

Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Radial Electrical Distribution Networks

F. Freitas, C. Donadel, M. C , and E. Silva Jr.

Abstract—Short-circuits can cause irreversible damage to electrical system, pose a risk to the lives of humans and animals, and can set off fires on any surface in contact with the conductors. To reduce the time in which the electrical installation remains under the effects of a short-circuit, protection devices are necessary. One of the most important functions of these devices is the time overcurrent protection. The main objective of this work is to propose a solution for an automatic parameterization of the time overcurrent protection in radial power distribution networks. The proposed method uses a genetic algorithm and explores the different kinds of curves presented in each protection device. The proposed method was tested in a real electrical distribution network and obtained feasible and good solutions for the coordination problem.

Index Terms—Genetic algorithm, Optimization methods, Overcurrent relays, Protective relaying.

I. INTRODUÇÃO

Todas as instala es el tricas, sejam elas residenciais, industriais ou de transmissão de pot ncia estão sujeitas a distúrbios em seu estado de opera o normal, sendo o curto-circuito um dos mais comuns. Curtos-circuitos podem ocorrer em sistemas de potência quando há falha de isolamento causada por descargas atmosféricas, surtos em comuta es, erosão ou outras causas mecânicas [1].

Os curtos-circuitos podem causar danos irreversíveis aos dispositivos do sistema elétrico, oferecer risco   vida das pessoas e animais e desencadear incêndios em qualquer superfície que esteja em contato com o caminho de fluxo de corrente. Para abreviar o tempo no qual a instala o elétrica permanece sob os efeitos do curto-circuito   necessário instalar equipamentos de prote o. Prote o   definida como a ciência, habilidade ou arte de aplicar e parametrizar dispositivos (por exemplo, relés e fusíveis) para prover a máxima sensibilidade a faltas e condi es indesejadas, evitando a sua atua o nas zonas permissíveis e/ou toleráveis. Estudar, projetar e configurar estes equipamentos de prote o   indispensável para a existência de qualquer sistema elétrico confiável [2].

O ajuste dos parâmetros dos equipamentos de prote o pode ser uma tarefa difícil pois envolve a análise conjunta de diversas características do circuito em questão.

Estabelecer a parametriza o de equipamentos de prote o   um desafio crescente para a análise de sistemas elétricos de potência (SEP), especialmente para as distribuidoras de energia elétrica, nas quais   comum encontrarmos milhares desses dispositivos. Avaliar cada possibilidade se torna um problema de complexidade exponencial   medida que novas prote es são adicionadas – principalmente em série – visto que estudar uma prote o significa também estudar todas as outras a montante e a jusante desta. Desta forma, a própria automatiza o da parametriza o torna-se necessária para o crescimento sustentável deste processo. O maior problema a ser resolvido   o ajuste desses parâmetros de forma segura, que esteja de acordo com as filosofias de prote o e que seja mais rápido do que as abordagens convencionais, comumente baseadas na abordagem tentativa/erro. Há ainda ferramentas comerciais que tratam deste objetivo [3, 4].

A prote o mais utilizada contra curtos-circuitos   a prote o de sobrecorrente. A prote o de sobrecorrente responde   corrente que flui no elemento do sistema que se quer proteger, quando o valor e a dura o dessa corrente superam os valores previamente ajustados [5]. Na literatura, diversas propostas de otimiza o do processo de determina o dos parâmetros da prote o de sobrecorrente podem ser encontradas. Em geral, os autores propõem o uso de meta-heurísticas para solucionar o problema, podendo-se exemplificar: *Cuckoo-Linear Optimization Algorithm* [6], Programa o Linear [7, 8], Programa o Não Linear [9, 10], *Symbiotic Organism Search Optimisation* [11], Algoritmo Genético [12-16], *Biogeography-Based Optimization Algorithm* [17], *Local Fit Method* [18], Col nia de Formigas [19], *Gravitational Search Algorithm* [20], Col nia de Vaga-lumes [21, 22], Decomposi o de *Benders* Generalizado [23], Otimiza o por Enxame de Partículas [24, 25] e *Improved Group Search Optimization algorithm* [26]. Tais abordagens podem explorar ainda condi es específicas do sistema, tais como o uso de limitadores de corrente [6, 14], a prote o direcional [6, 9-12, 15-19, 23-26] e a presença de unidades de gera o distribuída [9, 14, 20].

Entretanto, os trabalhos citados consideram um mesmo tipo de curva característica do dispositivo de prote o em todo o processo de otimiza o (por exemplo, utilizando-se apenas curvas do tipo normalmente inversa), não explorando a possibilidade de se utilizar diferentes tipos de curvas para cada dispositivo de prote o. Desta forma, este artigo propõe uma metodologia capaz de estimar, calcular e avaliar a seletividade de ajustes de prote o de sobrecorrente temporizada de forma automática e otimizada, aplicada a sistemas radiais, utilizando como método de otimiza o o algoritmo genético, e que seja capaz com considerar diferentes tipos de curvas características

F. K. D. Freitas, EDP Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, felipe.kuster@edpbr.com.br.

C. B. Donadel, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, cdonadel@ifes.edu.br.

M. A. C , Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, marcio@ifes.edu.br.

E. B. D. Silva, Junior, EDP Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, edson.silva.jr@edpbr.com.br.

em cada dispositivo de proteção, explorando ainda a otimização conjunta entre proteção de sobrecorrente de fase e neutro.

O restante deste artigo está dividido da seguinte forma: na Seção II é apresentada e detalhada a metodologia proposta; na Seção III são apresentados os resultados aplicados a um estudo de caso (sistema real de distribuição de energia elétrica), bem como a avaliação dos resultados; por fim, na Seção IV, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Escopo do Trabalho

O cenário da aplicação deste trabalho foi o das redes de distribuição de energia elétrica de média tensão estritamente urbanas, nas quais as correntes apresentam baixo nível de desequilíbrio [27]. As redes rurais são fortemente desequilibradas devido à predominância de redes monofásicas, estando fora do escopo deste trabalho.

Os equipamentos de proteção (relés/fusíveis) alvos desse estudo fornecem uma ampla gama de curvas de proteção. Visando a exploração de diferentes tipos de curvas, neste estudo foram definidos três tipos de curvas possíveis, com características muito distintas: as IEC – NI (normalmente inversa); IEC – MI (muito inversa); e IEC – EI (extremamente inversa).

A evolução das tecnologias microeletrônicas e de telecomunicações afetaram os setores de distribuição elétrica. Os religadores de linha deixaram de ser dispositivos puramente eletromecânicos e passaram a contar com complexos conjuntos de proteção, medição e telecomunicação. Adicionando-se o fato de que cada saída (*bay*) de alimentador também conta com um religador ou relé de proteção, o universo de equipamentos com ajustes chega a números superiores a 10³ em uma única distribuidora.

A manutenção das condições operativas ótimas desses dispositivos está associada ao constante planejamento das cargas e topologias da rede que terá como resultado um estudo de proteção que deverá estabelecer a coordenação das proteções temporizadas de sobrecorrente. No escopo deste trabalho, cada estudo de proteção conta com pelo menos um conjunto de dois ajustes: um ajuste de fase e um ajuste de neutro.

Tendo em vista o sucesso das técnicas não-lineares na solução mais abrangente do problema de coordenação, o sistema de coordenação automática implementou um algoritmo genético. Este projeto difere-se dos demais pela forma heterogênea de organização das estruturas genéticas e pelas mudanças na função objetivo que visam garantir coordenação em todos os pontos do intervalo de curto-circuito.

B. Obtenção dos Parâmetros de Entrada

Tendo em vista a parametrização da proteção, foi necessário obter alguns parâmetros de entrada: a capacidade nominal dos cabos, a topologia do circuito e as correntes de curto-circuito monofásico e trifásico. Os dois primeiros foram obtidos automaticamente utilizando-se o banco de dados da distribuidora e ambos foram utilizados para definir as correntes de *pickup*. As correntes de curto-circuito foram parâmetros de entrada manual, uma vez que estas dependem de cálculos que estão fora do escopo deste trabalho. A topologia e as correntes

de curto-circuito foram utilizadas para calcular os outros parâmetros da curva (tipo, *dial*, tempo mínimo de atuação ou tempo adicional).

Obter os dados do sistema da distribuidora e interpretá-los num sistema próprio foi o primeiro passo em direção ao cálculo automático da proteção. Para organizá-los, utilizou-se uma linguagem de programação orientada a objeto e um banco de dados próprio.

Abstraindo o percurso físico da corrente elétrica na rede, pode-se obter a topologia do sistema como uma lista de dispositivos. Uma boa representação de dados para essa topologia é uma árvore (não-binária) onde cada dispositivo tem um pai e uma lista de filhos, que pode estar vazia ou não. O processo se resume em carregar todos os dispositivos do alimentador de forma recursiva. Cada vez que um novo dispositivo é carregado, todos os possíveis dispositivos a jusante deste são identificados. Estes, por sua vez, repetem o processo recursivamente até o término da rede. A Fig. 1 mostra o resultado da aplicação deste algoritmo para o alimentador denominado BFE13, sistema real utilizado como estudo de caso neste trabalho. Todos os equipamentos mostrados na Fig. 1 são dispositivos cujos nomes são padronizados e seguem o seguinte formato:

AAABBCCCCCCC9

Onde:

- AAA código do município onde o dispositivo está
- BB código do tipo do dispositivo (RL = religador, BF = base fusível, CF = chave faca)
- CCCCCCC código único de numeração do dispositivo
- 9 constante

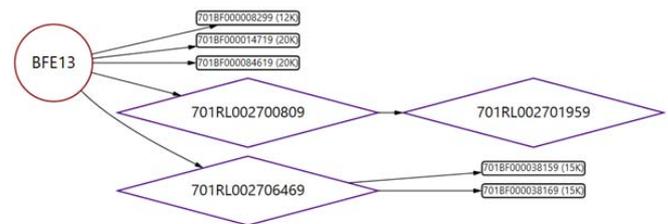


Fig. 1. Topologia de Proteção do alimentador BFE13.

Assumindo que as correntes de curto-circuito são entradas manuais do sistema, a última informação necessária para iniciar um estudo de proteção é a capacidade do cabo em cada um dos dispositivos. Essa propriedade foi obtida através da união entre a tabela de chaves, cabos e trechos. Cada dispositivo (ou chave) está instalada num trecho que, por sua vez, possui um tipo de cabo. A capacidade do cabo, portanto, é uma propriedade do objeto dispositivo.

C. Coordenação Automática da Proteção de Sobrecorrente

Um estudo de proteção exige alguns critérios. A corrente de *pickup* de fase foi definida como sendo a maior possível, limitada à capacidade do cabo. Para a corrente de *pickup* de neutro a literatura define correntes da ordem de 0,2 a 0,3 vezes

a corrente nominal [28]. Utilizando-se o mínimo desse intervalo e sendo I_n , I_{pf} e I_{pn} as correntes nominal, de *pickup* de fase e de *pickup* de neutro, respectivamente, definiu-se que:

$$I_{pf} = I_n \quad (1)$$

$$I_{pn} = 0,2 * I_{pf} \quad (2)$$

Os outros parâmetros são apresentados na Tabela I. Ao pensar na automatização do processo é fácil perceber que um método de força bruta para verificar todas as possibilidades de ajustes é impraticável pois o número de possíveis combinações cresce de forma fatorial. Os parâmetros de tempo mínimo e tempo adicional fazem a proteção atuar de forma mais lenta e geralmente são aplicados quando deseja-se realizar coordenação com elos fusíveis para permitir a atuação do elo em altas correntes de curto-circuito.

TABELA I
PARÂMETROS DE DEFINIÇÃO DE CURVAS

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Varição mínima
Curva (-)	Normal inversa	Extremamente inversa	-
<i>Pickup</i> (A)	1	Capacidade do cabo	1
Dial (-)	0,1	2	0,01
Tempo mínimo (s)	0	0	-
Tempo adicional (s)	0	0	-

Os algoritmos genéticos mais simples representam cada cromossomo como um vetor de *bits*. Realizar operações de crossover e de mutação nessas condições se torna muito simples pois é suficiente inverter um dos *bits*. Outras aproximações envolvem a utilização de valores reais ou de ponto flutuante ao invés do vetor de *bits* para representar os cromossomos. Uma expansão dos parâmetros acessíveis dentro do algoritmo genético pode ser feita através de uma implementação de soluções mais complexas, concatenando vários tipos de variáveis codificadas heterogeneamente em um cromossomo [29].

O modelo proposto é uma boa abordagem para um problema de coordenação de proteção que envolve variáveis inteiras e de ponto flutuante. Os parâmetros na Tabela I foram abstraídos como genes, enquanto um cromossomo foi definido como um novo objeto chamado de nível de proteção que, por sua vez, foi composto por um dispositivo de proteção e pelo seu nível L_n na cadeia de proteção. Cada relé forma um nível de proteção (ou cromossomo). O primeiro dispositivo de proteção é a saída do alimentador (por exemplo, o dispositivo denominado BFE13 na Fig. 1), cujo nível de proteção foi definido como 0. Ela será a proteção de retaguarda de todo o circuito. Aos religadores a jusante (701RL002700809 e 701RL002706469) foi atribuído o nível de proteção 1 e assim por diante. O próximo nível de abstração do algoritmo é uma árvore genética, que será um indivíduo da população. Esse modelo foi escolhido por dois motivos: a semelhança da cadeia de proteção com uma estrutura de árvore e o fato da função objetivo depender da proteção montante (caso $L_n > 0$) ou das proteções jusantes (caso $L_n = 0$) para avaliar se o intervalo de mínimo para coordenação (Δt_m) é respeitado. Por fim, definiu-se um ramal de proteção

como sendo a cadeia de todas as proteções em série desde a saída da subestação até um dispositivo escolhido [30].

Cabe notar que a árvore genética é uma estrutura de dados heterogênea, composta apenas de objetos do tipo nível de proteção. Cada nível de proteção, por sua vez, implementa um conjunto de ajustes (os genes), que são grandezas de ponto flutuante. A árvore genética é o componente principal do sistema, pois é o indivíduo do algoritmo genético e é nela que foram implementadas as funções características deste método de otimização.

Ao falar-se em coordenação de proteção de sobrecorrente tem-se em mente ao menos um par de dispositivos de proteção. As características intrínsecas de um nível de proteção são necessárias, mas não suficientes para encontrar o índice de adaptação de forma determinística. Por exemplo, o nível de proteção de um religador de linha com $L_n = 1$ pode ter qualidades de coordenação distintas em diferentes gerações mesmo se os seus ajustes permanecerem iguais. Isso se deve ao fato de que o ajuste da proteção a montante ($L_n = 0$) interfere diretamente no intervalo de coordenação.

Outra medida que influencia na qualidade de um ajuste de proteção é o tempo total decorrido até a atuação do relé. Deseja-se que a proteção atue o mais rápido possível, preservadas as condições de coordenação entre os dispositivos a jusante e a montante.

Com base nestes aspectos, foi definida a função objetivo $f(x)$ a ser otimizada neste trabalho – (3). A Equação (3) tem duas componentes: uma devida ao tempo de atuação e outra devida à coordenação. O primeiro termo (que multiplica C_1) considera o tempo de atuação da proteção enquanto o segundo (que multiplica C_2) faz com que qualquer intervalo de coordenação menor que o intervalo de coordenação mínimo seja multiplicado por um ganho muito alto, ampliando a parcela que caracteriza a descoordenação na função objetivo. Os valores de C_1 e C_2 foram definidos iguais a 1 e 20.000, respectivamente, com base na literatura apresentada em [31].

Caso o relé esteja na saída da subestação (*bay*) definiu-se que o seu índice de coordenação deverá ser a média do somatório das funções objetivo de cada religador à jusante. Isso se dá uma vez que a proteção de *bay* será a primeira proteção avaliada no sistema e o seu nível de proteção de retaguarda é desconhecido, pois depende de se conhecer o sistema de submissão/transmissão. Desta forma, quanto maior for $f(x)$, pior será o ajuste proposto. O problema de otimização se resume, então, em minimizar o valor de $f(x)$.

$$f(x) = \sum_{r=1}^N \left\{ C_1 \left[t_f(I_{ccf})^2 + t_n(I_{ccn})^2 \right] + C_2 * \left[\Delta t_{rf}^2 * (\Delta t_{rf} - |\Delta t_{rf}|)^2 + \Delta t_{rn}^2 * (\Delta t_{rn} - |\Delta t_{rn}|)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

Onde:

Δt_{rf} Desvio mínimo do intervalo de coordenação no relé de fase.

Δt_{rn} Desvio mínimo do intervalo de coordenação no relé de neutro.

Δt_m Intervalo mínimo de coordenação.

$t_f(I_{ccf})$ Tempo de atuação de fase na corrente de curto-circuito trifásico.

$t_n(I_{ccn})$	Tempo de atuação de neutro na corrente de curto-circuito monofásico.
C_1	Peso da componente de tempo de atuação. Valor adotado = 1.
C_2	Peso da componente de descoordenação. Valor adotado = 20000.
N	Quantidade de relés existentes.
x	Árvore de proteção.
t_p	Tempo de atuação da proteção de retaguarda.
t_f	Tempo de atuação da proteção principal.

D. Aplicação dos Operadores Genéticos

A aplicação dos operadores genéticos é apresentada em 5 etapas:

1) *Criação de uma nova população*: Nesta etapa, um número N de indivíduos com r cromossomos é adicionado a uma lista, onde r é o número de relés.

2) *Ordenação*: A ordenação é um processo que se repete toda vez que uma nova população é gerada. Seja P um conjunto que contenha todos os níveis de proteção de uma árvore de proteção x cujo índice de adaptação $f(x)$ é dado por (3), define-se uma nova função chamada de índice de coordenação para avaliar o desempenho individual de cada cromossomo, que é a influência individual de cada nível de proteção em $f(x)$.

A avaliação da proteção é feita variando-se a corrente no intervalo entre corrente de *pickup* e a corrente de curto-circuito. Destaca-se que, para os ajustes de neutro, não apenas as curvas de neutro devem ser analisadas, mas também as de fase. É correto assumir que em caso de uma falta monofásica a corrente circulante no neutro também será medida pelo transformador de corrente (TC) da linha envolvida na falta. Portanto, caso o ajuste de fase seja mais rápido do que o ajuste de neutro para determinada corrente, a proteção de fase irá atuar.

3) *Seleção*: o processo de seleção nada mais é do que a escolha de dois parentes no universo da população. A probabilidade que um indivíduo tem de ser escolhido para reproduzir depende diretamente da sua posição na ordenação. Se a primeira posição do vetor que representa o indivíduo com melhor adaptação tiver o índice $d = 0$, tem-se que:

$$P(d) = \frac{N_p - d}{N_p * \left(\frac{N_p + 1}{2}\right)} \quad (4)$$

Onde:

$P(d)$	Probabilidade de escolha de um indivíduo em função de sua posição na ordenação.
N_p	Tamanho da população.
d	Posição de ordenação.

Cada indivíduo é adicionado ao vetor de possibilidades de forma inversamente proporcional à sua posição. Para uma população de 50 indivíduos ($N = 50$), o melhor indivíduo da geração anterior terá índice $d = 0$. Portanto, será adicionado 50 vezes ao vetor. O segundo melhor indivíduo terá índice $d = 1$ e será adicionado 49 vezes. O termo no denominador de (4) é uma progressão aritmética de 1 até o número de indivíduos,

que exprime o número total de indivíduos que foram adicionados ao vetor.

4) *Crossover*: O *crossover*, ou recombinação, talvez seja o operador genético mais marcante dos algoritmos genéticos. Em [30], a recombinação em um ponto é a forma mais simples de transmitir as características dos progenitores. De acordo com a autora, uma única posição de recombinação é escolhida aleatoriamente e as duas partes formadas após essa posição de divisão são permutadas para formar dois novos filhos. Essa técnica é utilizada para o cálculo da coordenação a fim de trocar cromossomos do mesmo nível de proteção entre os indivíduos, uma vez que não faz sentido atribuir níveis de proteção a localidades diferentes da sua posição natural pois as correntes de *pickup* poderiam ficar incompatíveis com a capacidade do equipamento. A Fig. 2 mostra o processo de troca de cromossomos entre os níveis de proteção (relés) da Fig. 1. Uma “régua” é utilizada para dividir os cromossomos do indivíduo laranja e do indivíduo azul. No caso da Fig. 2, a divisão é feita no meio dos cromossomos e cada um dos novos indivíduos receberá a metade das características de cada pai.

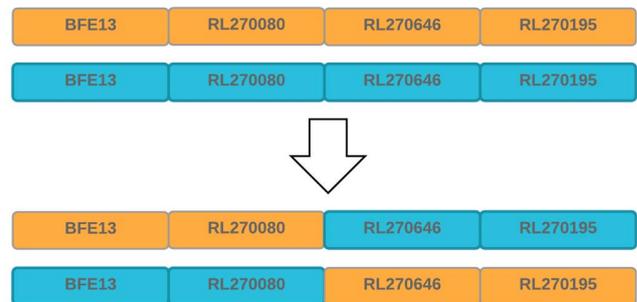


Fig. 2. Troca de cromossomos entre indivíduos usando a abstração de proteção.

5) *Mutação*: O objetivo do operador genético de mutação é manter a diversidade das soluções, sendo aplicado a alguns descendentes criados através das recombinações [32]. Em [33] a mutação é definida como o segundo protagonista dos algoritmos genéticos, que funciona inserindo perturbações nas soluções de forma aleatória. De forma genérica, a mutação deve obedecer a três princípios: a primeira necessidade é a acessibilidade, onde todos os elementos mutáveis (cromossomos, genes) devem ser acessíveis de qualquer parte da solução. O segundo princípio de projeto diz que a mutação deve ser imparcial. Ou seja, ela não deve influenciar no direcionamento da solução de forma alguma que não seja aleatória, a não ser que o problema imponha restrições. A terceira regra a ser seguida é a escalabilidade. O ruído adicionado às variáveis que controlam o índice de adaptação deve ter a sua intensidade bem distribuída dentro do intervalo de possibilidades [33].

