DOI: 10.48011/asba.v2i1.1487

Proposta de uma Metodologia para Alocação de Dispositivos de Manobra e Proteção em Redes de Distribuição para Melhoria dos Índices de Continuidade

Rafael Borges Rodrigues*. José Roberto Sanches Mantovani**

** Electric Energy Systems Planning Laboratory, Ilha Solteira, SP 15385-000 BR*
(e-mail: rodrigues.unesp@gmail.com).
*** Electrical Engineering Department, Paulista State University, Ilha Solteira, Brazil*
(e-mail:mant@dee.feis.unesp.br)}

Abstract: The allocation of switching and protection devices in electricity distribution networks makes it possible to improve service provision, increase continuity rates, increase the revenue of distribution companies with the reduction of unmet energy and preserve their image with society . The optimized allocation of these devices also benefits consumers. As an example, in hospitals that perform essential life procedures and in supermarkets that have perishable products, there can be no discontinuity in the supply of energy. In homes with people with serious illnesses and even in rural properties, where there are segments highly dependent on electricity, such as milk producers and poultry farmers who need to keep the temperature of the environment strictly controlled. This work proposes a methodology for optimized allocation of switching and protection devices, using an algorithm based on the Ant Colony Optimization meta-heuristic (ACO - Ant Colony Optimization), for application in electric power distribution networks. The objective function is to minimize the cost of unmet energy and investments, respecting the technical restrictions for the coordination of protection devices and system continuity indices. The results obtained through simulations of a real 134 nodes feeder are presented and discussed.

Resumo: A alocação de dispositivos de manobra e proteção em redes de distribuição de energia elétrica possibilita a melhora na prestação do serviço, eleva os índices de continuidade, aumenta o faturamento das empresas distribuidoras com a redução da energia não suprida e preserva a sua imagem junto à sociedade. A alocação otimizada destes dispositivos traz também benefícios para os consumidores. Como exemplo, nos hospitais que realizam procedimentos essenciais à vida e nos supermercados que possuem produtos perecíveis, não pode haver descontinuidade no fornecimento de energia. Nas residências com pessoas portadoras de doenças graves e até mesmo nas propriedades rurais, onde há segmentos altamente dependentes da energia elétrica, como é o caso dos produtores de leite e avicultores que precisam manter a temperatura do ambiente rigorosamente controlada. Neste trabalho propõe-se uma metodologia para alocação otimizada de dispositivos de manobras e proteção, utilizando um algoritmo baseado na meta-heurística de Otimização Colônia de Formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*), para aplicação em redes de distribuição de energia elétrica. Considera-se na função objetivo a minimização do custo da energia não suprida e investimentos, respeitando as restrições técnicas de coordenação dos dispositivos de proteção e índices de continuidade do sistema. Os resultados obtidos através de simulações de um alimentador real de 134 barras são apresentados e discutidos.

Keywords: Metaheuristic, Ant Colony Optimization (ACO); Reliability; Protection; Distribution; System Restoration.

Palavras-chaves: Meta-heurística, Colônia de Formigas (ACO); Confiabilidade, Proteção; Distribuição, Restauração.

1. INTRODUÇÃO

A melhoria dos índices de continuidade do fornecimento de energia elétrica pode ser obtida com a alocação otimizada de dispositivos de manobras e proteção na rede. A instalação destes dispositivos possibilita a minimização de danos técnicos e financeiros para os consumidores e para as empresas distribuidoras, além de preservar a imagem das empresas para a sociedade. Estima-se que aproximadamente 80% das interrupções no sistema de energia estão associadas às faltas que ocorrem no sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE), que são classificadas em faltas permanentes e temporárias (Teng e Liu 2003).

Na incidência de falta permanente, o dispositivo de proteção atua, isolando parte do SDEE atingido pela falta. Após a isolação da seção em falta, o sistema é restaurado, reduzindo ainda mais os impactos desta falta no serviço de

fornecimento. Os consumidores que estão nas seções sãs a jusante da seção em falta são remanejados para os alimentadores vizinhos, através da abertura e fechamento das chaves de manobras, quando estes alimentadores possuem reserva de carga e perfil de tensão compatíveis, reduzindo assim os usuários atingidos pela interrupção (Silva et al. 2005).

Para as faltas temporárias, o dispositivo de proteção também atua, porém o agente causador do defeito na rede extingue-se rapidamente e quando o dispositivo de proteção, com função de religamento, retorna ao estado normal, reestabelece-se automaticamente o fornecimento de energia elétrica.

