC}{DEC_0} \right) + W_{FEC} \left( \frac{FEC}{FEC_0} \right). \quad (3)$$

Os pesos  $W_{DEC}$  e  $W_{FEC}$  da equação 3 podem ser ajustados de acordo com a importância relativa da redução de cada índice. Logo, para que o algoritmo busque soluções que melhorem os dois índices

simultaneamente, quando estes têm a mesma importância, utiliza-se  $W_{DEC} = 0.5$  e  $W_{FEC} = 0.5$ . Para os casos em que se deseja otimizar somente um dos índices, basta tomar o seu peso como 1 e fazer o outro igual a zero. Os valores  $DEC_0$  e  $FEC_0$  são utilizados para normalizar os índices e impedir que a função  $E$  seja dominada por um DEC ou FEC muito grande. Eles são obtidos realizando-se uma Simulação Analítica sobre a configuração inicial do alimentador, após todos os religadores já instalados terem sido retirados. A Simulação Analítica continua sendo utilizada para se estimar os índices de qualquer solução que venha a ser gerada pelo *Simulated Annealing*.

O teste da linha 19 do Algoritmo 3 aceita as soluções que melhoram o valor de  $E$  e as linhas 22-25 indicam que a probabilidade de se aceitar uma configuração que piora a função  $E$  é dada por  $e^{(-\Delta E)/T}$ .

## 5.2. As diferentes formas de vizinhança

Para se gerar uma nova configuração para alocação de religadores a partir de um estado atual  $S$  deve-se explorar o espaço de soluções em uma dada vizinhança de  $S$ , que pode ser definida de diferentes formas. As quatro formas empregadas no sistema são:

- **Randômica:** neste caso, um novo estado é gerado movendo-se um dos  $r$  religadores instalados na árvore para uma nova posição determinada de forma aleatória. Esta forma de vizinhança permite que o algoritmo escape facilmente de mínimos locais mas exige o uso de valores mais altos para  $T_0$  e  $AR$  para a obtenção de boas soluções.
- **Blocos ordenados por  $\lambda$ :** analisando-se os resultados obtidos com a Busca Exaustiva, verificou-se que geralmente as soluções ótimas indicavam a alocação de religadores nos blocos com as maiores taxas de falhas. Assim, este caso toma como vizinhança de  $S$  os blocos com os maiores valores de  $\lambda$  que ainda não foram visitados.
- **Chaves ordenadas por  $\lambda$ :** este caso é similar ao anterior e baseia-se na tendência de alocação de religadores em blocos onde há chaves instaladas.
- **Vizinhança na árvore:** um religador escolhido arbitrariamente é movido para os seus blocos vizinhos na árvore (pai e filhos) e o melhor resultado obtido passa a ser o estado  $S'$ .

As três primeiras formas de definição de vizinhanças podem levar o algoritmo a dar grandes saltos no espaço de soluções. Desta forma, pode ser necessário realizar uma busca gulosa a partir de  $S$  no final do algoritmo para se tentar chegar a um ótimo local. Esta busca é similar à vizinhança na árvore mas somente aceita novas configurações que melhoram o valor da função de avaliação  $E$ .

## 5.3. A versão final do algoritmo

Não foi possível identificar as situações que levam ao bom desempenho de uma forma de vizinhança e geram soluções ruins em outras, portanto buscou-se combinar as quatro formas em um único algoritmo, na expectativa de que um bom resultado obtido por um tipo de vizinhança fosse mantido e talvez melhorado pelas demais. Com isso, chega-se à versão final do *Simulated Annealing* adaptado ao problema, mostrada no Algoritmo 4.

Foi colocado um laço mais externo (linha 13) que define qual forma de vizinhança deve ser utilizada em cada uma das suas 4 iterações. Inicialmente,  $S$  começa com a solução  $S_0$  e depois se propaga pelas execuções com diferentes vizinhanças. Esta alteração aumenta o esforço de processamento do algoritmo. No entanto, o tempo de execução do *Simulated Annealing* permaneceu baixo (menos de 1 minuto), mesmo para alimentadores com mais de 100 blocos.

```

1  {Entrada :
2  -  $r$  = o número de religadores a serem instalados
3  -  $S_0$  = estado inicial do alimentador (alocação aleatória dos  $r$ 
4  religadores )}
5
6  {Variáveis :
7  -  $T$  = temperatura atual
8  -  $S$  = configuração atual da árvore}
9
10 {Saída: a melhor solução obtida a partir do estado  $S$ }
11
12  $S \leftarrow S_0$ 
13 Para cada forma de vizinhança faça
14     Ajuste  $T$  e  $AR$  conforme a vizinhança utilizada
15     Enquanto não passaram 15 iterações sem melhoria de  $S$  faça
16         Enquanto não forem geradas  $r$  formas de alocação distintas faça
17             Gere um novo estado  $S'$  conforme definição de vizinhança corrente
18             { $E$  é definida na equação (3)}
19              $\Delta E = E(S') - E(S)$ 
20             Se  $\Delta E < 0$  então
21                  $S \leftarrow S'$ 
22             Senão
23                 Gere uma variável aleatória  $\alpha$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ 
24                 Se  $\alpha \leq e^{(-\Delta E)/T}$  então
25                      $S \leftarrow S'$ 
26             Fim se
27         Fim se
28     Fim faça
29      $T \leftarrow T \times AR$ 
30 Fim faça
31 Realize uma busca gulosa a partir de  $S$  para tentar melhorar a solução
32 Fim faça

