

Alocação de Indicadores de Faltas via Meta-heurística VNS para Melhoria da Qualidade do Serviço

Jáder de Alencar Vasconcelos
Universidade Federal de Goiás
jadermat-@hotmail.com

Antônio César Baleeiro Alves
Universidade Federal de Goiás
abaleeiro@gmail.com

Luis Gustavo Wesz da Silva
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás
lgwesz@gmail.com

Resumo — As redes de distribuição de energia elétrica sofrem com faltas que podem levar à interrupção do serviço, trazendo transtornos aos consumidores da energia elétrica e impactando os custos de ressarcimento. A alocação ótima de Dispositivos Indicadores de Faltas (IFs) é uma alternativa promissora para melhorar a Qualidade do Serviço. O IF diminui o tempo médio de deslocamento da equipe (*TMD*) até o(s) defeito(s), implicando na redução do indicador *DEC*. Tendo em vista que o emprego indiscriminado de dispositivos IFs é proibitivo, a proposta deste artigo consiste na implementação da meta-heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) para determinar posições de boa qualidade dos IFs que reduzam a estimativa do *DEC*. Resultados, obtidos para um alimentador real, demonstram a eficácia da metodologia proposta.

Palavras-chaves — Dispositivo indicador de falta, Qualidade do serviço, Meta-heurística, Alocação ótima.

I. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica, sejam urbanas ou rurais, são frequentemente afetadas por faltas (i.e., contingências) que, dependendo da gravidade do evento e da duração da interrupção do serviço aos consumidores, trazem sérias consequências para os usuários da energia elétrica em suas atividades. Além disso, as interrupções elevam os custos incorridos para o ressarcimento das unidades consumidoras afetadas, podendo comprometer o equilíbrio da concessão.

Devido à exposição dos circuitos e equipamentos ao ambiente e condições climáticas variadas e adversas (descargas atmosféricas, contato de árvores ou objetos etc.), além de falhas operacionais ou provocadas por terceiros, as redes elétricas estão sujeitas a contingências que podem levar a interrupção do serviço. Embora a transmissão e subtransmissão também sejam sujeitas a falhas, em [1] destaca-se que entre 80% e 90% das faltas nos sistemas de energia elétrica ocorrem devido a eventos que ocorrem no sistema de distribuição.

Como alternativas para redução do tempo médio de interrupção em alimentadores de distribuição foram desenvolvidos os Dispositivos Indicadores de Falta (designado pela sigla IF). Tais dispositivos atuam sinalizando a passagem de uma corrente elétrica de falta, e estes têm como objetivo auxiliar as equipes de manutenção na localização mais rápida dos defeitos. A sinalização, em sua maioria, é feita com lâmpadas de LED que são de fácil visualização se forem instaladas em locais adequados. Esses dispositivos trazem uma diminuição no

tempo médio de busca e localização dos defeitos, o qual é designado pelo PRODIST [2] como *TMD*, mostrando-se bastante convenientes para alimentadores dos sistemas de distribuição de energia elétrica do Brasil, que, em sua maioria se estendem por grandes áreas geográficas.

Embora os IFs se apresentem como alternativa para ajudar a manter os indicadores de continuidade em níveis adequados, por exemplo, o *DEC* (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), a utilização indiscriminada e sem um critério técnico adequado desses dispositivos pode não trazer a redução esperada do *TMD*. Sendo assim, é necessário que se disponha de uma metodologia para alocação ótima dos IFs na rede, isto é, um método que indique a quantidade de IFs e suas posições ao longo dos alimentadores de distribuição.

Em [3] examina-se a aplicação do Algoritmo Imune para o problema de alocação ótima de indicadores de falta com o objetivo de minimizar o custo da energia não suprida, considerando também os investimentos relativos ao custo dos IFs. Para demonstrar a eficiência do Algoritmo Imune, o problema de alocação ótima de IFs é solucionado para um alimentador da *Taiwan Power Company*.

Em [4] propõe-se uma metodologia de alocação de IFs baseada em Algoritmo Genético (AG). A implementação do AG adota uma função objetivo que considera a distribuição da carga instalada, o número de usuários, e a distância a outros dispositivos capazes de indicar faltas (incluindo os dispositivos de proteção). Nesse trabalho, a solução do problema de alocação de IFs é aplicada a dois alimentadores da *Elektro Electricidade e Servicios S/A*. No entanto, essa metodologia apresenta algumas limitações e particularidades, tais como: a alocação de IFs é realizada apenas no tronco principal dos alimentadores; a inserção de IF considera instalação simultânea de uma chave de manobra (criando novos blocos de carga) e; os dados referentes à taxa de falhas foram extraídos da literatura.