Na literatura encontram-se alguns trabalhos importantes que abordam a formulação e solução do problema de alocação de chaves de manobras e dispositivos de controle e proteção em redes radiais de distribuição. Teng e Liu (2003), na linha de pesquisa que trata do problema de realocação de chaves para restauração de redes de distribuição, apresentam um algoritmo de otimização baseado na meta-heurística *Sistema de Colônia de Formigas* (*ACS – Ant Colony System*), para solução deste problema. A formulação apresentada é um modelo de otimização combinatorial com função objetivo não-linear e não-diferenciável.

Celli e Pilo (1999) abordam o problema de alocação ótima de chaves seccionalizadoras em redes de distribuição visando a melhoria da confiabilidade do serviço de fornecimento. Para obtenção do modelo matemático consideram-se os custos de instalação dos dispositivos e os benefícios devido à existência ou não de dispositivos de chaveamento automático na rede. O modelo matemático obtido neste trabalho permite determinar o número e a localização dos dispositivos de seccionamento e chaveamento de forma otimizada, necessários para operar tanto em redes radiais como em redes malhadas. A técnica de solução utilizada explora as características do modelo matemático que permite a aplicação do princípio de otimização de *Bellmann's* combinado com a técnica de *Thinning* para encontrar soluções ótimas para sistemas de distribuição reais.

Billinton e Jonnavithula (1996) propõem um modelo matemático para o problema de alocação ótima de chaves de seccionamento em sistemas de distribuição radiais, para minimizar os custos de confiabilidade, manutenção e investimentos. O modelo matemático é formulado como um problema combinatorial com função objetivo não-linear e não-diferenciável. A técnica de solução utilizada para resolver problema é através da meta-heurística *Simulated Annealing*, que é uma técnica de otimização combinatória.

A alocação otimizada simultânea de dispositivos de proteção e manobras é um procedimento que visa obter soluções mais realistas sob o aspecto do planejamento da confiabilidade da rede de distribuição, uma vez que, na ocorrência de uma falta na rede, os dispositivos de proteção atuam e as chaves de manobras podem ser usadas para isolar a área sob falta, possibilitando a transferência dos consumidores próximos ao local de defeito para os alimentadores vizinhos (SILVA et al., 2008).

Em Conceição (2018), apresenta-se uma nova proposta de metodologia para alocar, determinar e especificar os tipos de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição com geração distribuída (GD). Esta metodologia é baseada em técnicas de otimização multiobjetivo para efetuar a alocação otimizada, coordenada e seletiva destes dispositivos. O modelo é composto por duas funções objetivo que consideram aspectos econômicos e da confiabilidade da rede e um conjunto de restrições físicas e operacionais. Um subconjunto destas restrições é baseado em regras práticas das empresas de distribuição e previsto em normas técnicas nacionais e internacionais, que estabelecem a especificação, coordenação e seletividade dos dispositivos de controle e proteção instalados na rede. No modelo considera-se a possibilidade de transferência de carga entre alimentadores vizinhos e a operação ilhada da GD. Dessa forma, obtém-se um modelo genérico de programação não linear inteiro misto (PNLIM). A eficiência do modelo matemático é comprovada comparando-se os resultados obtidos entre dois testes. O primeiro com o auxílio do algoritmo genético (AG) mono-objetivo, que considera a ponderação dos objetivos, enquanto no segundo modelo propõe-se o AG multiobjetivo NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*) para a solução do modelo multiobjetivo de PNLIM.

Neste trabalho, com base na literatura, propõe-se um modelo genérico de otimização, em que a função objetivo contempla, matematicamente aspectos econômicos e de confiabilidade do sistema, minimizando custo da energia não suprida e o impacto dos investimentos realizados. Nas restrições consideram-se aspectos físicos e operacionais das regras de planejamento da confiabilidade adotadas pelas empresas distribuidoras, previstas na regulação nacional e internacional, tais como número máximo de dispositivos em série, cargas prioritárias, seletividade e coordenação da proteção. Para resolver o problema é proposto um algoritmo baseado na meta-heurística ACO. O algoritmo foi testado em um alimentador real de 134 barras adaptado, e os resultados são apresentados e discutidos.

2. PROTEÇÃO DE SDEE

Um sistema de proteção bem projetado deve atuar para deixar a menor quantidade de cargas do sistema isolada na ocorrência de uma falta. O êxito desta estratégia está condicionado no atendimento de alguns requisitos como: confiabilidade, coordenação e seletividade (PEÑUELA MENESES, 2012). Os dispositivos mais utilizados para proteção e manobra nos SDEE são: chaves seccionadoras (manuais e automáticas), fusíveis e religadores. A seguir, algumas características destes dispositivos são apresentadas.

2.1 Chave Seccionadora

Este dispositivo não possui a função de proteção, podendo ser manual ou automático. Auxilia no isolamento de seções do sistema para que se possa fazer a transferência de carga para alimentadores e/ou seções vizinhas na ocorrência de uma falta permanente.

