

Metodologia Híbrida para Alocação, Dimensionamento e Coordenação de Dispositivos de Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Resumo — Este trabalho apresenta uma metodologia híbrida para solução do problema de alocação de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os métodos utilizados atualmente na busca dos melhores locais para instalação de dispositivos de proteção apenas consideram resultados de processos de otimização. Primeiramente, a alocação de religadores é determinada através de um processo de otimização, buscando a redução de indicadores de continuidade de serviço. Elos fusíveis são alocados de acordo com as regras heurísticas elaboradas pelas empresas de distribuição de energia. Para a solução, são utilizados algoritmos genéticos. Para validar a metodologia proposta, esta é testada em um sistema teste genérico.

Palavras-chaves — Proteção de sistemas de distribuição, confiabilidade de sistemas de distribuição, alocação de dispositivos de proteção, algoritmos genéticos.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, as empresas concessionárias de energia elétrica têm enfrentado desafios para adequar a confiabilidade dos sistemas de distribuição aos requisitos da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). A confiabilidade de um sistema está associado com um melhor serviço e qualidade de energia elétrica [1]. O planejamento eficiente de um sistema de distribuição inclui, entre outros investimentos, a alocação otimizada de dispositivos de proteção, buscando o aprimoramento da qualidade de serviço, reduzindo o número de interrupções e impacto de faltas [2].

A fim de permitir uma avaliação objetiva da confiabilidade de sistemas de distribuição, diversos indicadores foram estabelecidos [3]. Em relação à continuidade do suprimento de energia, os indicadores DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora – e FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora – foram estabelecidos.

Diversos métodos foram desenvolvidos para solucionar o problema do incremento de confiabilidade em sistemas de distribuição. Levitin, Mazal-Tov e Elmakis [4] apresentaram duas metodologias para a alocação ótima de chaves seccionadoras, com o intuito de minimizar o DEC e a energia não suprida.

Em [5] foi apresentada uma formulação para o problema de alocação de chaves seccionadoras, considerando interrupções, manutenção e custos de investimento. Esta metodologia utiliza

a metaheurística recozimento simulado para determinar o número de chaves a serem instaladas e sua respectiva alocação. Já em [6], foi proposta a utilização de busca tabu reativa na tentativa de determinar a solução ótima para o problema.

Entretanto, apenas a alocação de chaves seccionadoras não é suficiente em alcançar um valor aceitável de confiabilidade nos sistemas de distribuição. Quando uma falta permanente ocorre, as metodologias propostas buscam restabelecer o suprimento de energia para o maior número de consumidores possível. Porém, quando a falta é temporária, a desconexão desnecessária de consumidores pode ocorrer. Os sistemas de proteção são projetados para distinguir esses tipos de falta e consequentemente, isolar seções do sistema sob defeito [7]. Esses sistemas representam um papel crucial na manutenção da confiabilidade exigida em sistemas de distribuição modernos [8]. Pesquisas atuais buscam minimizar custos de instalação de dispositivos de proteção e chaves seccionadoras [2], reduzir FEC [9], ou simultaneamente minimizar DEC e FEC [10], caracterizando problemas de otimização multiobjetivo.

Em [13], os autores apresentam um trabalho para avaliar a aplicabilidade das técnicas de otimização comumente utilizadas para solucionar o problema de alocação de dispositivos de proteção. Esta análise é realizada comparando técnicas já existentes com a complexidade computacional do método desenvolvido pelos autores.

Também em [14], outro método para alocação de dispositivos de proteção é desenvolvido, o qual utiliza recozimento simulado para atingir o valor ótimo do problema obtido anteriormente através de uma busca exaustiva. Em [15] outro método é proposto, representando o sistema como árvore de recursão, similar a [14], onde algoritmos genéticos são utilizados para redução de DEC e FEC, bem como custos de equipamentos.

