

Alocação de Limitadores de Corrente de Falta para Reduzir a Descoordenação Religador – Elo Fusível em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída Usando Algoritmo de Enxame de Partículas Multiobjetivo

Resumo — Este trabalho apresenta um método para minimizar a descoordenação de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica com geração distribuída (GD). Com a crescente penetração de GD em sistemas de distribuição, a principal prática para manter a coordenação de dispositivos de proteção é a desconexão de todas as fontes de GD. Esta prática anula os benefícios trazidos pela GD, visto que a maioria das faltas em sistemas de distribuição é de caráter temporário. Para resolver esse problema, este trabalho propõe a alocação de limitadores de corrente de falta (LCF), que consistem em dispositivos inertes no funcionamento normal do sistema, mas que inserem uma alta impedância em série com o alimentador quando uma falta ocorre, limitando assim a corrente de curto-circuito. A alocação de LCF é tratada como um problema multiobjetivo, onde o intuito é minimizar as diferenças de corrente nos dispositivos durante uma falta nas situações com e sem GD. Também busca-se limitar a dimensão dos LCF, de modo a reduzir custos. A busca pela solução ótima é realizada através de um algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo, e o método é testado no tradicional *Canadian Benchmark Test System* para validação, mostrando uma grande eficiência.

Palavras-chaves — Proteção de sistemas de distribuição, Limitadores de corrente de falta, Coordenação de dispositivos de proteção, Geração distribuída.

I. INTRODUÇÃO

Fontes de geração distribuída (GD) são pequenas unidades geradoras de energia localizadas próximo aos centros de consumo, conectadas nas redes de média ou baixa tensão. A instalação dessas fontes em sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) trazem benefícios como a melhora na continuidade de serviço, redução de perdas em alimentadores e redução de gases causadores de efeito estufa [1-3]. Porém, a inserção de fontes de GD nos SDEE causa alterações nas correntes de falta. Essas correntes de falta sensibilizam os dispositivos de proteção, provocando a operação dos mesmos. Ao alterar as correntes de curto-circuito devido à conexão de GD, a coordenação de dispositivos de proteção é comprometida. Diversos autores têm desenvolvido métodos para reduzir o impacto da inserção de fontes de GD em SDEE. Em [4], os autores desenvolvem um método para manutenção

da coordenação religador-fusível através de um esquema de religamento microprocessado. Esse método envolve a alteração das características operacionais de religadores, assumindo que a GD será desconectada antes da primeira operação do religador na sua característica instantânea. Mas a desconexão de fontes de GD na ocorrência de uma falta anula os benefícios trazidos por estas, visto que cerca de 80% das faltas em SDEE são de caráter temporário [5].

Em [6] o autor propõe um método para quantificar o impacto da GD na proteção de sistemas de distribuição. Isso é realizado através de um Índice de Descoordenação da Proteção, um valor que representa a probabilidade de ocorrência de descoordenação no sistema. Este método considera diretamente a coordenação entre os dispositivos, quantificando o impacto negativo da GD e também determinando a máxima capacidade permitida para inserção de GD em cada local do alimentador.

Um esquema adaptativo foi desenvolvido por Hussain et al. [7] para garantir o funcionamento da filosofia *fuse saving* em sistemas de distribuição com GD. Esse método se beneficia das características temporizadas e instantâneas (50 e 51) para manutenção da coordenação entre religador e elos fusíveis em SDEE com GD. Dependendo do nível de penetração de GD no SDEE, é sugerida a substituição de religadores já instalados e coordenados por religadores microprocessados com função de comunicação. Outro problema encontrado é que não há garantia de funcionamento do método proposto para diferentes níveis de penetração de GD caso a função instantânea do religador tenha uma corrente de pick-up fixa. Para solucionar isso, os autores propõem um algoritmo para a alteração online da corrente de pick-up da função instantânea do religador em resposta à diferentes cenários de inserção de GD.