2.2 Fusível

Dispositivo de proteção mais utilizado na proteção de sistemas radiais. Ele é empregado em conjunto com uma chave fusível. Quando percorrido por uma corrente superior à sua capacidade de interrupção, o fusível se rompe e na maioria das vezes a chave fusível desarma, facilitando a identificação que o fusível fundiu-se e a localização da falta. Em condições especiais as chaves fusíveis podem operadas como chaves de manobras. Neste trabalho elas são alocadas apenas com a finalidade de proteção. O fusível mais utilizado aos sistemas de distribuição possui sua curva de atuação do tipo K (ação rápida). Na especificação de cada fusível considera-se sua corrente nominal e tipo de curva.

2.3 Religador

O religador automático é um equipamento de proteção capaz de realizar manobras e detectar sobre corrente entre fase-fase e fase-terra, interrompendo por tempo preestabelecido o fluxo de corrente nas seções a jusante de onde está instalado. Após completar o tempo estabelecido, reestabelece o fluxo de corrente e monitora-se as condições de sobre corrente. Na situação em que o curto-circuito se mantém, o religador atua novamente até que o número de operações instantâneas do ajuste utilizado seja atingido, conforme ilustrado na Tabela 1. Não extinguido o defeito, ele começa a operar na curva lenta de operação até que interrompe por definitivo o fluxo de corrente, através do fusível de proteção ou do próprio religador. Nota-se que esta característica do dispositivo tem um grande potencial de minimização de perdas de cargas onde há seções no SDEE com alto índice de faltas temporárias, em sua grande maioria fase-terra.

Tabela 1. Ajustes religador para 4 operações

Ajuste	Operações Instantâneas	Operações Temporizadas
1	0	4
2	1	3
3	2	2
4	3	1
5	4	0

Este equipamento também é importante para realizar o isolamento das faltas permanentes, geralmente entre fases, permitindo o remanejamento parcial das cargas para outros alimentadores, minimizando o impacto destas faltas para os consumidores e, consequentemente, nos indicadores de continuidade da rede.

3. MODELO MATEMÁTICO

O modelo proposto, com base na literatura, é composto por FO que contempla o custo da energia não suprida devido à incidência de faltas temporárias e permanentes no SDEE, além de considerar os custos dos equipamentos de manobra e proteção instalados na rede. O valor global a ser encontrado para esta função deve, sempre que possível, ser minimizado considerando a topologia básica do sistema.

3.1 Função Objetivo

A função objetivo $C_{Interrupção}$ é obtida através da minimização das somas do custo da interrupção devido às faltas permanentes $C_{Permanente}$, custo da interrupção devido às faltas temporárias $C_{Temporária}$, e o custo de alocação/realocação dos equipamentos $C_{Equipamentos}$.

$$C_{Interrupção} = Min\left\lfloor C_{Permanente} + C_{Temporária} + C_{Equipamentos} \right\rfloor \quad (1)$$

3.1.1 Custo da Interrupção – Falta Permanente

O custo da interrupção devido à incidência de faltas permanentes na rede da concessionária envolve avaliar o impacto causado pela interrupção do fornecimento no sistema como um todo, incluindo a seção que está em falta, as seções que estão a jusante e a montante do local da falta, sendo analisadas as seções do sistema, de acordo com a Eq. (2):

$$C_{Permanente} = \sum_{k=1}^{sc} \lambda_k \times l_k \times (CPs_k + CPms_k + CPjs_k) \quad (2)$$

Onde:

sc : Número total de seções;

λ : Taxa de falta permanente média anual (falta/km/ano);

l : Comprimento da seção (km);

CPs_k : Custo devido à falta permanente na seção *k*;

$CPms_k$: Custo de interrupção das seções a montante devido `a falta permanente na seção *k*;

$CPjs_k$: Custo de interrupção das seções a jusante devido falta permanente na seção *k*;

3.1.2 Custo da Interrupção – Falta Temporária

As faltas temporárias, assim como as faltas permanentes, afetam todo o SDEE, porém com características e impactos diferentes. O custo de interrupção por faltas temporárias, embora difícil de mensurar, reflete de acordo com a filosofia adotada para concepção do modelo em um custo de natureza social. Este custo é obtido através da equação (3).

$$C_{Temporária} = \sum_{k=1}^{sc} \gamma_k \times l_k \times (CTs_k + CTms_k + CTjs_k) \quad (3)$$

E que:

γ : Taxa de faltas temporárias médias anuais (falta/km/ano);

CTs_k : Custo devido à falta temporária na seção *k*;

$CTms_k$: Custo à montante devido falta temporária na seção *k*;

$CTjs_k$: Custo à jusante devido falta temporária na seção *k*;

3.1.3 Custo dos Equipamentos

O custo total dos equipamentos é obtido pelo somatório dos custos totais dos dispositivos 1, 2 e 3 instalados, conforme a equação (4).