Neste contexto, no presente artigo, é proposta a metodologia de otimização meta-heurística conhecida como *Variable Neighborhood Search* (VNS), em português, Busca em Vizinhança Variável [5]-[6] para orientar a alocação de IFs em alimentadores de distribuição de energia elétrica. Dentre as vantagens da implementação deste trabalho, destacam-se: a possibilidade de alocar IFs não só nos troncos, mas também em ramais (também de média tensão), com a funcionalidade de restringir a alocação de IFs em trechos especificados pelo projetista; propõe um novo tratamento para o cálculo do tempo mé-

dio de localização da falta (*TMD*) após a inserção dos IFs, considerando o valor esperado do tempo de localização do defeito do ponto de vista probabilístico; possibilita a avaliação da inserção de IFs isolados, isto é, sem a instalação chave de manobra associada ao IF. A meta-heurística VNS mostrou-se adequada à resolução do problema de alocação de IFs (PAIIF) e apresenta tempos computacionais relativamente reduzidos, tendo em vista do PAIIF se tratar de um problema de natureza combinatória.

Este artigo está estruturado do seguinte modo. A seção II define as grandezas e expressões relevantes para o problema em pauta. A seção III analisa o impacto da inserção de IFs nos tempos médios e consequentemente no *DEC* e define o modelo matemático do PAIIF. A seção IV trata do método VNS aplicado ao problema de alocação sob análise. Os resultados são apresentados na seção V e, as conclusões, na seção VI.

II. AVALIAÇÃO DA CONTINUIDADE A PRIORI

É desejável que se possa estimar a Qualidade do Serviço de um dado sistema de distribuição em função de informações básicas da própria rede, já que isso permite ao projetista da rede simular previamente mudanças, de modo a alcançar um determinado nível de qualidade no fornecimento. A metodologia discutida nesta seção tem por objetivo avaliar os indicadores coletivos (*DEC* e *FEC*) e individuais (*DIC* e *FIC*), além da Energia não Distribuída (*END*), com base dados e características da rede.

Para a compreensão da metodologia, em [7] são apresentados alguns parâmetros e definições, que são:

- taxa de falha, λ_i : para o caso de trechos de rede, representa o número médio de falhas por ano e por unidade de comprimento, cuja unidade é (falhas/km)/ano ou falhas/km×ano;
- bloco de carga: conjunto de trechos de rede que derivam de uma chave, e que não contam, entre eles, com nenhuma chave;
- taxa de falha do *i*ésimo bloco de carga, Λ_i (lambda maiúscula), matematicamente definida por:

$$\Lambda_i = \sum_{k=1}^{N_{tr}} l_{ik} \lambda_{ik} \quad (1)$$

sendo:

- N_{tr} : o número de trechos de rede no bloco *i*;
- l_{ik} : comprimento do trecho *k* do bloco *i*.
- fator de falhas permanentes: expressa a relação entre as falhas permanentes e falhas totais na rede de distribuição, simbolizado por f_{per} . Para redes de distribuição, um número bastante usual é 0,3 (isto é, 30 falhas permanentes para cada 100 falhas na rede).

Para estimar os indicadores considera-se, inicialmente, que os dispositivos de proteção estejam corretamente coordenados e que, nas condições de faltas, não são previstas transferências de blocos de carga entre dois ou mais circuitos. O procedimento simula a ocorrência de Λ_i falhas no *i*ésimo bloco de carga da rede. Na ocorrência de uma falha no bloco *i* da rede, tem-se o seguinte [7]:

- um certo número de consumidores, $N_{t1,i}$, com o fornecimento de energia afetado durante o tempo t_1 de pesquisa de defeito no bloco *i* (isto é, t_1

é o tempo que decorre do momento da falta até sua localização pela equipe de manutenção);

- um número de consumidores, $N_{t2,i}$, sem fornecimento de energia durante o tempo t_2 referente ao reparo da falha.