Limitadores de corrente de falta (LCF) vem apresentando significativos avanços para solucionar os problemas intrínsecos à inserção de fontes de GD em SDEE. Esses dispositivos são inertes durante a operação normal do sistema, porém, em uma situação de falta, inserem uma alta impedância em série com a linha, limitando assim a corrente de falta que sensibilizará os dispositivos de proteção. Esses dispositivos

vem sendo utilizados tanto para redução da corrente de falta em sistemas de potência, onde estas provocam a operação de relés de sobrecorrente, tanto em SDEE, onde apresentam uma eficiente solução para o problema de descoordenação entre religadores e elos fusíveis. Em [8], a coordenação de dispositivos de proteção devido à instalação de Limitadores de Corrente de Falta de Estado Sólido (LCFES) em um sistema de distribuição com GD foi analisada. Os autores realizaram testes de curto-circuito para diversos cenários de presença de GD e aplicações de LCFES. Os tempos de atuação de dispositivos religadores e relés de proteção foram avaliados para diferentes níveis de corrente de falta, mostrando que a aplicação de LCFES com resistência fixa em sistemas de distribuição com GD contribui para manter os tempos de atuação dos dispositivos de proteção em valores coordenados entre si. Já em [9] os autores realizam uma comparação entre os tipos de limitadores de corrente utilizados para redução dos efeitos da geração distribuída em sistemas elétricos de potência. Primeiramente, é feita uma análise da rede para determinar o tipo de limitador de corrente (Resistivo – RLCF, Indutivo – ILCF ou Complexo – CLCF) mais indicado para instalação. Então, um estudo comparativo entre estes limitadores é realizado para investigar o efeito da dimensão e tipo de LCF na amplitude e fase das correntes de falta contribuídas pela GD e pela rede. Para ilustrar o impacto do LCF na restauração da coordenação entre relés, um algoritmo de otimização é usado para determinar a dimensão mínima do LCF e o consequente impacto da impedância do LCF no intervalo de coordenação entre a proteção primária e de retaguarda. Isso é testado em um sistema IEEE típico.

Porém, estes métodos têm como objetivo a manutenção do tempo de operação dos dispositivos de proteção, testando diferentes tipos de LCF para a solução do problema. Para a correta operação do sistema de proteção e adequação econômica, é necessária a determinação dos melhores locais para instalação dos dispositivos LCF, bem como determinar a menor dimensão destes que satisfaça as condições de manutenção da coordenação entre religadores e elos fusíveis, ou seja, o problema deve ser tratado considerando mais de um objetivo.

Desse modo, o método proposto apresenta as seguintes contribuições:

- Desenvolvimento de um método para solucionar o problema de descoordenação religador - fusível;
- Tratamento multiobjetivo do problema de alocação de limitadores de corrente de falta em sistemas de distribuição;
- Utilização da metaheurística Enxame de Partículas multiobjetivo para solução do problema;
- Testes realizados em sistemas IEEE consolidados, sendo que os objetivos envolvem a determinação dos melhores locais para instalação de LCF, bem como a minimização da dimensão destes dispositivos.

II. DESCOORDENAÇÃO RELIGADOR-FUSÍVEL

A coordenação entre religadores e elos fusíveis é de extrema importância devido ao fato de permitir a seletividade da proteção e ser capaz de eliminar faltas temporárias. Essa coordenação é realizada analisando as correntes de falta no final do trecho protegido por esses dispositivos, e determinar

seu tempo de atuação através das curvas tempo x corrente. A inserção de fontes de GD causa a alteração da corrente sentida por esses dispositivos e consequentemente a má operação destes numa situação de falta. A Fig. 1 mostra a configuração tradicional de um sistema de proteção em redes de distribuição.

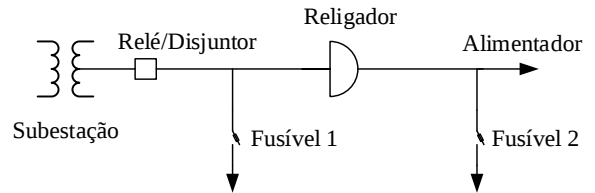


Fig. 1: Disposição de dispositivos de proteção em SDEE

Quando ocorre uma falta a jusante de um religador, este opera em sua curva rápida, buscando a eliminação de faltas temporárias. Caso a falta persista após o religamento, o fusível será responsável por isolar a falta permanente. Caso haja falha na atuação do fusível, a curva temporizada do religador fornece proteção de retaguarda. Com a inserção de fontes de GD, a contribuição desta para corrente de falta é somada à contribuição provinda da subestação, como mostra a Fig.2.