$$C_{Equipamentos} = \sum_{j=1}^{nb-1} \sum_{k=j+1}^{nb} \sum_{d=1}^{3} C_{fixo}[d] + C_{desinst}[d] + C_{Inst}[d] \quad (4)$$

Onde:

d : Tipo de dispositivo entre as barras *j* e *k* do Sistema;

nb : Número de barras do Sistema;

C_{fixo} : Custo unitário do dispositivo tipo d alocado/realocado na solução em análise;

$C_{desinst}$: Custo unitário de desinstalação do dispositivo tipo d retirado/realocado na solução em análise;

C_{inst} : Custo unitário de instalação do dispositivo tipo d alocado/realocado na solução em análise;

4. TÉCNICA DE SOLUÇÃO

A meta-heurística ACO é proposta para solução do problema de alocação e realocação dos dispositivos de manobra e proteção em SDEE radiais. Para solução de problemas complexos de grande porte, a aplicação de meta-heurística é adequada e recomendada, pois existe um número muito grande de soluções possíveis, sendo que a obtenção da solução ótima se torna muito difícil devido à grande quantidade de variáveis reais e inteiras existentes no modelo. Desta forma, esta categoria de métodos possui grande potencial de encontrar soluções viáveis de qualidade em um tempo computacional adequado.

A meta-heurística ACO é comumente utilizada em problemas de roteamento e do caixeiro viajante. Para estes problemas, a obtenção de uma solução viável só é possível depois de completado o percurso, porém para aplicação em problemas de planejamento de SDEE cada ramo percorrido pelas formigas pode ser uma solução viável. Esta característica do problema aumenta o número de combinações possíveis na instalação dos dispositivos, e dificulta, significativamente, a possibilidade de encontrar uma solução de boa qualidade, tornando um desafio teórico e prático a sua aplicação no problema de planejamento da confiabilidade de redes.

Na aplicação da meta-heurística ACO ao problema (1), pode-se abstrair que a colônia de formigas é equivalente à subestação de onde derivam os alimentadores, e cada ramo do sistema faz parte do caminho a ser percorrido. A distância é equivalente ao custo da interrupção que está em função do tipo de dispositivo *escolhido* pela formiga. Desta forma, dependendo da decisão de alocar ou não o dispositivo em cada ramo, calcula-se a probabilidade da formiga caminhar da barra *j* para a barra *k*, conforme (5).

$$P_{j,k}^{f,d} = \frac{[\tau_{j,k}^{d}(it)]^{\alpha} \times [\eta_{j,k}^{d}(it)]^{\beta}}{\sum_{i=0}^{D} \left([\tau_{j,k}^{i}(it)]^{\alpha} \times [\eta_{j,k}^{i}(it)]^{\beta} \right)} \quad (5)$$

Em que:

$P_{j,k}^{f,d}$: Probabilidade da formiga *f* ir da barra *j* para a barra *k* percorrendo o caminho onde está instalado o dispositivo *d*;

α : Parâmetro que indica a influência do feromônio;

β : Parâmetro que estabelece a influência da distância;

it : Número da iteração;

$\tau_{j,k}^{d}(it)$: Quantidade de feromônio existente no caminho formado pelo dispositivo *d* entre as barras *j* e *k*;

$\eta_{j,k}^{d}(it)$: Inverso do custo da interrupção obtido pela instalação do dispositivo *d* entre as barras *j* e *k*;

D : Conjunto formado por todas as possibilidades de alocação de dispositivos entre as barras *j* e *k*.

O acréscimo do feromônio depositado pelas formigas é calculado pela expressão (6).

$$\Delta\tau_{j,k}^{f,d} = \frac{Q}{CI^{f}} \quad (6)$$

em que:

$\Delta\tau_{j,k}^{f,d}$: Deposição de feromônio pela formiga *f* no caminho formado pelo dispositivo *d*, instalado entre as barras *j* e *k*;

Q : Constante de atualização do feromônio;

CI^{f} : Custo da interrupção encontrado pela formiga *f*.

A atualização do feromônio depositado pelas formigas é calculada pela expressão (7).

$$\tau_{j,k}^{d}(it) = (1-\sigma) \times \tau_{j,k}^{d}(it-1) + \sum_{f=1}^{m} \Delta\tau_{j,k}^{f,d}(it) \quad (7)$$

em que:

$\tau_{j,k}^{d}(it)$: Valor atualizado do feromônio na iteração *it* no caminho formado pelo dispositivo *d* instalado entre as barras *j* e *k*;

σ : Taxa de evaporação do feromônio;

m : Número total de formigas.

Os parâmetros α , β , σ , Q, m e o *número de iterações* para esta meta-heurística são calibrados especificamente para cada problema, ou seja, precisa-se realizar testes com variação nos valores destes parâmetros para encontrar quais apresentam melhor performance de acordo com as características físicas do problema sob análise.