Dessa forma, pode-se avaliar a contribuição aos valores de *DEC* e *FEC* para faltas no bloco *i* utilizando-se (2) e (3), como definidas a seguir:

$$DEC_i = f_{per} \Lambda_i \left(\frac{N_{t1,i} t_{1,i}}{C_c} + \frac{N_{t2,i} t_{2,i}}{C_c} \right) \quad (2)$$

$$FEC_i = f_{per} \Lambda_i \frac{N_{t1,i}}{C_c} \quad (3)$$

A partir das parcelas de *DEC*_{*i*} e *FEC*_{*i*} para cada bloco de carga, pode-se avaliar o *DEC* e *FEC* globais do circuito por (4) e (5):

$$DEC = \sum_{i=1}^{N_{bl}} DEC_i \quad (4)$$

$$FEC = \sum_{i=1}^{N_{bl}} FEC_i \quad (5)$$

Considerando as ocorrências apenas na rede em tensão primária (alimentadores de média tensão), os indicadores de continuidade individuais são os mesmos para todos os consumidores de um dado bloco *i*. Assim, para avaliação do *DIC* e *FIC*, deve-se determinar quantos $N_{bl,k}$ blocos afetam o estabelecimento do bloco *i*, de modo que, os indicadores individuais por bloco podem ser expressos por (6) e (7):

$$DIC_i = \sum_{k=1}^{N_{bl,k}} f_{per} \Lambda_k (t_{1,k} + t_{2,k}) \quad (6)$$

$$FIC_i = \sum_{k=1}^{N_{bl,k}} f_{per} \Lambda_k \quad (7)$$

Por fim, sendo $D_{média,i}$ a demanda média anual (ou mensal) do bloco *i*, a Energia não Distribuída pode ser obtida por (8):

$$END = \sum_{i=1}^{N_{bl}} DIC_i D_{média,i} \quad (8)$$

III. AVALIAÇÃO DOS INDICADORES COM A INSERÇÃO DOS IFS

De acordo com [8] e [9], a instalação de N_{IF} IFs em um alimentador de distribuição divide-o em $(N_{IF} + 1)$ “partes” e o tempo de localização da falta T_i para cada *i*ésima parte pode ser calculado por (9):

$$T_i = T_0 \left(\frac{L_i}{\sum_{j=1}^{N_{IF}+1} L_j} \right) \quad (9)$$

Nessa equação, T_0 é o tempo médio para localização da falta sem IF e L_i é o comprimento da parte *i* (ou ainda, a soma dos comprimentos dos trechos que compõem a parte *i*). Nesse contexto, entende-se por “parte”, o conjunto de trechos primários entre dois IFs consecutivos ou entre a subestação e o primeiro IF, ou ainda o trecho após o IF mais distante da SE.

O exemplo apresentado a seguir, com um sistema simplificado ilustrado na Fig. 1, visa elucidar a aplicação de (9).

- Sem a presença de IF, supõe-se que o tempo médio para localização de uma falha nesse sistema seja igual a 1 hora (ou seja, $T_0 = 1$), ao passo que a

subestação é o ponto de partida da equipe de manutenção.

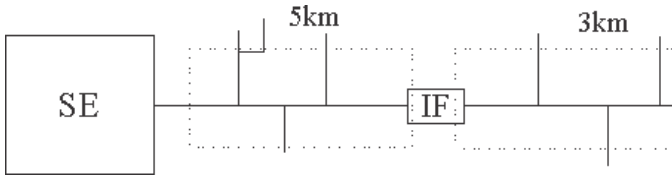


Fig. 1. Sistema radial simples com a presença de um IF

Com a presença do IF, a equipe de manutenção precisará percorrer apenas um trecho antes ou após o IF. De modo que:

$$T_1 = \frac{5}{5+3} 1 = 0,625h$$

e

$$T_2 = \frac{3}{5+3} 1 = 0,375h$$

sendo T_1 e T_2 os tempos necessários para percorrer o trecho anterior e o trecho posterior ao IF, respectivamente.

O estudo da influência de dispositivos IF no cálculo da estimativa dos indicadores de Qualidade do Serviço nas redes de distribuição deverá considerar suas características de funcionamento. Justifica-se aqui adotar o conceito de Região de Cobertura do IF (ou simplesmente Região), que nada mais é do que cada uma das “partes” de um alimentador que surgem devido a inclusão de IFs, conforme proposto em [9]. Tal conceito é utilizado em [10], mas sem considerar a presença de dispositivos de proteção (religadores, chaves fusíveis etc.) na rede. A Fig. 2 ilustra um alimentador com destaque para suas regiões e blocos de carga.