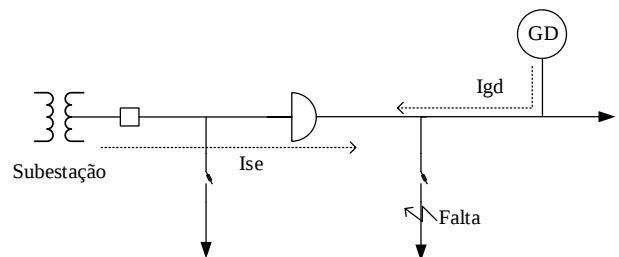


Fig.2: Contribuições para a corrente de falta

Essa contribuição extra para a corrente de falta é responsável pela alteração de operação e consequente descoordenação religador – fusível, como é mostrado no coordenograma da Fig. 3.

Com essa contribuição por parte da GD para a corrente de falta, a operação do fusível poderá ocorrer antes da atuação do religador na sua curva rápida, significando portanto a perda da coordenação entre estes.

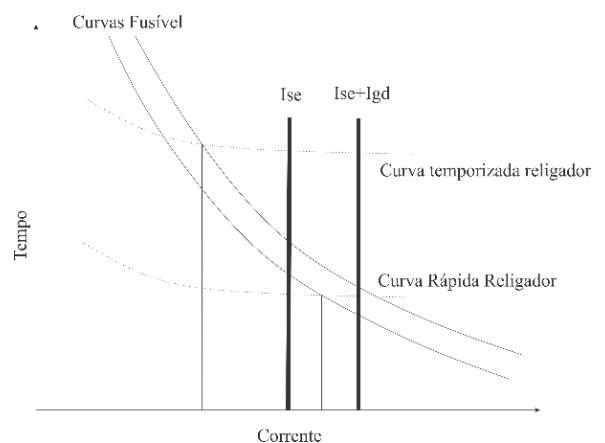


Fig.3: Coordenação religador – fusível

III. ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS

Particle Swarm Optimization (PSO) ou algoritmo por enxame de partículas é um método de busca estocástico inspirado pelo movimento coordenado de grupos de animais. A mudança na direção e velocidade de cada partícula individual resulta do efeito de influências cognitivas, sociais e estocásticas. O objetivo comum de todas as partículas é encontrar o local mais favorável dentro de um espaço de busca. PSO pode ser utilizado para resolver problemas da forma:

$$\min : f(x) \quad (1)$$

s.a:

$$A \cdot x \leq b \quad (2)$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq} \quad (3)$$

$$c(x) \leq 0 \quad (4)$$

$$c_{eq}(x) = 0 \quad (5)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (6)$$

Onde:

x , b , b_{eq} , lb e ub são vetores, e lb representa o limite inferior e ub o limite superior.

A e A_{eq} são matrizes. As funções $f(x)$, $c(x)$ e $c_{eq}(x)$ podem ser funções não lineares. A função de aptidão $f(x)$ quantifica o desempenho de x .

A formulação do PSO adotada nesse trabalho é mostrada em (7) e (8), onde são atualizadas as velocidades e posições das partículas, respectivamente.

$$v_i^{k+1} = \phi^k v_i^k + \alpha_1 [\gamma_{1,i} (P_i - x_i^k)] + \alpha_2 [\gamma_{2,i} (G - x_i^k)] \quad (7)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (8)$$

Nessa formulação, tem-se que:

x_i^k e v_i^k : Vetores que representam a posição e velocidade atuais da partícula i , na k -ésima geração.

P_i : Melhor posição pessoal de cada indivíduo i ;

G : Melhor posição global observada entre todas as partículas do enxame, até a geração atual;

$\gamma_{1,i}$ e $\gamma_{2,i}$: São valores uniformemente distribuídos no intervalo $[0,1]$;

α_1 e α_2 : São constantes de aceleração;

ϕ^k : Função de inércia com o intuito de proporcionar momentum às partículas.