5. TESTES E RESULTADOS

A metodologia foi implementada e validada para o alimentador real adaptado, com tensão 13,8 kV e composto por 134 Barras (LaPSEE, 2020). Este alimentador possui 7 alimentadores vizinhos que possibilitam o remanejamento de cargas, sendo a capacidade de cada um deles apresentada na Tabela 2. A taxa de faltas permanentes e temporárias utilizada para o alimentador em estudo foi igual a 0,072 e 0,98 (falta/km/ano) respectivamente. Os custos da energia não suprida devido uma falta permanente para consumidor residencial, comercial e industrial são iguais a 0,27, 40,00 e 6,41 (US$/kWh) para restauração e 1,50, 30,00 e 4,64 (US$/kWh) para reparo. O tempo para restauração e reparo utilizado foi de 1,5 e 4 horas respectivamente. O custo da interrupção no fornecimento devido uma falta temporária é 0,80 (US$/kW) para os três tipos de consumidores. As cargas das barras, assim como o comprimento dos ramos entre as barras são os mesmos utilizados por SILVA, (2005).

Tabela 2. Capacidade de Reserva dos Alimentadores Vizinhos

Alimentador	Capacidade de Reserva (kW)
2	725
3	1160
4	485
5	725
6	970
7	680
8	240

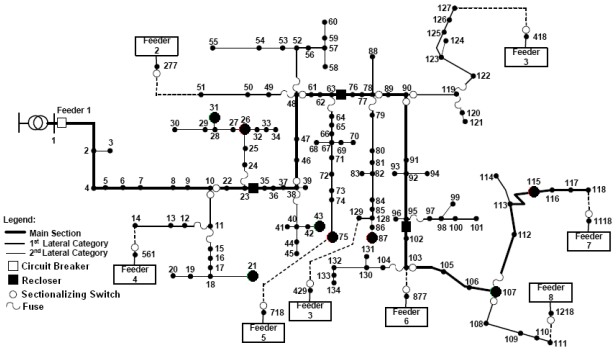

Fig. 2 Alimentador de distribuição com 134 barras, 13,8 kV.

Os custos fixos dos equipamentos de manobras e proteção estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Custos Fixos dos Equipamentos

Equipamento (Código)	Valor (US$)	Desinstalação / Instalação (US$)
Chave Seccionadora (1)	2.730,00	300
Fusível + Chave (2)	1.000,00	100
Religador (3)	25.000,00	1000

Para a topologia básica do SDEE em estudo da Figura 2, antes da aplicação da metodologia proposta, apresentou um custo anual total estimado de US$ 176.182,05.

Com esta configuração faz-se a representação gráfica do comportamento das seções e blocos para este alimentador. Para as faltas permanentes observam-se as características apresentadas na Figura 3:

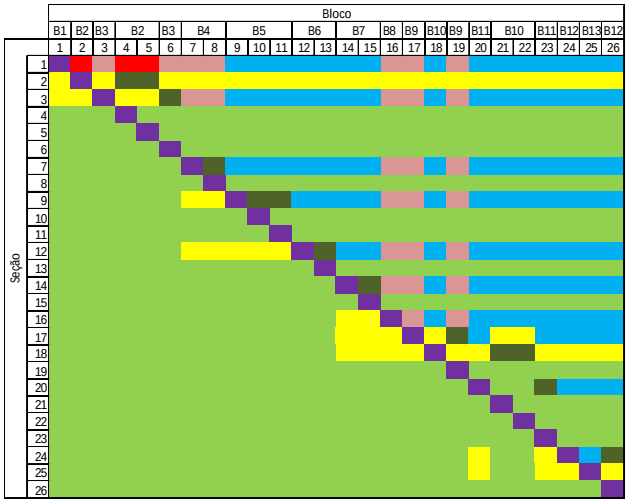

Fig. 3 Efeito do comportamento dos dispositivos na ocorrência de faltas permanentes – Caso base.

As faltas ocorridas nas seções do alimentador estão destacadas em roxo, representadas pela diagonal principal, e seu respectivo impacto à montante e à jusante está representado pela linha correspondente a cada seção em falta.

As cores em cada célula representam o comportamento de cada seção e estão codificadas conforme a seguir:

Verde Claro: Seções não impactadas pela falta permanente

Amarelo: Restauração à montante da seção em falta;

Roxo: Reparo na seção em falta;

Verde Escuro: Reparo devido à seção pertencer ao bloco em falta;

Azul: Restauração devido à capacidade de transferência cargas dos alimentadores vizinhos ser viável;

Vermelho: Reparo devido às capacidades de remanejamento de carga dos alimentadores vizinhos serem insuficiente;

Rosa: Reparo devido o bloco a jusante da seção em falta não possuir conexão com alimentador vizinho;

Para as faltas temporárias, obteve-se o comportamento apresentado na Figura 4.