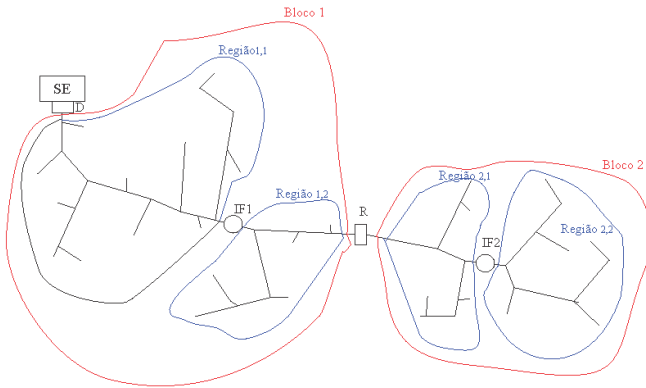


Fig. 2. Ilustração de regiões e blocos de carga em um alimentador

Naturalmente, a presença dos IFs terá influência nos indicadores dependentes do tempo de interrupção (DEC , DIC e END). Devido à falta de estudos aprofundados da influência de IFs sobre o tempo de preparação e execução, será considerada apenas a redução no tempo de deslocamento da equipe (isto é, para a localização do defeito). A partir dessas considerações, pode-se enumerar os seguintes passos para o cálculo do tempo médio de localização de faltas em redes de distribuição com IFs:

1. a instalação de N_{IF}^i dispositivos IFs em um bloco de carga i divide-o em $N_{IF}^i + 1$ regiões e o tempo de localização de falta ($T_{i,k}$) para cada késima parte pode ser calculado por (10):

$$T_{i,k} = T_0^i \left(\frac{\sum_{j \in Região_{i,k}} l_j \lambda_j}{\sum_{j \in Bloco_i} l_j \lambda_j} \right) \quad (10)$$

2. a probabilidade de ocorrência de falta na região k do bloco i deve considerar as taxas de falha, λ_j , dos trechos que a compõe:

$$P_{i,k} = \frac{\sum_{j \in Região_{i,k}} l_j \lambda_j}{\sum_{j \in Bloco_i} l_j \lambda_j} \quad (11)$$

3. o tempo médio de localização de falta no bloco i pode ser calculado conforme (12):

$$T_i = \sum_{k=1}^{N_{IF}^i + 1} P_{i,k} T_{i,k} \quad (12)$$

sendo:

$Região_{i,k}$: conjunto dos trechos de rede que compõem a região k do bloco i ;

$Bloco_i$: conjunto dos trechos de rede que compõem o bloco i ;

T_0^i : tempo estimado de localização de defeitos no bloco i sem a presença de IFs;

l_j : comprimento do trecho j ;

λ_j : taxa de falhas do trecho j , em (falhas/km)/ano.

A partir do cálculo de T_i , pode-se obter os indicadores de qualidade dependentes de tempo, a partir de (13):

$$t_1(i) = T_i + t_i \quad (13)$$

Em (13), t_i representa a parcela relativa aos tempos de telefonema e acionamento da equipe de manutenção, ou tempo de preparação, tal como definido no Módulo 8 do PRODIST[2].

Dada a importância da manutenção dos níveis dos indicadores de qualidade de energia elétrica, bem como os custos das compensações a que estão sujeitas as concessionárias em caso de violação, o programa desenvolvido para esse trabalho visa minimizar a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC). Essa escolha foi tomada almejando melhorar a qualidade de energia recebida pelos consumidores (pela redução do DEC), além de trazer um retorno financeiro à concessionária, por meio da redução da END e das compensações por violação dos limites de DIC .

A partir das considerações referentes à avaliação dos indicadores na presença de IFs, esse problema de otimização pode ser formulado como (14):

$$\begin{aligned} & \text{minimizar} && f(G, V_{IF}) \\ & \text{s. a:} && V_{IF} \subset B \\ & && n(V_{IF}) = N_{IF} \end{aligned} \quad (14)$$

Em (14), B é o conjunto dos trechos que formam o grafo da rede; V_{IF} é o conjunto de trechos do grafo que contém IF e a função objetivo de (14) é definida pela expressão:

$$f(G, V_{IF}) = \frac{f_{per}}{C_c} \sum_{i=1}^{N_{bl}} \sum_{k=1}^{N_{tr}} l_{ik} \lambda_{ik} (N_{t1,i} t_{1,i}(V_{IF}) + N_{t2,i} t_{2,i})$$

l_{ik} : comprimento do késimo trecho do bloco i ;