O método proposto nesse trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- Mudança de paradigma ao abordar o problema de alocação de dispositivos de proteção;
- A alocação dos elos fusíveis de forma heurística simplifica o processo de otimização na alocação dos demais dispositivos de proteção;
- A metodologia considera a minimização da frequência e duração das interrupções, sem a necessidade de resolução de complexos problemas de otimização multiobjetivo;

- Ao permitir a operação rápida dos religadores, a filosofia fuse saving é capaz de reduzir os efeitos das faltas temporárias;
- O método desenvolvido apresenta uma solução compatível com práticas adotadas por empresas de energia elétrica, utilizando as próprias normas dessas no desenvolvimento do trabalho.

II. METODOLOGIA PROPOSTA

Primeiramente, é necessário determinar uma representação eficiente do sistema de distribuição em estudo. Isso é realizado através da teoria de grafos. Um sistema de distribuição genérico pode ser representado por um grafo, Fig. 2, onde os vértices são pontos de interesse e as arestas representam as seções do alimentador.

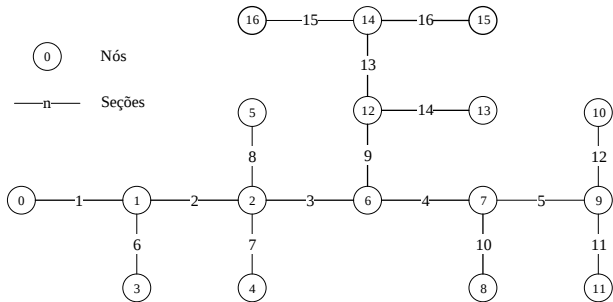


Fig. 1: Grafo representativo de um sistema de distribuição.

Esta representação permite a construção de uma matriz Topologia, considerando os nós de origem e destino de cada seção do sistema. Esta matriz é mostrada na Tabela I.

TABELA I. MATRIZ TOPOLOGIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Seção	1	2	3	...	n_s
De	0	1	2	...	n_f
Para	1	2	6	...	n_t

Onde n_s indica o número de seções do alimentador, n_i e n_f os nós inicial e final da seção, respectivamente.

Cada seção possui diversos parâmetros associados, tais como taxas de faltas permanentes e temporárias, comprimento da seção, corrente de carga, curto-circuito mínimo e máximo, número de consumidores e o tempo de restabelecimento para cada seção. Esta matriz, mostrada na Tabela II, reúne esses parâmetros para facilitar o acesso pelo algoritmo desenvolvido.

TABELA II. MATRIZ DE PARÂMETROS DO SISTEMA

Seção	1	2	3	...	n_s
Taxa falta permanente	λ_1	λ_2	λ_3	...	λ_{n_s}
Taxa de falha temporária	γ_1	γ_2	γ_3	...	γ_{n_s}
Comprimento	l_1	l_2	l_3	...	l_{n_s}

TABELA II (CONT.). MATRIZ DE PARÂMETROS DO SISTEMA

Corrente de carga	I_{L_1}	I_{L_2}	I_{L_3}	...	$I_{L_{n_s}}$
Mínima corrente de curto-circuito	Isc_{min1}	Isc_{min2}	Isc_{min3}	...	$Isc_{min_{n_s}}$
Máxima corrente de curto-circuito	Isc_{max1}	Isc_{max2}	Isc_{max3}	...	$Isc_{max_{n_s}}$
Tempo de Reparo	TR_1	TR_2	TR_3	...	TR_{n_s}
Número de consumidores	$Cons_1$	$Cons_2$	$Cons_3$	...	$Cons_{n_s}$

Os diferentes tipos de alimentadores em um Sistema de distribuição apresentam diferentes características:

- Alimentador primário ou troncal: Componente principal do sistema, composto por condutores de maior diâmetro;
- Alimentador secundário: Compreende ramais do alimentador primário que alimentam cargas em tensão primária de distribuição;
- Ramais: Seções que alimentam diretamente os transformadores de distribuição;

O algoritmo geral é apresentado nas Fig. 2 e Fig. 3, onde os indicadores de continuidade são calculados através da matriz lógico-estrutural (MLE) [11].