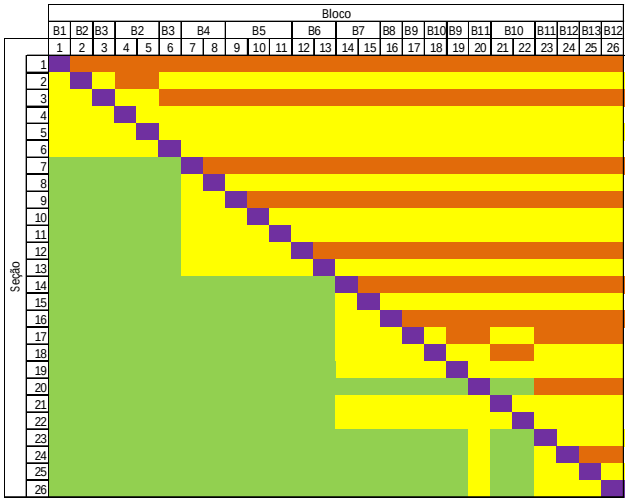

Fig. 4 Efeito do comportamento dos dispositivos na ocorrência de faltas temporárias – Caso base.

Na Figura 4, as seções sob faltas estão representadas pela diagonal principal destacadas em roxo e seu respectivo impacto à montante e à jusante estão representados pela linha correspondente à cada seção em falta.

As cores em cada célula representam o comportamento de cada seção e estão codificadas conforme a seguir:

Verde Claro: Seções não impactadas pela falta temporária;

Amarelo: Restauração à montante da seção em falta devido à atuação de um religador ou disjuntor;

Roxo: Restauração da seção em falta.

Laranja: Restauração à jusante da seção em falta devido à atuação de um religador ou disjuntor;

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados de algumas soluções (S). A solução base (S = 0), inclui o custo das faltas e dos equipamentos instalados antes da aplicação da metodologia. As viáveis (1-5) são fornecidas pela metodologia proposta e a variação percentual ilustrada na tabela reflete o potencial de melhora das soluções encontradas pela metodologia com relação ao caso base, considerando as variações nos custos dos equipamentos e das faltas permanentes e temporárias.

Para obtenção destes resultados os parâmetros calibrados para a execução do algoritmo foram obtidos através de testes exaustivos, sendo Q = 10; m = 70; σ = 0,01; α e β = 0,7; número total de iterações = 100 e feromônio inicial = 0,1.

Tabela 4. Soluções Caso Base (0) e Viáveis (1-5)

S	Tipo de Disp.	Ramo de instalação no SDEE	Custo Total (kUS$)	Δ (%)
0	CH	10-11; 10-22; 38-46; 48-61; 78-89; 90-91; 90-119; 103-105; 107-108	176	0%
	FU	11-12; 11-15; 23-24; 38-40; 48-49; 48-52; 63-64; 78-79; 95-97; 103-104; 107-112; 119-120; 119-122		
	RE	23-35; 63-76; 95-102		
1	CH	11-12; 47-48; 48-61; 77-78; 90-91; 90-119; 103-105; 109-110	134	-24%
	FU	10-11; 11-15; 23-24; 26-27; 38-40; 48-49; 48-52; 63-64; 79-80; 95-97; 95-102; 107-108; 107-112; 119-122		
	RE	63-76		
2	CH	10-11; 47-48; 66-67; 78-79; 90-119; 95-102; 107-112	150	-15%
	FU	2-3; 11-12; 11-15; 23-24; 27-28; 38-39; 38-40; 48-49; 48-52; 67-69; 82-84; 95-97; 103-104; 108-109; 115-116; 119-120; 119-122; 130-132;		
	RE			
3	CH	11-12; 47-48; 62-63; 78-89; 90-91; 103-105; 109-110;	151	-14%
	FU	2-3; 10-11; 23-24; 38-40; 48-49; 48-52; 63-64; 78-79; 90-119; 95-97; 103-104; 107-108; 107-112		
	RE	37-38; 63-76		
4	CH	48-61; 90-91	157	-11%
	FU	10-11; 23-24; 38-40; 48-49; 48-52; 63-64; 78-79; 90-119; 95-97; 103-104; 107-112		
	RE	23-35; 63-76; 103-105		
5	CH	11-12; 47-48; 63-76; 103-105; 109-110;	167	-5%
	FU	10-11; 23-24; 38-40; 48-49; 48-52; 63-64; 79-80; 90-119; 95-97; 107-112		
	RE	23-35; 48-61; 90-91		

Embora a solução (S = 1) tenha reduzido 24% o valor da função objetivo, esse decréscimo teve influência

principalmente devido à exclusão de 2 religadores, penalizando sobre tudo o custo das faltas temporárias, que elevou em 23,27%. Os custos dos equipamentos e das faltas permanentes reduziram em 40,98% e 4,55% respectivamente.