λ_{ik} : taxa de falha do késimo trecho do bloco i ;

$N_{t1,i}$: número de usuários afetados no bloco i durante o tempo t_1 ;
 $t_{1,i}(V_{IF})$: tempo referente à soma dos tempos médios de telefonema e busca de defeitos no bloco i , caso estejam instalados IFs nos trechos correspondentes aos elementos do conjunto V_{IF} ;
 $N_{t2,i}$: número de usuários afetados no bloco i durante o tempo t_2 ;
 $t_{2,i}$: tempo médio de execução de reparos no bloco de carga i .
A primeira restrição impõe a alocação dos IFs nos trechos (conjunto B), enquanto a segunda, estabelece que exatamente N_{IF} sejam alocados.

IV. VNS APLICADO AO PAIIF

Proposto por Mladenovic e Hansen em 1997, o *Variable Neighborhood Search* (VNS) é uma meta-heurística de otimização global que realiza buscas locais em vizinhanças variáveis [11]. Nessa meta-heurística é realizada a exploração iterativa de vizinhanças cada vez mais distantes, a fim de escapar de mínimos locais. Além disso, uma rotina de busca local pode ser aplicada repetidamente para alcançar as melhores soluções locais.

Desde sua concepção, várias variações do VNS foram propostas, dentre elas as mais importantes são o VNS Reduzido, VNS Básico e VNS Geral. Outras versões como *Skewed VNS* (ou VNS Tendencioso), VNS Decomposto e VNS Não Monótono [5], [6] e [11].

Em [11], destaca-se que o VNS Reduzido se mostra bastante útil em problemas em que uma busca local é muito demorada, podendo ser usado de forma independente ou integrado em uma estrutura mais complexa de Algoritmo VNS. Tendo isso em vista, neste trabalho, optou-se por utilizar o VNS na sua versão reduzida, uma vez que, para configurações com muitos IF's, analisar as vizinhanças por completo (BVNS) se mostrou bastante dispendioso computacionalmente.

O RVNS (*Reduced Variable Neighborhood Search*) usa vizinhanças "aninhadas" e avalia a função objetivo para pontos $x \in X$ gerados aleatoriamente, até que o critério de parada seja alcançado [12]. A Fig. 3 mostra o diagrama de blocos da implementação do Algoritmo VNS Reduzido aplicado à solução do PAIIF. O diagrama representa uma simplificação do processo realizado, omitindo-se, por exemplo, as etapas de leitura e análise do grafo na etapa de avaliação, ou ainda a obtenção da solução inicial, que é aleatória dentre as soluções factíveis.

A avaliação da solução corrente é realizada pela função objetivo, que corresponde ao $f(G, V_{IF})$ descrito em (14), representada simplificada por $f(V_{IF})$ no diagrama da Fig. 3. Caso a condição presente $f(V'_{IF}) < f(V_{IF})$ não seja cumprida, o algoritmo solicitará que a vizinhança N_2 seja explorada, nesse caso a alteração se dará em 2 trechos e assim sucessivamente. Ressalta-se que, tanto a posição dos trechos a serem alteradas, quanto o valor que irão assumir, são obtidos aleatoriamente, mas mantendo-se a factibilidade.

Em todos os casos foi utilizado o critério de Número Máximo de Iterações (N_{Iter}). Nas simulações, N_{Iter} situou-se no intervalo de 300 a 6.000, de acordo com o caso testado. No caso mais complexo a convergência foi observada após 2.000 iterações.

Considerou-se como número máximo de vizinhanças o número de dispositivos IF solicitados para instalação:

$$k_{máx} = N_{IF} \quad (15)$$

Assim, o processo de evolução das vizinhanças permite a troca de todos os IFs.