Após a obtenção preliminar dos indicadores de continuidade, a alocação dos religadores é determinada através de um algoritmo genético simples. Posteriormente, a alocação dos elos fusíveis é determinada diretamente através das normas das empresas e a MLE é atualizada para o cálculo dos novos indicadores de continuidade.

Todos os pontos de carga são armazenados no conjunto *Cargas*, e todas as seções componentes dos alimentadores primário, secundário e ramais são armazenados nos seus respectivos conjuntos.

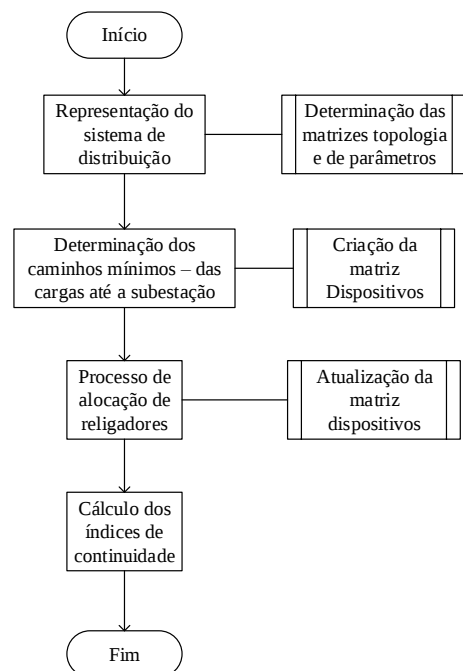


Fig. 2: Processamento preliminar e processo de alocação de religadores.

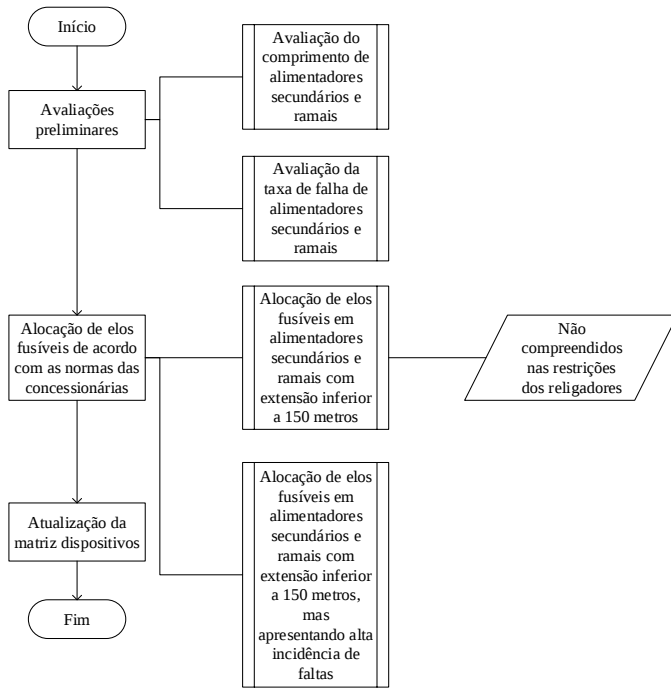


Fig. 3: Metodologia de alocação heurística dos elos fusíveis.

Todos os caminhos mínimos desde os pontos extremos do sistema de distribuição até a subestação formam a matriz **Dispositivos**. Considerando um sistema que apresenta n seções e k pontos extremos, a Fig. 4 mostra a matriz **Dispositivos**.

Cada célula da matriz **Dispositivos** é preenchida com o tipo de dispositivo de proteção instalado nessa seção. Os dispositivos de proteção serão indexados na matriz **Dispositivos** como:

- 0, caso não haja dispositivo de proteção instalado na seção;
- 1, caso haja um elo fusível instalado na seção;
- 2, caso haja um religador instalado na seção;
- 3, caso haja um seccionizador instalado na seção.