A representação gráfica do PSO é mostrada na Fig. 4, em um espaço de busca bidimensional. A nova velocidade, v_i^{k+1} ,

é a soma do momento que tende a manter a partícula no seu curso atual. Esta é atraída no sentido do seu ótimo pessoal P e finalmente, há a atração de todo o enxame na direção do ótimo global G . A nova posição, x_i^{k+1} é o somatório da posição atual x_i^k e a velocidade v_i^{k+1} .

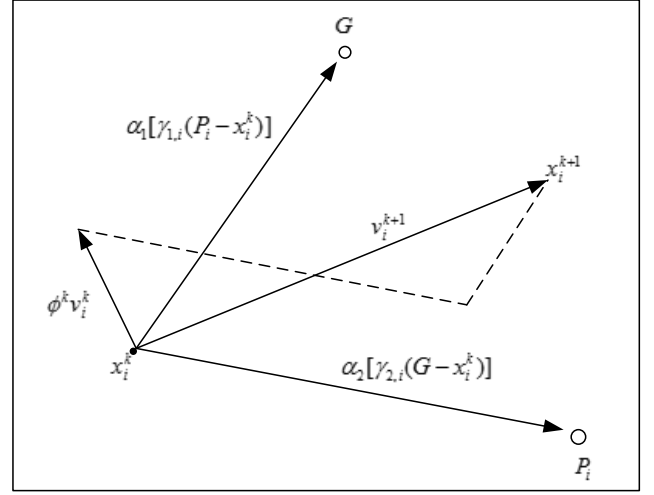


Fig.4: Representação gráfica do enxame de partículas

IV. METODOLOGIA PROPOSTA

Primeiramente é realizado o cálculo das correntes de curto-circuito nos nós do sistema. Esse cálculo preliminar deve ser realizado para funcionar como uma referência a ser utilizada no processo de otimização. Então são predefinidos a quantidade, locais de instalação e especificação das fontes de GD, que poderão ser conectadas em qualquer nó do sistema, compondo qualquer combinação. Considerando essa nova configuração, com as fontes de GD conectadas, é realizado um novo estudo de curto-circuito nos nós do sistema e assim obtidas as correntes de falta que estarão sujeitos os dispositivos de proteção previamente instalados.

A. Funções Objetivo

As função objetivo modeladas para o problema de alocação de LCF buscam minimizar a diferença entre as correntes de falta a que estão sujeitos os dispositivos de proteção sem considerar a instalação de fontes de GD e após a conexão das fontes de GD e também a dimensão do LCF, restringindo assim o custo associado

As funções objetivo são mostradas em (9) e (10).

$$\begin{aligned} \min f_1 = & \sum_p |I_{Rap-GD-p} - I_{Rap-semGD-p}| + \\ & + \sum_{i=1}^{n_{elos}} |I_{elo_i_GD} - I_{elo_i_semGD}| + \\ & + \sum_{n=1}^{n_{elos}} |I_{Temp-GD-n} - I_{Temp-semGD-n}| \end{aligned} \quad (9)$$

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^{n_{lcf}} (R_t + X_t) \quad (10)$$

Onde:

n_{elos} : Número de elos fusíveis instalados no sistema.

$I_{Rap-GD-p}$: Corrente para operação do religador em sua curva rápida para faltas à jusante do p-ésimo religador, considerando geração distribuída;

$I_{Rap-semGD-p}$: Corrente para operação do religador em sua curva rápida para faltas à jusante do p-ésimo religador, sem geração distribuída;

$I_{elo_i-semGD}$: Corrente de falta vista pelo elo fusível i devido uma falta à jusante do mesmo, sem geração distribuída;

I_{elo_i-GD} : Corrente de falta vista pelo elo fusível i devido uma falta à jusante do mesmo, considerando geração distribuída;

$I_{Temp-semGD-n}$: Corrente para operação do religador em sua curva temporizada para faltas à jusante do n-ésimo religador, sem geração distribuída;

$I_{Temp-GD-n}$: Corrente para operação do religador em sua curva temporizada para faltas à jusante do n-ésimo religador, considerando geração distribuída;

n_{lcf} : Número de limitadores de corrente de falta;

R_t e X_t : Resistência e reatância do t -ésimo LCF.