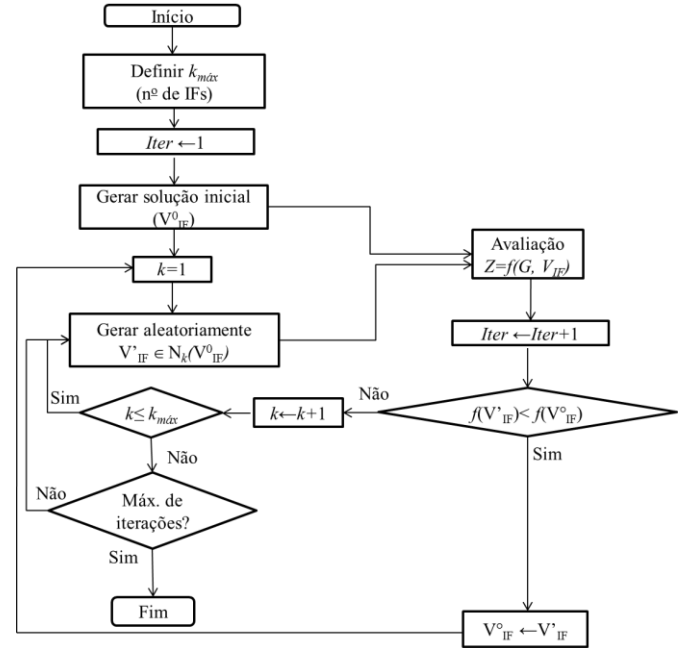


Fig. 3. Diagrama de blocos do programa desenvolvido

A solução corrente V_{IF} apresenta o conjunto dos trechos candidatos à instalação dos IF. Foi utilizada codificação direta, como a seguir:

$$V_{IF} = \{42; 256; 3102; 9274\}$$

No âmbito da resolução do PAIFF, mediante implementação do Algoritmo RVNS, fica definido que explorar a primeira vizinhança de V_{IF} significa alterar aleatoriamente um de seus trechos. Os novos trechos serão escolhidos dentre os trechos candidatas para tal, podendo ser excluídas aqueles em regiões de difícil acesso (pântanos, áreas privadas, florestas, etc.).

A execução do programa representado pelo diagrama da Fig. 3, para situações em que o número de IFs variou entre 1 e 6 deu origem aos resultados descritos na Seção V. Uma análise econômica da solução obtida em cada uma das situações simuladas deve levar a escolha da mais rentável para a distribuidora.

V. RESULTADOS OBTIDOS PARA UMA REDE ELÉTRICA REAL

Para validação da metodologia proposta torna-se importante realizar um estudo de caso, que, para o presente trabalho, consistiu na análise da solução do PAIIF para um alimentador real, pertencente à área de concessão da empresa CELG Distribuição S.A. O alimentar estudado está ilustrado na Fig. 4, com destaque para o tronco principal.

Utilizando-se da metodologia proposta, a entrada do programa correspondente ao número de IFs foi variada de 1 até 6 e os resultados obtidos ao fim das iterações, para cada uma dessas situações, foi armazenado. A Tabela I traz os trechos escolhidos pelo VNS ao fim das iterações correspondentes a cada número de IFs.

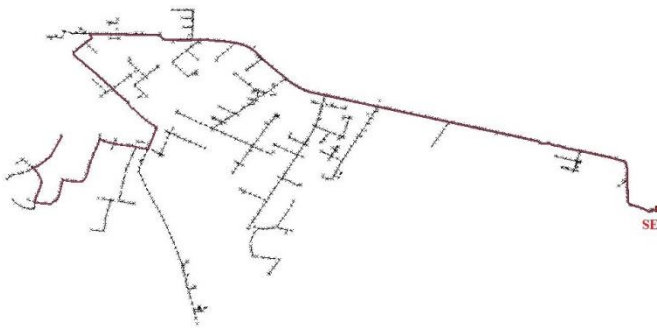


Fig. 4. Rede teste com destaque para o tronco principal

TABELA I. RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA TESTE

Nº de IFs	Trechos selecionados
1	2284
2	3886, 2284
3	3886, 3102, 2226
4	3882, 3102, 3526, 2226
5	3886, 107, 294, 4516, 2865
6	3882, 872, 3526, 4516, 9293, 2284

A situação com três (3) IFs alocados no alimentador está ilustrada na Fig. 5. Uma comparação com a Fig. 4 permite notar que, na solução encontrada, ocorre a escolha de um trecho fora do tronco principal: trecho 3102 (ou 3104-3102), o que não seria possível seguindo a metodologia de outros trabalhos, como [4]. Para os casos com 4, 5 e 6 IFs também ocorre a alocação de IFs em ramais, passando a 2 ramais a partir de 5 IFs. A alocação de IFs em circuitos ramais do alimentador evidencia a importância da metodologia desenvolvida, já que limitar a alocação ao tronco principal levaria a soluções mais distantes do ótimo global do PAIIF.

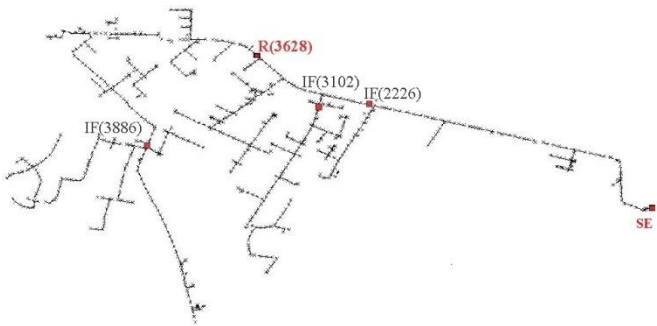


Fig. 5. Solução do PAIIF para 3 IFs

A análise econômica das soluções obtidas pelo programa com VNS consiste na avaliação do Valor Presente Líquido (VPL) e do Payback. O VPL é calculado ao representar a soma de todas as despesas e receitas no presente, o que é representado por (16). Já o Payback indica o tempo necessário para que o valor presente das receitas supere o investimento, ou seja, representa o tempo estimado para recuperar o investimento realizado.

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^q \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (16)$$

Em (16), I_0 representa o investimento inicial, isto é, o valor necessário para adquirir os IFs. i é a taxa de desconto, ou a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). t corresponde ao tempo, limitado à vida útil dos IFs, em anos. Por fim, FC_t são os fluxos

de caixa: receitas (redução no *CEND*) descontadas as despesas (por manutenção ou troca de dispositivos).

Para instalação na rede foi cotado o indicador de falta Navigator-LM da Horstmann. O valor unitário desse IF de cabo é de R\$2.400,00. Esse dispositivo foi projetado para atuar em redes com tensão nominal de até 161kV e possui duas baterias de Lítio substituíveis de alta capacidade, com vida útil de 15 a 20 anos, além de controlador de bateria, com sinalização luminosa para baixa autonomia.

Tendo-se em vista que o dispositivo selecionado não necessita de manutenção periódica, serão considerados apenas custos referentes a manutenções eventuais, da ordem de 2,5% do valor do produto. O custo de instalação será considerado como 5% do valor de IF, o que inclui os custos de deslocamento da equipe técnica, os bastões para instalação na rede viva e outros custos ocasionais. O valor considerado para a Tarifa é de R\$423,50/MWh, valor homologado pela ANEEL, referente à tarifa média sem impostos da concessionária detentora do alimentador estudado (CELG D), para o ano de 2016.

O Custo de Interrupção considerado corresponde apenas ao custo da energia não distribuída (*CEND*), desprezando-se a redução de outros custos, como o das penalidades por violação dos indicadores individuais e dos custos no deslocamento da equipe de manutenção.

A partir das considerações citadas nesta seção foi criada a Tabela II, com os dados de *DEC* estimado, a estimativa da *END* e redução do *CEND* para as situações mostradas na Tabela I:

TABELA II. INDICADORES E CUSTOS ESTIMADOS PARA O SISTEMA TESTE

Nº de IFs	<i>DEC</i> estimado (h/ano)	Redução <i>DEC</i> (horas)	<i>END</i> estimado (MWh/ano)	Redução <i>CEND</i> (R\$)
0	23,123	0	164,83	0
1	22,092	1,031	157,48	3.112,73
2	21,647	1,476	154,30	4.459,46
3	21,272	1,851	151,62	5.594,44
4	21,124	1,999	150,58	6.034,88
5	20,981	2,142	149,56	6.466,85
6	20,845	2,278	148,52	6.907,29

Com os dados da Tabela II foi possível calcular o VPL para as situações descritas, considerando o período de 15 anos. Utilizou-se como a TMA o valor de 11,25%, correspondente à Taxa Selic em 05/2017. Os resultados obtidos estão ilustrados na Fig. 6.

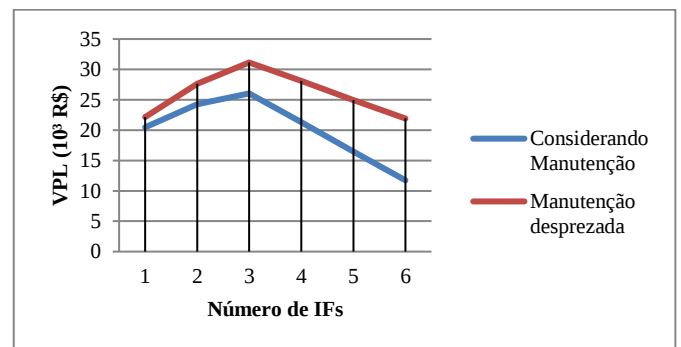


Fig. 6. VPL em função do custo do IF

É possível notar que a solução que traz o maior retorno financeiro anual é aquela obtida pelo programa principal para a situação com 3 IFs. A melhor solução para esse número de IFs obtém um $DEC_{estimado}$ de 21,27 horas, com $v_{IF} = \{3886, 3102, 2226\}$. Observa-se ainda que a solução tida como a de melhor retorno financeiro não varia, ainda que se desconsidere os custos de manutenções eventuais dos IFs. Para o cálculo do Payback, caso se adote a solução obtida (via VNS) na alocação de 3 IFs, o valor obtido ao se considerar os custos de manutenção é de, aproximadamente, 5,1648 anos (ou 5 anos e 2 meses). Ao desconsiderar esses custos o novo valor é de 4,5908 anos (ou 4 anos e 7 meses).

A inclusão dos custos devido às compensações por transgressão dos limites dos indicadores individuais de continuidade poderia modificar a solução tida como melhor, principalmente em alimentadores como este, que geram altas compensações (em 2015, pagou-se de compensação mais de R\$ 70.000,00, considerando DIC e $DMIC$, para este alimentador em análise).

VI. CONCLUSÕES

A metodologia VNS implementada foi validada mediante o estudo de um caso que representa a situação atual de um alimentador da concessionária CELG D. A simulação do caso mostrado na seção V, com os dados disponíveis, mostrou que é possível reduzir em até 1,85horas/ano (8%) o DEC do alimentador, com emprego de 3 IFs, implicando em investimentos de pouco mais de R\$21.000, com Payback de, no máximo, 5 anos 2 meses.

Os resultados obtidos permitiram confirmar que os dispositivos IFs são alternativas viáveis de dispositivos que promovem a melhoria dos indicadores de Qualidade do Serviço demandando baixo investimento. Como mencionado anteriormente neste artigo, a análise dos custos pode ser aprimorada com a adoção de um método que estime a redução nos custos das compensações por violação dos indicadores individuais, em especial do DIC . Isto poderá mostrar que é atrativo economicamente o emprego de uma quantidade maior de IFs, principalmente em casos onde as compensações representam valores financeiros vultuosos.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] JAHEDI, A.; JAVIDAN, J.; NASIRAGHDAM, H. Multi-objective modeling for fault indicators placement using of NSGA II to reduce off time and costs in distribution network. *International Journal of Engineering Research an Applications*. p. 106-111. December 2014.
- [2] ANEEL. “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional” - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, 2015.
- [3] HO, Chin-ying; LEE, Tsung-en; LIN, Chia-hung. Optimal placement of fault indicators using the Immune Algorithm. *IEEE Trans. on Power Syst.*, v. 26, n. 1, p.38-45, February 2011.
- [4] USIDA, W. F. Sistema inteligente para alocação eficiente de dispositivos indicadores de falta em alimentadores de distribuição. 2011. 234 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2011.
- [5] HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. (2003). A tutorial on variable neighborhood search, *Le cahiers du GERARD G-2003*: 46.
- [6] HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search: principles and applications. *European Journal of Operational Research*. Montreal, Canada, p. 449-467. 1 jul. 1999.

- [7] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. São Paulo: Blucher, 2005. 328 p.
- [8] HENDI, R. B.; SEYED-SHENEVA, Seyed-jalal; GANDOMKAR, M. Electrical distribution system reliability improvement by optimal placement of fault indicators using Immune Algorithm. *International Journal of Engineering Research an Applications*, p. 1383-1390. mar. 2012.
- [9] VIDYSAGAR, E.; P.V.N. PRASAD; FATIMA, A. Reliability improvement of a radial feeder using multiple fault passage indicators. *Elsevier - Energy Procedia*, v. 14, p. 223-228, 2012.
- [10] DASHTI, R.; SADEH, J. Fault indicator allocation in power distribution network for improving reliability and fault section estimation. In: *The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Beijing, China. 2011.
- [11] MARTINS, W. A. Busca em vizinha variável aplicado na solução do problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira - SP, 2009.
- [12] SANTOS, N. M.; OCHI, L. S.; BRITO, J. A.; SEMAAN, G. S. Metaheurísticas GRASP e VNS para problema de grafo com restrições de capacidade e conexidade. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, 2015. Porto de Galinhas, PE, 2015.