```

#### 5.4. Resultados

Alguns dos resultados obtidos com o Algoritmo 4 podem ser vistos na Tabela 1. As colunas  $T_{SA}$  e  $T_{BE}$  correspondem ao tempo de execução em segundos do *Simulated Annealing* e da Busca Exaustiva, respectivamente. Analizando-se estes dados verifica-se que a heurística obteve resultados excelentes pois os valores encontrados para os índices DEC e FEC estão sempre muito próximos aos da Busca Exaustiva (que são ótimos) e o tempo  $T_{SA}$  é várias ordens de grandeza menor que  $T_{BE}$ . Com estes resultados, o objetivo de otimizar a alocação de religadores em um alimentador foi alcançado.

#### 6. Conclusão

Para o problema de alocação de religadores em um alimentador partiu-se, inicialmente, para um método de solução força bruta: uma Busca Exaustiva no espaço de soluções. Os resultados obtidos são ótimos mas essa abordagem é ineficiente em termos de tempo de execução. Embora isso impeça o seu emprego em situações que exijam uma resposta em pouco tempo, a Busca Exaustiva ainda é relevante pois permite estabelecer uma base de comparação com os resultados das outras formas de soluções. A seguir, buscou-se adaptar a meta-heurística *Simulated Annealing* para o problema. Nesta etapa, um compromisso entre a qualidade da solução e o tempo empregado em sua busca foi atingido. Os resultados obtidos com esta abordagem destacam-se pois as soluções encontradas pelo *Simulated Annealing* estão sempre muito próximas às da Busca Exaustiva e o tempo de execução da meta-heurística é muito menor. Neste ponto, considerou-se que o objetivo de determinar os melhores pontos para alocação de religadores em um alimentador foi alcançado de forma bastante satisfatória. Os algoritmos aqui apresentados estão detalhadamente descritos em Zambon (2006).

Tabela 1: *Simulated Annealing* × Busca Exaustiva: A2, A3 e A4

Alimentador		$DEC_{SA}$	$SA/BE$	$FEC_{SA}$	$SA/BE$	$T_{SA}$	$T_{BE}$
A2 $n = 167$	$r = 1$	37.01	1.000	14.66	1.000	1.57	0.16
	$r = 2$	35.08	1.000	12.71	1.000	5.72	9.74
	$r = 3$	33.61	1.000	11.53	1.000	19.09	526.12
	$r = 4$	32.61	1.000	10.22	1.025	36.45	22961.21
A3 $n = 136$	$r = 1$	28.61	1.000	13.51	1.000	0.96	0.11
	$r = 2$	25.07	1.000	9.97	1.000	1.66	4.71
	$r = 3$	23.24	1.000	8.14	1.000	2.92	203.52
	$r = 4$	22.35	1.000	7.61	1.050	4.79	6514.49
A4 $n = 56$	$r = 1$	14.13	1.000	6.20	1.000	0.25	0.01
	$r = 2$	13.21	1.000	5.28	1.000	0.71	0.26
	$r = 3$	12.37	1.000	4.63	1.000	0.99	3.79
	$r = 4$	11.71	1.000	4.13	1.043	1.10	46.87

As formas de solução e os algoritmos apresentados neste trabalho foram implementados e deram origem a uma ferramenta de projeto que pode ser utilizada pelo Engenheiro de Proteção. Esta ferramenta é um programa multi-plataforma (Windows/Linux) que permite ao usuário realizar, de forma interativa, um estudo da rede de proteção de um alimentador. Uma versão inicial deste sistema já foi entregue à ESCELSA e está em fase de teste.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem que uma concessionária reestruture e expanda os sistemas de proteção das suas redes de distribuição de uma forma planejada. Desta maneira, os investimentos da empresa passam a ser mais efetivos, levando a um serviço de melhor qualidade sem necessariamente implicar em um aumento de tarifas ao consumidor e de custos para a concessionária. Isto pode levar a benefícios econômicos para ambos.

### Agradecimentos

Os autores agradecem as contribuições de D. R. Trindade, D. Z. Bossois, F. M. Varejão, S. A. A. Freitas e V. C. Zamborlini, recebidas durante a elaboração deste trabalho.

### Referências

- ANEEL (2000). Resolução nº 24, de 27 de janeiro de 2000.
- Atallah, M. J. (1998). *Algorithms and Theory of Computation Handbook*. CRC-Press.
- Brown, R. E. (2002). *Electric Power Distribution Reliability*. Marcel Dekker, Inc.
- Brown, R. E. & Ochoa, J. R. (1998). Distribution system reliability: Default data and model validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(2):704–709.
- Glover, F. W. & Kochenberger, G. A. (2002). *Handbook of Metaheuristics (International Series in Operations Research and Management Science)*. Kluwer Academic Publishers.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598):671–680.
- Zambon, E. (2006). Otimização de índices de confiabilidade em redes de distribuição de energia elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo.