

Coordenação Ótima de Relés Direcionais de Sobrecorrente e Validação no Domínio do Tempo com ATP-EMTP

Wellington Maycon S. Bernardes, Antonio E. C. Momesso e Eduardo Nobuhiro Asada
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de São Paulo, USP
{wellingtonmaycon, antonio.momesso, easada}@usp.br

Resumo—Este trabalho propõe minimizar o tempo de operação dos dispositivos de proteção utilizando a meta-heurística *Discrete Particle Swarm Optimization* e depois validá-la, através de um modelo proposto de relé direcional de sobrecorrente no domínio do tempo, com simulações utilizando ATP-EMTP. A coordenação da proteção usando meta-heurísticas mitiga os defeitos ocasionados por um curto-circuito em uma linha de transmissão de forma otimizada e eficiente. Testes realizados com parte do sistema elétrico brasileiro mostraram-se eficientes considerando-se que as simulações no domínio do tempo atestaram a atuação correta dos dispositivos de proteção investigados neste artigo com o atendimento das restrições de operação impostas.

Palavras-chave—ATP-EMTP, relé direcional de sobrecorrente, inteligência computacional, linguagem MODELS, meta-heurística, Particle Swarm Optimization, coordenação de relés.

I. INTRODUÇÃO

SISTEMAS elétricos de potência malhados fornecem maior confiabilidade e melhor continuidade de serviços se comparados com sistemas puramente radiais, permitindo o redirecionamento do serviço no caso de alguma falha. Uma dificuldade ao ajustar os relés de sobrecorrente em circuitos malhados surge quando os geradores estão dispostos em várias subestações em torno da malha. Adicionalmente, o problema se torna mais desafiador quando o circuito de uma malha faz parte do segmento de outras malhas. Dependendo do ponto de ocorrência da falta, a corrente de curto-circuito pode fluir na direção direta ou reversa [1]. A bidirecionalidade da corrente de falta no Sistema Elétrico de Potência (SEP) também pode ser causada por faltas em alimentadores paralelos. Em adição, mudanças eventuais na geração de energia elétrica devido a disponibilidade intermitente afetam a seletividade, aumentando a probabilidade de *trip* indesejado. Essas complicações podem ser resolvidas com a utilização de Relés Direcionais de Sobrecorrente (RDSs), que são essenciais na mitigação de elevadas correntes de curto-circuito em circuitos malhados.

Garantir que um RDS atue devidamente em um menor tempo possível, e caso esse falhe, outros em sua retaguarda possam atuar respeitando uma certa margem de segurança, é um assunto atualmente em discussão. Na literatura é comum verificar o emprego de métodos clássicos, como Programação Não Linear (PNL) e Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) [2] utilizando programas como *General Algebraic Modeling System (GAMS)* e *MATLAB® (The MathWorks, Inc)*, e meta-heurísticas tais como Otimização por Colônia de

Formigas (OCF) [3], Algoritmo Genético (AG) [4], *Particle Swarm Optimization (PSO)* [5], [6], *Seeker Algorithm* [7], e outros [8]. Devido ao seu mecanismo de busca exploratória, a última classe tem obtido sucesso na obtenção de soluções de alta qualidade.

Todavia, os trabalhos científicos não abordam amplamente uma análise no domínio do tempo dos resultados encontrados pelos otimizadores. O acionamento em cascata de cada relé de retaguarda pode ser notado à medida que os disjuntores nos circuitos vão sendo abertos gradativamente. *Alternative Transients Program - The Electromagnetic Transients Program (ATP-EMTP)*, um programa universal para simulação digital de fenômenos transitórios, pode ser usado com o intuito de avaliar melhor o comportamento do tempo de operação dos dispositivos de proteção envolvidos. A versão gráfica mais recente desse *software* (ATPDraw 6.0) possui vários modelos de relés de proteção, tais como o de sobrecorrente, distância, diferencial e sobre/sub tensão/frequência [9], mas, infelizmente, o RDS não foi contemplado em sua base de dados. Assim, usando a linguagem MODELS, este trabalho também visa a criação de um modelo do RDS. As simulações foram realizadas em parte de um SEP real e seus relés são coordenados através do método *Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO)*. Os parâmetros obtidos a partir desse otimizador foram introduzidos nos relés modelados no ATP-EMTP para a validação dos resultados no domínio do tempo.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II mostra o princípio de funcionamento dos RDSs. A Seção III descreve a formulação da coordenação dos RDSs como um problema de otimização e o mecanismo do DPSO. Na Seção IV é apresentada de forma abrangente a lógica de programação utilizada na modelagem do RDS no ATP-EMTP. A Seção V discute os resultados obtidos a partir de um SEP real. Finalmente, algumas conclusões são realizadas na Seção VI.