A função (9) busca minimizar as diferenças entre as correntes de falta com e sem contribuição de GD. Já a função (10) busca a minimização do custo associado dos limitadores, sendo esse representado por um custo fixo e custos dependentes da resistência e reatância necessários.

B. Restrições

As restrições impostas ao problema de alocação de LCF devem refletir características técnicas e econômicas. Essas são mostradas em (11), (12) e (13).

$$I_{i,GD} - I_{i,sem-GD} < Tol \quad (11)$$

$$X_{\min} \leq X_{lcf} \leq X_{\max} \quad (12)$$

$$R_{\min} \leq R_{lcf} \leq R_{\max} \quad (13)$$

Onde:

$I_{i,GD}$: Corrente na i -ésima seção do alimentador com a conexão da GD;

$I_{i,sem-GD}$: Corrente na i -ésima seção do alimentador antes da conexão da GD;

Tol : Tolerância limite para a diferença entre as correntes antes da conexão da GD e após a conexão da GD;

$X_{\min}$ e $X_{\max}$: Limites impostos à reatância do LCF (X_{lcf});

$R_{\min}$ e $R_{\max}$: Limites impostos à resistência do LCF (R_{lcf});

C. Funcionamento do Algoritmo de Enxame de Partículas Multiobjetivo

Para solucionar problemas multiobjetivo é necessário maximizar as soluções de Pareto (não-dominadas). No algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo, é necessário decidir como selecionar as partículas para dar preferência àquelas não-dominadas e como manter a diversidade do enxame [10]. A implementação do algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo é mostrado no fluxograma da Fig. 5.