Nos cálculos de coordenação da proteção de sobrecorrente, atende-se à primeira necessidade por meio da implementação da solução em uma linguagem orientada a objetos. Todos os elementos da rede são acessíveis no contexto da solução, desde que dentro do escopo. O escopo da população de proteção abrange todas as árvores de proteção, que por sua vez englobam todos os níveis de proteção e seus respectivos ajustes de proteção. Sendo assim, a partir do objeto população de

proteção, é possível acessar qualquer ajuste de proteção de qualquer elemento da geração atual de proteção. Os elementos das gerações passadas são descartados sempre que não estiverem entre os melhores.

Para o problema estudado, o segundo princípio deve ser seguido com restrições. Analisando-se (5), que fornece o tempo de operação de um relé dados seus parâmetros, percebe-se que quanto maior for o *dial* de uma curva, maior será também o tempo de operação. Os equipamentos de proteção costumam fornecer equipamentos com amplitudes de variação de *dial* entre 0,01 a 15,0 [34]. Por esse motivo, é interessante limitar os valores a um intervalo menor.

$$t(I) = \left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^\alpha - 1} + C \right) * Dial \quad (5)$$

Onde:

- k, α e C Constantes que dependem do tipo de curva utilizada.
- I Corrente de curto-circuito.
- $t(I)$ Tempo de atuação em função da corrente de curto-circuito.
- $Dial$ Constante de tempo selecionada.
- I_p Corrente de *pick-up*.

As formas mais comuns de prover escalabilidade da solução são através de uma distribuição Gaussiana [30, 33]. Seja uma variável X um número real que compõe um índice de adaptação, a escalabilidade é provida por (6), onde $N(0,1)$ é a função de distribuição Gaussiana normalizada e δ é a taxa de mutação.

$$X' = X + \delta * N(0,1) \quad (6)$$

Segundo Kramer [33], a distribuição Gaussiana é máxima na origem. Portanto, a maior probabilidade é de que a solução não mude, ou que se altere muito pouco. A proposta de organização da rede proteção em árvore permite a aplicação do operador de mutação em dois níveis distintos:

1) *Operador de Mutação em Nível de Proteção*: é aplicado em uma das soluções do *crossover* que ainda não foram adicionadas à população. Um nível de proteção é escolhido aleatoriamente e seus genes (curvas de fase e neutro) são criados novamente de forma aleatória.

2) *Operador de Mutação em Ajuste*: é uma pequena variação (ou “ajuste fino”) em uma das curvas características do dispositivo de proteção de fase ou de neutro de um nível de proteção de qualquer uma das árvores de proteção que ainda não foram adicionadas à população. Apenas um dos parâmetros da curva é alterado a cada aplicação. O ajuste fino pode ser feito de forma aleatória ou de acordo com a distribuição Gaussiana.

E. Execução e Avaliação do Processo Evolutivo

A Tabela II apresenta as variáveis globais do sistema avaliado, que englobam os índices que permanecerão fixos ao longo da execução do algoritmo.

Os *dials* foram escolhidos tendo-se em vista a margem de ajuste dos relés. Os tempos mínimos de reposta (MRT) e os tempos adicionais foram zerados pois eles não apresentam

ganhos significativos em cenários que não consideram os elos fusíveis.

TABELA II
VARIÁVEIS GLOBAIS DO SISTEMA

Variável	Valor
Tempo de coordenação [s]	0,3
Dial mínimo [-]	0,1
Dial máximo [-]	2,0
MRT mínimo [-]	0,0
MRT máximo [-]	0,0
Tempo adicional mínimo [s]	0,0
Tempo adicional máximo [s]	0,0
Curvas possíveis [-]	IEC NI, IEC MI, IEC EI
Probabilidade de <i>crossover</i> [%]	50
Probabilidade de mutação severa [%]	33,34
Probabilidade de mutação fina [%]	20
Tamanho da população – inicial [-]	100
Tamanho da população – máximo [-]	100
Número de gerações [-]	50
Critério de parada [-]	Número de gerações

A probabilidade de *crossover* foi escolhida para atingir metade da população e as probabilidades de mutação foram distribuídas de forma que a soma de ambas esteja próxima da probabilidade de *crossover*. O número de gerações foi definido conforme recomendações da literatura [31]. O tamanho da população foi definido com base no compromisso custo computacional *versus* eficácia da solução proposta.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia desenvolvida foi aplicada a um estudo de caso, alimentador BFE13, descrito na Seção II. O tamanho da população foi variado entre 10 e 500 indivíduos. Para populações de tamanho reduzido (por exemplo, $N = 10$, com baixo esforço computacional), a convergência do algoritmo é fortemente prejudicada, uma vez que os valores obtidos para o índice de adaptação são bastante elevados. Entretanto, nota-se boa convergência do método proposto para tamanhos populacionais iguais ou superiores a 50 indivíduos, uma vez que os valores obtidos para o índice de adaptação são bastante reduzidos, após o processamento do método. Para garantir que o critério de compromisso custo computacional *versus* eficácia da solução proposta seja atendido, bem como reduzir os impactos causados pelo tamanho da população na solução estocástica, adotou-se neste estudo um tamanho populacional igual a 100 indivíduos.

A Tabela III mostra a evolução dos melhores índices de coordenação em função das sucessivas gerações, para um tamanho populacional de 100 indivíduos. A primeira geração tem o índice mais elevado da tabela, como era esperado. A base dos ajustes é criada de forma aleatória e passa pelos operadores genéticos. Trata-se de um índice muito elevado, que indica tempo de operações altíssimos ou a presença de descoordenações, ressaltando que essas últimas influenciam no índice de maneira mais significativa.

Na segunda geração, o índice é cerca de 1/60 do valor da primeira. Como deseja-se que o índice seja o menor possível, obteve-se uma melhora expressiva. Nessa etapa, as operações mais importantes são as recombinações, pois apenas os melhores indivíduos da geração anterior serão escolhidos. Após 5 gerações, o índice de adaptação é reduzido em 99,94% em relação à geração inicial. As próximas melhorias

nos ajustes subsequentes serão dadas principalmente pelas mutações. Algumas gerações depois de um novo indivíduo ser criado com as melhores características da população ele se tornará dominante e passará a se reproduzir mais vezes, aumentando também a chance de mutação. Espera-se que a maioria das mutações que acontecem tenham caráter destrutivo pois causam descoordenações. Esse processo se torna mais lento à medida que o índice de adaptação diminui, indicando uma convergência por variação percentual (o índice de adaptação varia apenas 0,06 pontos nas últimas 20 gerações).

TABELA III

EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE ADAPTAÇÃO – POPULAÇÃO DE 100 INDIVÍDUOS

Geração	Índice do melhor indivíduo	Geração	Índice do melhor indivíduo
1	4352,953524	20	1,95998653
2	72,67397899
3	72,67397899	30	0,808330279
4	18,37799175
5	2,526292218	40	0,749278422
...
10	2,526292218	50	0,749278422

As atuações de proteção são apresentadas na Fig. 3, na Fig. 4 e na Fig. 5. As curvas superiores em cada figura são as curvas da proteção de neutro e as inferiores são relativas à proteção de fase. Dentro de cada uma das curvas, o limite superior do gráfico é a curva da proteção de retaguarda (montante) e o limite inferior é a curva do relé principal. A região de coordenação está marcada na cor verde. Caso haja alguma descoordenação, ela estará marcada em vermelho. A inexistência de regiões vermelhas nos três gráficos significa que o ajuste está completamente coordenado. Os ajustes, os tempos mínimos do intervalo de coordenação e o tempo de atuação da proteção na corrente de curto-circuito franco estão resumidos na Tabela IV.

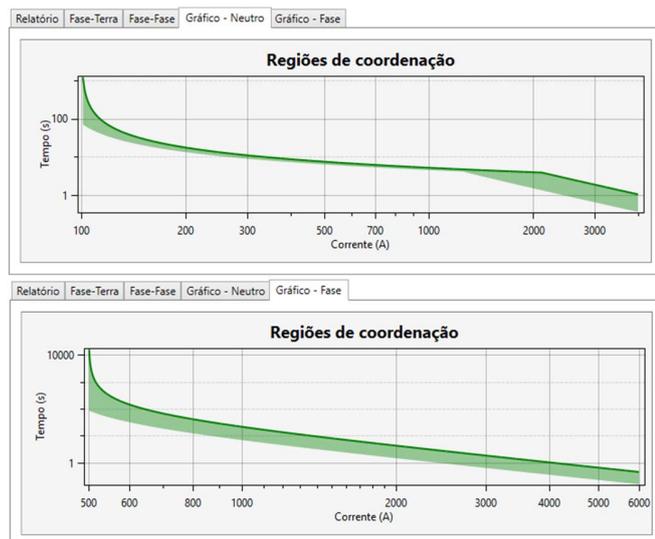


Fig. 3. Avaliação de coordenação entre os dispositivos BFE13 e 701RL002700809.

A partir da Tabela IV é possível confirmar que de fato os relés BFE13 e 701RL002700809 estão coordenados na região de menor diferença de tempo entre si. De fato, o intervalo de

coordenação de neutro mínimo é 0,607 s, o dobro do parâmetro de referência.

A metodologia proposta foi aplicada também a outros alimentadores, no âmbito da distribuidora local. Estes alimentadores possuem características distintas do alimentador utilizado neste trabalho como estudo de caso: até 4 dispositivos em série e correntes de curto-circuito reduzidas. Nestes casos, a metodologia proposta também se mostrou eficaz, levando à coordenação dos dispositivos. Entretanto, observou-se que, nestes casos, os índices de coordenação obtidos foram mais elevados que o obtido para o estudo de caso apresentado em detalhes neste trabalho. Este aumento no valor do índice de coordenação está intrinsecamente relacionado ao aumento do número de dispositivos em série e da redução dos valores de correntes de curto-circuito. Observou-se também que a convergência do método foi mais lenta que o observado para o alimentador BFE13.

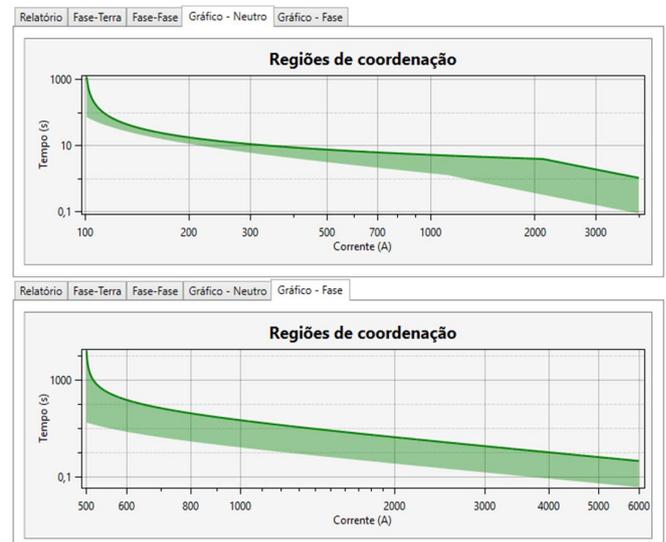


Fig. 4. Avaliação de coordenação entre os dispositivos BFE13 e 701RL002706469.

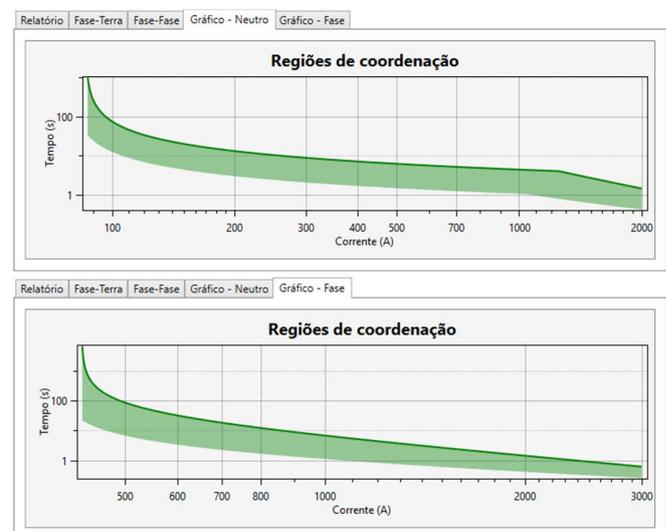


Fig. 5. Avaliação de coordenação entre os dispositivos 701RL002700809 e 701RL002701959.

TABELA IV
PARAMETRIZAÇÃO E CARACTERÍSTICA DAS CURVAS DE PROTEÇÃO

Relé	Tipo	Curva	Corrent e de pick-up [A]	dial	Δt [ms]	t [ms]
BFE13	F	IEC-EI	500	0,83	-	341
	N	IEC-SI	100	1,77	-	671
701RL002700809	F	IEC-EI	430	0,39	303	161
	N	IEC-SI	86	1,64	607	365
701RL002706469	F	IEC-EI	416	0,1	426	39
	N	IEC-VI	83	1,18	966	88
701RL002701959	F	IEC-VI	400	0,13	384	270
	N	IEC-SI	80	0,41	1073	439

F – Fase; N – Neutro

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma solução capaz de calcular automaticamente a parametrização de ajustes da proteção de sobrecorrente em alimentadores radiais foi implementada utilizando um algoritmo genético. Uma nova metodologia de abstração da rede elétrica em algoritmos genéticos foi desenvolvida, dividindo a rede em árvores e níveis de proteção. Também foram propostas mudanças às funções objetivo até então não encontradas na literatura. A metodologia proposta é capaz de considerar diferentes tipos de curvas características em cada dispositivo de proteção, explorando ainda a otimização conjunta entre proteção de sobrecorrente de fase e neutro.

Os resultados mostraram que, apesar do elevado número de iterações necessárias, o sistema opera com uma boa velocidade e tem potencial para otimizar o processo de estudo de proteção nas distribuidoras. Em nenhum ponto do algoritmo o critério básico de coordenação foi desrespeitado e os tempos de atuação de proteção sob as condições de curto-circuito impostas foram menores do que 0,7s. Sendo assim, a função objetivo do sistema atende as condições impostas. Os estudos de proteção por tentativa e erro, comuns nas distribuidoras de energia elétrica, podem tomar várias horas de trabalho enquanto a parametrização automática encontra uma solução em menos de 10 minutos, trazendo ganhos de otimização ao processo.

Por característica intrínseca, os algoritmos genéticos não retornam necessariamente a melhor solução possível para o problema, mas a solução gerada pelo algoritmo proposto atende a todos os critérios propostos como essenciais para uma boa atuação de proteção. Os índices de coordenação tendem a convergir ao longo da progressão das gerações.

Este trabalho deixa em aberto a oportunidade de desenvolvimento de sistemas autossuficientes de parametrização de proteção. A implementação da avaliação e coordenação de elos fusíveis ao algoritmo e a exploração de situações limites para o método (tais como sua aplicação em alimentadores rurais) trarão ganhos ainda maiores ao processo e devem ser tomadas como próximos passos. Essas aplicações, integradas aos cálculos de fluxo de potência, de curto-circuito e das medições dos sistemas supervisórios pode viabilizar uma solução geral de proteção. Esse cenário é muito interessante se confirmada a tendência de modernização e instalação de gerações distribuídas ao longo da rede, situação que merece destaque e atenção. Hoje, os ajustes de proteção são um fator limitante dessas instalações

pois são geralmente estáticos e não-sazonais, considerando apenas as principais fontes do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro e institucional do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) e da EDP Espírito Santo.