	Seções						
	1	2	3	4	5	...	n
1							
2							
3							
4							
5							
⋮							
k							

Fig. 4: Construção da matriz Dispositivos para um sistema genérico.

A. Algoritmo para alocação dos religadores

A fim de determinar a alocação mais indicada para os religadores, um algoritmo genético (AG) foi desenvolvido com o objetivo de minimizar indicadores de continuidade. Este AG é modelado considerando as normas das empresas de energia como restrições na alocação destes dispositivos no sistema de distribuição. A função objetivo é mostrada na Eq. (1).

$$FO = P_1 \cdot \left(\frac{FEC - FEC_e}{FEC_e} \right) + P_2 \cdot \left(\frac{DEC - DEC_e}{DEC_e} \right) \quad (1)$$

Onde:

P_1, P_2 : Pesos assumidos por DEC e FEC, respectivamente;

FEC : Valor do indicador FEC;

FEC_e : Valor esperado do indicador FEC;

DEC : Valor do indicador DEC;

DEC_e : Valor esperado do indicador DEC;

Nesta metodologia, cada seção do sistema de distribuição é considerada candidata à instalação de religadores. A forma representativa de uma solução é mostrada na Tabela III.

TABELA III. REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO DE RELIGADORES

Seção	1	2	3	4	5	6	7	...	n
	1	0	0	0	1	0	0	...	0

Caso o valor binário seja 0 (zero), significa que não haverá religador alocado na seção. Se o valor binário for 1, um religador deverá ser instalado na seção correspondente.

As zonas de proteção dos religadores são determinadas pelas seções localizadas à montante do dispositivo alocado, que são lidas na matriz **Dispositivos**. Estas zonas são limitadas pela zona de proteção do religador à jusante. Os indicadores DEC e FEC são calculados através da MLE.

As restrições aplicadas ao subproblema de alocação dos religadores busca incluir as normas das empresas de energia e adequar o capital investido. Também deve ser levado em consideração a experiência do operador, que pode determinar seções onde a instalação do religador é proibida ou obrigatória, bem como o número de dispositivos disponíveis para alocação. As restrições do problema de alocação de religadores são:

- Religadores devem ser instalados após cargas importantes, considerando que interrupções à jusante destas podem causar uma interrupção permanente;
- Religadores devem ser instalados no início de ramais que alimentam cargas importantes. A importância das cargas é definida pelo operador;
- Religadores devem ser alocados no início de ramais que apresentam alta taxa de faltas permanentes;

Após o processo de otimização, a matriz **Dispositivos** é atualizada com a posição referente aos religadores.

III. RESULTADOS

Para testar a metodologia proposta, o sistema da Fig. 5 é considerado. Além da aplicação do método proposto, este é comparado com três métodos previamente desenvolvidos que estão presente na literatura.

Algumas configurações preliminares devem ser feitas antes da aplicação do método proposto. Esses parâmetros são mostrados na Tabela IV.

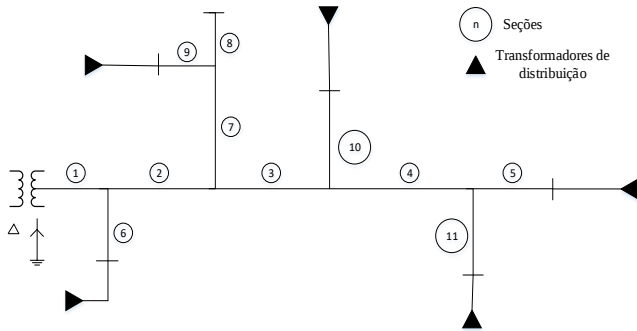


Fig. 5: Sistema Teste.