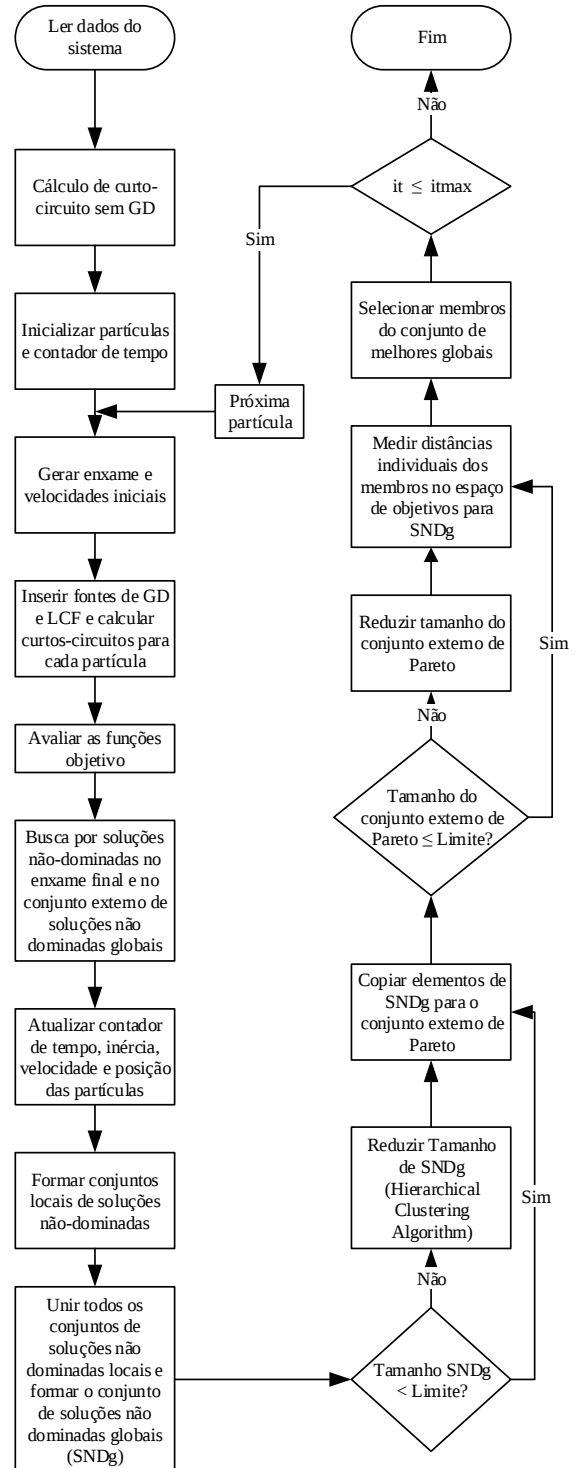


Fig. 5: Fluxograma do algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo

Após a execução do algoritmo, o ranking das 5 melhores soluções são simulados para verificação das correntes de curto-circuito após conexão com GD e respectiva validação do método proposto.

V. RESULTADOS

Para validar o método proposto, foi utilizado o sistema teste da Fig. 6 [12]. Os dados sobre as fontes de GD e parâmetros do algoritmo são mostrados na Tabela I. Na Tabela II são mostradas as correntes de falta, em p.u., a que estão sujeitos os dispositivos de proteção, para faltas à jusante dos elos fusíveis.

A alocação e dimensionamento dos LCF obtidos pelo método proposto são mostrados na Tabela III, e as alterações provocadas nas correntes de falta são mostradas na Tabela IV.

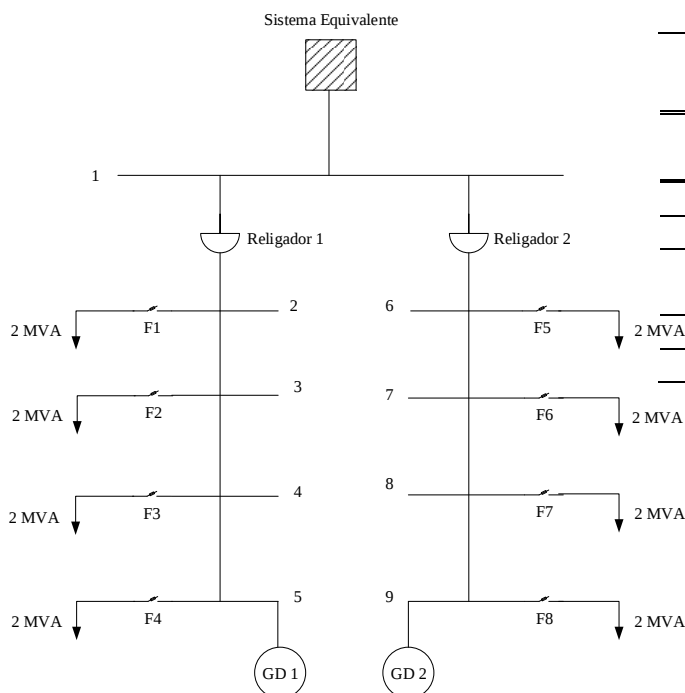


Fig. 6: Sistema Teste [12]

TABELA I. DADOS DO SISTEMA TESTE E SIMULAÇÃO

Dados do alimentador	$Z = 0,1529+j0,1406 \Omega/\text{km}$
Dados sistema equivalente	$S_{cc} = 500 \text{ MVA}$, $X/R = 6$
Transformador sistema equivalente	20 MVA, 115/12,47 kV, $X = 10\%$
Tensão base	12,47 kV
Reatância GD	9,67%
Transformador GD	5%, 12,47 kV/480 V
Máximo de iterações	1000
Máximo de Partículas	1000
Tolerância (Tol)	50 A
$X_{\min}$	0
$X_{\max}$	0,8 pu
$R_{\min}$	0
$R_{\max}$	1 pu

TABELA II. CORRENTES DE FALTA NOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO PARA FALTAS A JUSANTE DOS ELOS FUSÍVEIS, EM P.U.