Percebeu-se que nas soluções viáveis obtidas, onde há redução no número de religadores, não consegue-se aumentar a qualidade do fornecimento de energia referente ao impacto das faltas temporárias, diferentemente dos equipamentos chaves de manobras e chaves fusíveis, pois foram obtidas soluções (S = 3 e S = 5), onde mesmo reduzindo o número destes equipamentos, conseguiu-se obter soluções de melhor qualidade através da alocação otimizada.

Na solução (S = 2), onde houve ausência de religador, os custos com equipamentos desabaram 60,19%, porém houve piora significativa nos custos das faltas permanentes e temporárias em 57,51% e 75,64% respectivamente. Esta solução, embora atenda a FO, não encontra lugar na vida prática, pois a qualidade do fornecimento de energia degradou te tal maneira, que certamente traria sanções por parte das agências regulamentadoras.

Na solução (S = 3) foram reduzidas 2 chaves de manobra e o número de chaves fusíveis permaneceu inalterado, obtendo 14% de melhora no resultado global e redução de 11,73% no impacto das faltas permanentes. Na solução (S = 5) foram reduzidas 4 chaves de manobras e 3 chaves fusíveis, resultando em um valor da FO inferior ao caso base em 5% e redução de 10% no impacto das faltas permanentes.

A solução (S = 4) manteve a quantidade de religadores igual ao caso base, porém a quantidade total dos equipamentos instalados foi reduzida de 25 para 16. Essa redução de 36%, simultaneamente com a realocação dos demais dispositivos, permitiu uma melhora de 11% no valor da FO. Neste caso, todos os seus componentes de custos também foram reduzidos. Os custos com equipamentos, faltas permanentes e temporárias diminuíram 14,58%, 6,69% e 0,68% respectivamente.

Verificou-se também que se permitida uma variação de até 10% superior ao custo do caso base, a metodologia proposta apresentou soluções viáveis com mais religadores, obtendo desempenho superior para as faltas temporárias, porém devido seu alto custo de aquisição, instalação e desinstalação, nenhuma foi inferior à solução (S = 0).

6. CONCLUSÕES

A alocação e/ou realocação de dispositivos de manobra e proteção, juntamente com a possibilidade de transferência de carga entre alimentadores vizinhos, proporciona melhorias no desempenho do SDEE frente às faltas, atingindo o objetivo de reduzir o custo total para a concessionária e melhorar a qualidade do serviço de fornecimento de energia aos consumidores.

A minimização do valor global da função objetivo beneficia a empresa distribuidora pela redução dos custos, porém para alguns casos isto não refletiu na melhoria da qualidade do serviço ao consumidor, conforme mostra a solução (S = 2), onde se tem uma redução de 15% nos custos para a concessionária.

No cenário o ideal, busca-se conciliar a otimização dos custos com o acréscimo na qualidade do serviço prestado para o mesmo alimentador, exemplo característico em todas as outras saídas, especialmente na solução (S = 4), onde se obteve desempenho dos equipamentos alocados nos dois tipos de faltas.

Vergasta-se também sobre a possibilidade de não se atingir uma FO com valor inferior à solução do caso base devido aos níveis pretendidos de redução no impacto das faltas permanentes e temporárias. Seja por exigência do órgão regulador ou qualquer que seja o motivo, será necessário permitir um relaxamento das soluções viáveis para que se atinja a qualidade/redução pretendida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq Processo 305318/2016-0 e FAPESP Processo 2015/21972-6, pelo financiamento deste projeto. Agradeço também aos líderes Clóvis Florentino de Albuquerque Filho e Leandro Giovanetti da empresa Atvos pela flexibilização no horário de trabalho, que permitiu dar continuidade a este projeto.

REFERÊNCIAS

Anderson, P. M. Power system protection. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.

Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL. Módulo 4: procedimentos operativos do sistema de distribuição. In: ____ Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional -PRODIST. Brasília, DF: ANEEL, 2010.

Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL. Módulo 8: qualidade da energia elétrica. In: ____ Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional -PRODIST. Brasília, DF: ANEEL, 2018.

Billinton, R.; Jonnavithula, S. Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 11, n. 3, p. 1646–1651, 1996.

Celli, G.; Pilo, F. Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 14, n. 3, p. 1167–1172, 1999.

Conceição, K.P.; Pereira Júnior, B.R.; Contreras, J.; Mantovani, J.R.S. A Multiobjective Optimization Technique to Develop Protection Systems of Distribution Networks With Distributed Generation. IEEE Transactions on Power Systems, V. 33, p. 7064-7075, 2018.

LaPSEE (2020). Practical 135 bus feeder data, Available:http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/TestSystems/135_Bus_Feeder.pdf. Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaPSEE).

Peñuela Meneses, C. A. Desenvolvimento de técnicas e modelos matemáticos para solução do problema de planejamento da expansão e operação de sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos. 2012. 183 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) -Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista -UNESP, Ilha Solteira, 2012.

Silva, L. G. W. Desenvolvimento de uma Metodologia Integrada para Alocação Otimizada de Dispositivos de Controle e Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2005. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) -Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista -UNESP, Ilha Solteira - SP, 2005.

Silva, L. G. W.; Pereira, R. A. F.; Abbad, J. R.; Mantovani, J. R. S. Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm. Electric Power Systems Research, Amsterdam, v. 78, n. 3, p. 372–381, 2008.

Soudi, F.; Tomsovic, K. Optimal trade-offs in distribution protection design. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 16, n. 2, p. 292–296, 2001.

Teng, J.; Liu, Y. A novel ACS-based optimum switch relocation method. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 18, n. 1, p. 113–120, 2003.

Apêndice A. EQUAÇÕES COMPLEMENTARES

Os termos da equação (2), CPs , $CPms$ e $CPjs$ são calculados através das equações (2.1, 2.2 e 2.3):

$$CPs_k = LR_k \times CrepR + LC_k \times CrepC + LI_k \times CrepI \qquad (2.1)$$

Em que:

LR, LC, LI : Potência das cargas residenciais, comerciais e industriais, respectivamente;

$CrepR, CrepC, CrepI$: Custos de reparo para cargas residenciais, comerciais e industriais, respectivamente;

$$CPms_k = \begin{Bmatrix} 0 & ,Se \quad disp_k \neq 1 \\ \sum_{j=M}^{k-1} \begin{pmatrix} LR_j \times CresR + \\ LC_j \times CresC + \\ LI_j \times CresI \end{pmatrix} & ,Se \quad disp_M = 3 \vee 4 \end{Bmatrix} \qquad (2.2)$$

em que:

$disp$: Tipo de dispositivo instalado na seção. Código (1) Chave seccionadora, (2) Fusível, (3) Religador; e, (4) Disjuntor da subestação;

M : Primeira seção à montante da seção k que possui dispositivo diferente do tipo 1;

$CresR, CresC, CresI$: Custos de restauração para cargas residenciais, comerciais e industriais, respectivamente;

$$CPjs_k = \begin{Bmatrix} \sum_{j=k+1}^{B} \begin{pmatrix} LR_j \times CrepR + \\ LC_j \times CrepC + \\ LI_j \times CrepI \end{pmatrix} & ,Se \quad k \subset B \\ \sum_{j=k+1}^{B} \begin{pmatrix} LR_j \times CrepR + \\ LC_j \times CrepC + \\ LI_j \times CrepI \end{pmatrix} & ,Se \quad CB \geq SCAL \\ \sum_{j=k+1}^{B} \begin{pmatrix} LR_j \times CresR + \\ LC_j \times CresC + \\ LI_j \times CresI \end{pmatrix} & ,Se \quad CB \leq SCAL \end{Bmatrix} \qquad (2.3)$$

Onde:

B : Blocos candidatos à transferência de carga, constituídos por todas as seções que iniciam com dispositivos dos tipos 1 ou 3, a jusante da seção em falta;

CB : Carga total do bloco B;

$SCAL$: Quantidade remanescente de cargas disponível para transferência no alimentador conectado ao bloco;

Os componentes da equação (3), CTs , $CTms$ e $CTjs$ são calculados pelas equações (3.1), (3.2) e (3.3), respectivamente.

$$CTs_k = LR_k \times CresR + LC_k \times CresC + LI_k \times CresI \qquad (3.1)$$

em que:

$CresR, CresC, CresI$: Custo de restauração para cargas residenciais, comerciais e industriais, respectivamente;

$$CTms_k = \begin{Bmatrix} 0 & ,Se \quad disp_k = 3 \\ \sum_{j=MT}^{k-1} \begin{pmatrix} LR_j \times CresR + \\ LC_j \times CresC + \\ LI_j \times CresI \end{pmatrix} & ,Se \quad disp_{MT} = 3 \vee 4 \end{Bmatrix} \qquad (3.2)$$

em que:

MT : Primeira seção à montante da seção k que possui dispositivo instalado dos tipos 3 ou 4;

$$CTjs_k = \sum_{j=k+1}^{MJ} \left(LR_j \times CresR + LC_j \times CresC + LI_j \times CresI \right) \qquad (3.3)$$

em que:

MJ : Todas as seções que estejam à jusante do dispositivo de proteção dos tipos 3 ou 4, que tenha atuado, e que estejam conectadas à seção em falta;