TABELA IV. PARÂMETROS DA METODOLOGIA

Parâmetro	Valor
Religadores disponíveis para alocação	10
Elos fusíveis disponíveis para alocação	30
Peso do indicador FEC	0,5
Peso do indicador DEC	0,5
Taxa de falta permanente (faltas/km.ano)	0,25
Taxa de falta temporária (faltas/km.ano)	0,10

Primeiramente, o algoritmo determina todos os elos fusíveis dos transformadores de distribuição, dimensionando os mesmos de acordo com sua potência [12]. Estes dimensionamento é mostrado na Tabela V.

TABELA V
DIMENSIONAMENTO DA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES

Potência do transformador	Elo Fusível
15 kVA	1H
30 kVA	2H
45 kVA	3H
75 kVA	5H
112.5 kVA	6K

Então, os elos fusíveis são alocados de acordo com as normas das empresas de energia. Após a alocação, esses elos fusíveis são dimensionados, como mostrado na Tabela VI.

TABELA VI. ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS ELOS FUSÍVEIS

Seção	Elo Fusível
5	15K
6	40K
7	40K
9	15K
10	25K
11	10K

Na Tabela VII é mostrada a alocação e também os parâmetros de dimensionamento do religador.

A Tabela VIII mostra os valores de DEC e FEC obtidos pelos métodos desenvolvidos por [13], [14] e [15], juntamente com os resultados obtidos pela metodologia proposta. Também é informado o tempo computacional dos algoritmos, que foram executados em um computador com processador core i7, 16 GB de RAM e modelados em MATLAB®.

Na Fig. 6 é mostrado o diagrama de coordenação tempo x corrente determinado para um caminho mínimo do sistema teste utilizado.

TABELA VII. ALOCAÇÃO E PARÂMETROS DETERMINADOS PARA O RELIGADOR

Seção de instalação do religador	3
Corrente de atuação de fase	50 (A)
Corrente de atuação de neutro	10 (A)
Número de operações rápidas	2
Número de operações temporizadas	2

TABELA VIII. COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA E MÉTODOS DA LITERATURA

Método	[13]	[14]	[15]	Metodologia proposta
Número de religadores alocados	2	2	1	1
Número de elos fusíveis alocados	5	5	6	6
Seções de instalação do religador	3,7	3,7	4	3
Seções de instalação dos elos fusíveis	5, 6, 9, 10, 11	5, 6, 9, 10, 11	5, 6, 7, 9, 10, 11	5, 6, 7, 9, 10, 11
DEC esperado	9	9	9	9
FEC esperado	15	15	15	15
DEC	9,284	8,673	9,654	8,589
FEC	15,534	14,846	14,815	14,828
Tempo de execução (s)	3,26	3,43	3,15	1,42

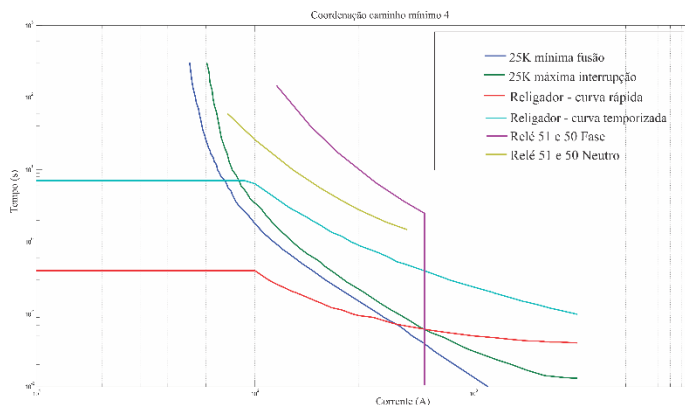


Fig. 6: Diagrama de coordenação para o caminho mínimo 4.

Na Fig. 6 é possível notar que a coordenação dos dispositivos religadores, elos fusíveis e relé é atingida, permitindo um intervalo de coordenação amplo, definido pela interseção das curvas tempo x corrente do religador e elo fusível.