Dispositivo	Ifalta sem GD	Ifalta com GD
I_{R1}	1,452	1,983
I_{R2}	1,433	1,963
I_{F1}	1,423	1,893
I_{F2}	1,321	2,103
I_{F3}	1,203	1,908
I_{F4}	1,122	2,363
I_{F5}	1,289	1,898
I_{F6}	1,236	2,035
I_{F7}	1,198	1,987
I_{F8}	1,131	2,348

TABELA III. CORRENTES DE FALTA NOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO PARA FALTAS A JUSANTE DOS ELOS FUSÍVEIS EM P.U..

Limitador de Corrente	Posição	Dimensionamento (p.u.)
LCF-1	GD 1	j0,48
LCF-2	GD 2	0,48+j0,32
LCF-3	Sistema Equivalente	0,1+j0,28
MVA LCF-4	3 – 4	0,52+j0,25
LCF-5	7 – 8	0,43+j0,56

TABELA IV. CORRENTES DE FALTA NOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO PARA FALTAS A JUSANTE DOS ELOS FUSÍVEIS EM P.U. COM LCF

Dispositivo	Ifalta com GD e LCF
I_{R1}	1,488
I_{R2}	1,491
I_{F1}	1,481
I_{F2}	1,346
I_{F3}	1,281
I_{F4}	1,183
I_{F5}	1,306
I_{F6}	1,241
I_{F7}	1,203
I_{F8}	1,150

VI. CONCLUSÃO

Foi apresentado neste trabalho uma abordagem multiobjetivo para solucionar o problema de descoordenação religador – fusível em sistemas de distribuição de energia elétrica. Com a utilização de um algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo, foi possível reduzir a diferença entre

as correntes de falta que sensibilizam os dispositivos de proteção, determinando os melhores locais para instalação de limitadores de corrente de falta. Outro objetivo considerado foi minimizar a dimensão desses dispositivos, o que acarretará também na redução do custo dos mesmos. O teste realizado mostrou a eficiência do método desenvolvido, que foi capaz de alocar os LCF, reduzindo a dimensão dos mesmos, de forma que a contribuição das fontes de GD para a corrente de falta não afetará a coordenação entre religadores e elos fusíveis.

VII. REFERÊNCIAS

- Begovic, M., Pregelj, A., Rohtagi, A., "Impact of renewable distributed generation on power systems", 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001;
- Morandi, A., "State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system", *Physica C*, n. 484, pp. 242 - 247, 2013;
- Tang, G., Iravani, M.R., "Application of a fault current limiter to minimize distributed generation impact on coordinated relay protection" International Conference on Power Systems Transients, Montreal, Canada, junho 2005;
- Brahma, S., Girgis, A., "Microprocessor-based reclosing to coordinate fuse and recloser in a system with high penetration of distributed generation", IEEE Power and Energy Society Winter Meeting, pp. 453 – 458, 2003;
- R.E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*. Vol. I. New York: Marcel Dekker, 2002;
- Pholborisut, N., Saksornchai, T., Eua-Arporn, B., "Evaluating the impact of distributed generation on protection system coordination using protection miscoordination index", 8th Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Tailândia, 17-19 maio 2011;
- Hussain, B., Sharkh, S.M., Hussain, S., Abusara, M. A., "An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distribution generation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, n. 2, Abril 2013;
- Lim Sung-Hun, Kim Jae-Chul, "Analysis on protection coordination of protective devices with a SFCL due to the application location of a dispersed generation in a power distribution system", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, n. 3, 2011;
- Cakal, G., Bagriyanik, F., Bagriyanik, M., "The effect of fault current limiters on distribution systems with wind turbine generators", International Journal of Renewable Energy Resources, Vol. 3, n. 1, 2013;
- Reyes-Sierra, M., Coello, C., "Multi-objective particle swarm optimizers: a survey of the state-of-the-art", International Journal of Computer Intelligence, Vol. 2, n. 3, pp. 287 – 308, 2005;
- Cheng, M., Zhang, C., Luo, C., "Adaptive evolutionary multi-objective particle swarm optimization for economic dispatch with non smooth cost functions", Control Decis, Vol. 24, n.12, pp. 1851 – 1855, 2009;
- Zieneldin, H., Xiao, W., "Optimal fault current limiter sizing for distribution systems with DG", IEEE power & society general meeting, pp. 1 – 5, 2011.