II. RELÉS DIRECIONAIS DE SOBRECORRENTE

Os RDSs são dotados pela combinação das unidades direcional e de sobrecorrente onde esta fica inoperante, independente da magnitude da corrente de falta, até que a unidade direcional seja habilitada.

A direcionalidade é obtida por meio da polarização da tensão, cuja área de proteção é definida pela comparação do ângulo de fase entre a corrente e a tensão de polarização. As tensões de polarização devem permanecer firmes quando

ocorre alguma falta para manter a referência de tensão para a corrente de operação envolvida no defeito. Assim, exemplificando, na ligação em quadratura (90°), usa-se a tensão de polarização $\bar{V}_{BC}$ com o elemento de sobrecorrente da fase A, pois caso a fase A esteja envolvida em uma falta, as tensões de polarização dessa fase não são elevadas o suficiente para distinguir a direcionalidade.

Conforme a conexão dos relés direcionais (90°, 30° (adjacente) e 60°) é possível obter diferentes tensões de polarização, sendo que o torque máximo acontece no momento que a corrente de operação está adiantada da tensão de polarização por um ângulo de torque máximo.

III. COORDENAÇÃO DE RDS USANDO DISCRETE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

A modelagem do problema de coordenação do relé adotado, consiste basicamente, na minimização da soma do tempo de operação de todos os dispositivos de proteção. Dado um relé i e de acordo com o padrão IEC 60255-151 [10], o tempo é determinado pela Equação 1.

$$\min f = \sum_{i=1}^{NR} \sum_{x=1}^{NP} T_{i_x}(k_1, k_2, k_3, I_{i_x}, I_{p_i}, TMS_i) \quad (1)$$

$$T_{i_x} = \frac{k_1 \times TMS_i}{\left(\frac{I_{i_x}}{I_{p_i}}\right)^{k_2} - k_3} \quad (2)$$

onde: k_1 , k_2 e k_3 são os termos que definem a curva de operação do relé (Tabela I); I_{i_x} é a corrente de curto-circuito no ponto x ; TMS_i é o múltiplo de tempo; e; NR e NP é o número de relés e pontos de falta, respectivamente. Sabe-se que a razão do Transformador de Corrente (TC) multiplicado pelo *tape* de corrente origina I_{p_i} .

TABELA I. CURVAS EXISTENTES DA NORMA IEC 60255-151

ID	Nome da Curva	k_1	k_2	k_3
1	IEC-A (Inverso Padrão)	0,14	0,02	1,00
2	IEC-B (Muito Inverso)	13,5	1,00	1,00
3	IEC-C (Extremamente Inverso)	80,0	2,00	1,00
4	IEC-Inverso Tempo-Longo	120	1,00	1,00
5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,05	0,04	1,00

Certas informações técnicas sobre a filosofia do esquema de proteção devem ser levadas em consideração. Os elementos essenciais e limitantes estão resumidos na Tabela II.

TABELA II. INFORMAÇÕES CONSIDERADAS PARA A COORDENAÇÃO

Guia geral para o ajuste da proteção
Escolha de todos os pares de relés primários/backup.
Determine o Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC).
A avaliação deve abranger as alterações topológicas?
Determine a corrente mínima de funcionamento baseado na corrente nominal de outros dispositivos instalados (por exemplo: condutores, disjuntores, bobinas de bloqueio e TCs).
Quais tipos de curto-circuitos e pontos de falta serão levados em conta?
Tipo da curva e coeficientes do polinômio (neste trabalho a Equação 2 é adotada).
Limites inferior e superior dos parâmetros: $\underline{TMS} < TMS < \overline{TMS}$ e $\underline{tape} < tape < \overline{tape}$.
Se $\underline{TMS}$ or $\overline{TMS}$ são discretos e de passos regulares, quais são seus valores de passo? A mesma averiguação deve ser feita para o <i>tape</i> .