V. CONCLUSÃO

Uma metodologia de alocação, dimensionamento e coordenação entre dispositivos de proteção foi desenvolvida. Esse método utiliza critérios heurísticos para alocação de elos fusíveis, permitindo uma simplificação do processo de otimização. Os dispositivos religadores foram alocados utilizando algoritmos genéticos e posteriormente foram dimensionados e tiveram suas curvas características tempo x corrente determinadas. Para o cálculo dos indicadores de continuidade, a Matriz Lógico-Estrutural foi utilizada. A comparação foi realizada entre o método proposto e três métodos referência da literatura, os quais foram implementados, porém, não fornecem a opção de dimensionamento e coordenação dos dispositivos de proteção, sendo a comparação realizada apenas para o método de alocação de dispositivos de proteção. Essa comparação mostrou que o método proposto é eficiente e mais completo, visto que todos os dispositivos foram dimensionados e também coordenados, o que mostra um diferencial da metodologia desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- [1] R.E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*. Vol. I. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [2] L. G. W. da Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Optimized Allocation of Sectionalizing Switches and Control and Protection Devices for Reliability Indices Improvement in Distribution Systems", 2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Latin America, 2004
- [3] *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*, IEEE Std 1, IEEE, New York, 2012
- [4] G. Levitin, S. Mazal-Tov, D. Elmakis, "Genetic Algorithm for Optimal Sectionalizing in Radial Distribution Systems with Alternative Supply", *Electric Power Systems Research*, N° 35, pp. 149-155, 1995.
- [5] R. Billinton, and S. Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, n° 3, pp 1646 – 1651, Jul. 1996.
- [6] S. Toune, H. Fudo, T. Gengi, Y. Fukuyama, Y. Nakanishi, "A Reactive Tabu Search for Service Restoration in Electric Power Distribution Systems." *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1998.
- [7] P.M. Anderson, G.M. Chintaluri, S. M. Magbuhat, R. F. Ghajar, "An improved reliability model for redundant protective systems – Markov models". *IEEE Transactions Power Systems*, pp.573–578, 1997.

- [8] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, T. S. Sidhu, "Determination of the optimum routine test and self-checking intervals in protective relaying using a reliability model". *IEEE Trans Power Syst* 2002; 17(3):663–9.
- [9] H. H. Dezaki, H. A. Abyaneh, Y. Kabiri, H. Nafisi, K. Mazlumi, H. A. Fakhraabadi, "Optimized Protective Devices Allocation in Electric Power Distribution Systems Based on the Current Conditions of the Devices". 2010 IEEE International Conference on Power and Energy - PECon 2010, pp. 577 - 582, 2010.
- [10] W. Tippachon, D. Rerkpreendapong, Multiobjective "Optimal Placement of Switches and Protective Devices in Electric Power Distribution Systems using Ant Colony Optimization". *Electric Power Systems Research*, N° 79, pp. 1171-1178, 2009.
- [11] D. P. Bernardon, "Novos Métodos para Reconfiguração das Redes de Distribuição a partir de Algoritmos de Tomadas de Decisão Multicriteriais", Ph.D dissertation, Universidade Federal de Santa Maria, Brazil, 2007.
- [12] Eletrobrás, "Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição", Vol. 2. Rio de Janeiro: Editora Campus – Eletrobrás, 1982.
- [13] Soudi, F.; Tomsovic, K.; Optimal distribution protection design: Quality of solution and computational analysis. *International Journal on Electrical Power and Energy Systems*, v. 21, pp. 327 – 335, 1999;
- [14] Zambon, E.; Bossois, D. Z.; Garcia, B. B.; Azeredo, E. F.; A novel nonlinear programming model for distribution protection optimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n° 4, 2009;
- [15] Burian, R.; "Algoritmos genéticos na alocação de dispositivos de proteção de distribuição de energia elétrica", Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, Brazil, 2009.