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power Systems: Analysis and Design*. Cengage Learning, 2010.
- [2] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*. CRC Press, 2007.
- [3] EATON, "CYMTCC - Protective Device Coordination," 1st ed, 2018.
- [4] PROTEASY, "NIX - Solução Inteligente para Estudos de Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica," 1ª ed, 2019.
- [5] J. Mamede Filho and D. R. Mamede, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, 1ª Edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [6] E. Dehghanpour, H. K. Karegar, R. Kheirollahi, and T. Soleymani, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Microgrids by Using Cuckoo-Linear Optimization Algorithm and Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1365-1375, 2018.
- [7] A. A. Kida and L. A. G. Pareja, "Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using Mixed Integer Linear Programming," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 3, pp. 1289-1295, 2016.
- [8] M. Lwin, J. Guo, N. B. Dimitrov, and S. Santoso, "Stochastic Optimization for Discrete Overcurrent Relay Tripping Characteristics and Coordination," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 732-740, 2019.
- [9] H. H. Zeineldin, H. M. Sharaf, D. K. Ibrahim, and E. E. A. El-Zahab, "Optimal Protection Coordination for Meshed Distribution Systems With DG Using Dual Setting Directional Over-Current Relays," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 115-123, 2015.
- [10] K. Saleh, H. Zeineldin, A. Al-Hinai, and E. El-Saadany, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using a new time-current-voltage characteristic," in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, pp. 1-1.
- [11] D. Saha, A. Datta, and P. Das, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in power systems using Symbiotic Organism Search Optimisation technique," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 11, pp. 2681-2688, 2016.
- [12] M. H. Marcolino, J. B. Leite, and J. R. S. Mantovani, "Optimal Coordination of Overcurrent Directional and Distance Relays in Meshed Networks Using Genetic Algorithm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2975-2982, 2015.
- [13] D. S. Alkaran, M. R. Vatani, M. J. Sanjari, G. B. Gharehpetian, and M. S. Naderi, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Networks by Using Fuzzy-Based GA Method," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3091-3101, 2018.
- [14] R. Mohammadi Chabanloo, M. Ghotbi Maleki, S. M. Mousavi Agah, and E. Mokhtarpour Habashi, "Comprehensive coordination of radial distribution network protection in the presence of synchronous distributed generation using fault current limiter," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 214-224, 2018.
- [15] F. B. Bottura, W. M. S. Bernardes, M. Oleskovicz, and E. N. Asada, "Setting directional overcurrent protection parameters using hybrid GA optimizer," *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 400-408, 2017.
- [16] M. Thakur and A. Kumar, "Optimal coordination of directional over current relays using a modified real coded genetic algorithm: A comparative study," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 484-495, 2016.
- [17] D. L. A. Albasri, A. R. Alrooomi, and J. H. Talaq, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Biogeography-Based Optimization Algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1810-1820, 2015.
- [18] D. L. A. Negrão and J. C. M. Vieira, "The Local Fit Method for Coordinating Directional Overcurrent Relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1464-1472, 2016.

- [19] M. Y. Shih, C. A. C. Salazar, and A. C. Enríquez, "Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimisation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 14, pp. 2040-2049, 2015.
- [20] J. M. Tripathi, Adhishree, and R. Krishan, "Optimal coordination of overcurrent relays using gravitational search algorithm with DG penetration," in *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, 2014, pp. 1-6.
- [21] A. Tjahjono *et al.*, "Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2575-2585, 2017.
- [22] S. S. Gokhale and V. S. Kale, "An application of a tent map initiated Chaotic Firefly algorithm for optimal overcurrent relay coordination," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 336-342, 2016.
- [23] H. Saberi and T. Amraee, "Coordination of directional over-current relays in active distribution networks using generalised benders decomposition," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 16, pp. 4078-4086, 2017.
- [24] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, and H. A. Talebi, "MOPSO/FDMT-based Pareto-optimal solution for coordination of overcurrent relays in interconnected networks and multi-DER microgrids," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 12, pp. 2871-2886, 2018.
- [25] N. Mancer, B. Mahdad, K. Srairi, M. Hamed, and B. Hadji, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using PSO-TVAC," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 1239-1247, 2015.
- [26] M. Alipour, S. Teimourzadeh, and H. Seyedi, "Improved group search optimization algorithm for coordination of directional overcurrent relays," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 23, pp. 40-49, 2015.
- [27] N. Kagan, C. C. B. d. Oliveira, and E. J. Robba, *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, 1ª Edição ed. São Paulo: Blucher, 2005.
- [28] GENERAL ELECTRIC, *Overcurrent Relaying: Conversion of Electromechanical (EM) setting to Digital setting*. General Electric, 2007.
- [29] M. Patrascu, A. F. Stancu, and F. Pop, "HELGA: a heterogeneous encoding lifelike genetic algorithm for population evolution modeling and simulation," *Soft Computing*, vol. 18, no. 12, pp. 2565-2576, 2014.
- [30] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: Mit Press, 1998.
- [31] R. Kheirollahi, R. Tahmasebifar, and E. Dehghanpour, "Genetic Algorithm Based Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using a Novel Objective Function," *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, vol. 7, no. 10, pp. 2403-2414, 2017.
- [32] H. S. Lopes, *Computação Evolucionária em Problemas de Engenharia*. Omnipax, 2011.
- [33] O. Kramer, *Genetic Algorithm Essentials: Studies in Computational Intelligence*. Springer, 2017.
- [34] S. ELECTRIC, "Functions Sepam series 80: Protection Tripping Curves," Paris, 2007.



Clainer Bravin Donadel tornou-se Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Espírito Santo em 2005, Mestre em Engenharia Elétrica em 2010 e Doutor em Engenharia Elétrica em 2015 pela mesma Universidade. É Professor do Instituto Federal do Espírito Santo, tendo como áreas de interesse perdas de energia elétrica, planejamento técnico de sistemas elétricos, *Smart Grids* e microrredes.



Márcio Almeida Có Nasceu em Vitória - ES, em 1968. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) em 1990, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1993 e doutor em Engenharia Elétrica também pela Ufes em 2003. É professor Titular do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Suas áreas de interesse de pesquisa incluem Eficiência Energética, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Conversores Estáticos e Educação em Engenharia. É membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP).



Edson Barbosa da Silva Jr Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (1998) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (2003). Atualmente é gerente da área de Sistemas de Controle na EDP Espírito Santo. Possui experiência em processos de Operação, Automação, Controle e Telecomunicações em Redes de Distribuição, e interesse em Sistemas de Proteção, Automação e Redes Neurais.



Felipe Kuster de Freitas Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (2018). Atualmente é Engenheiro de Controle, Automação e Telecomunicações na EDP Espírito Santo.