O algoritmo utilizado para a otimização simultânea dos vários relés é o *DPSO* que possui a capacidade de resolver problemas com variáveis inteiras. Essa meta-heurística é essencialmente derivada do algoritmo original *PSO* [11] cujo funcionamento é inspirado no comportamento de bando de pássaros modelados como agentes que realizam uma busca. Nesse método, comportamentos sociais e cognitivos relativos à busca são traduzidos matematicamente pela Equação 3 (velocidade) e pela Equação 4 (posição da partícula).

$$v_{t+1}^i = wv_t^i + C_1r_1(pbest_t^i - x_t^i) + C_2r_2(gbest - x_t^i) \quad (3)$$

$$x_{t+1}^i = x_t^i + v_{t+1}^i \quad (4)$$

onde: t é o indicador da interação corrente; w é o coeficiente de inércia, importante para definição do espaço de busca; C_1 e C_2 são constantes, parâmetros cognitivos e sociais, respectivamente; r_1 e r_2 são valores aleatórios (com probabilidade uniforme) entre 0 e 1; $pbest_t^i$ é o melhor vetor da partícula i ; $gbest$ é o melhor vetor entre todas partículas analisadas; i é o índice da partícula que varia entre 1 a N , onde N é o tamanho do grupo (número de partículas); x_t^i é o vetor posição da partícula i e; v_t é a velocidade da partícula.

Para cada partícula é dada uma velocidade e elas iniciam a se movimentar no espaço de busca. Cada partícula possui uma ‘memória’ que armazena sua melhor posição anterior já visitada ($pbest$) e o grupo possui uma ‘memória coletiva’, que armazena a melhor posição já encontrada pelo grupo ($gbest$).

Detalhes de formulação matemática estão disponíveis em [12]–[14]. Resultados preliminares indicam uma direção promissora para uma proteção de alta qualidade.

IV. UMA PROPOSTA DE PROGRAMAÇÃO DO RELÉ DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE NO ATP-EMTP

A lógica de programação do RDS (67) para a proteção de neutro, modelada no *ATP-EMTP* via linguagem de programação *MODELS*, será descrita a seguir. O *ATP-EMTP* baseia-se no método de integração trapezoidal com passo de tempo fixo [15]. A metodologia está definida em 4 grandes etapas descritas a seguir:

- 1) Primeiramente se faz necessário encontrar o tempo em que a tensão medida na fase A (usada como referência) encontra o valor zero, como também o tempo em que as correntes trifásicas (A, B e C) cruzam o zero (estágio zero). Somente a frequência fundamental foi levada em consideração para a determinação do tempo, significando que, a ocorrência de transitórios durante a abertura do disjuntor de uma linha de transmissão foi desconsiderada na proteção.
- 2) Calcular os ângulos das correntes (todas as fases) em relação a tensão da fase A. Depois de executar essa ação, usando uma variável de entrada para determinar o tipo de conexão das bobinas do relé (30°, 60° ou 90°), os valores das tensões de polarização são calculados. Seus ângulos serão obtidos da mesma maneira como foram calculados para as correntes trifásicas mencionadas anteriormente.
- 3) Calcular os ângulos de torque máximo para cada fase, definido por meio da soma do ângulo das tensões de

polarização com o ângulo de torque. Tendo determinado o ângulo de torque máximo para cada fase, os ângulos da direção de atuação do RDS de neutro, correspondentes à diferença entre o valor do ângulo de torque máximo e o valor do ângulo da corrente encontrado previamente (por fase), são calculados.

Nessa etapa, o triplo da corrente *rms* de sequência zero ($3 \times I_0 = I_a + I_b + I_c$) é calculado. Caso a corrente de sequência zero seja maior que a corrente de *pick-up*, é verificado se o ângulo da direção de atuação do relé está entre -90° e 90° (direção direta). Se essa situação for verdadeira significa que o curto-circuito está dentro da zona de atuação do relé e o mesmo está apto a atuar. A direcionalidade não é verificada em situações de transitórios na linha de transmissão, já que esse fenômeno pode provocar a atuação indevida dos dispositivos de proteção. Para evitar que o relé atue devido a corrente de energização da linha de transmissão, é necessário criar uma variável de entrada onde é definido o tempo, a partir do qual, o relé entrará em operação. Assim, após o tempo da simulação ter atingido o tempo estabelecido anteriormente, passa-se a monitorar a corrente de sequência zero calculada, de tal forma que quando ela ultrapassa a corrente de *pick-up* definida, o tempo em que ocorreu a falta é gravado. Logo em seguida, o cálculo do tempo de atuação do RDS de neutro é realizado, usando os valores da corrente de curto-circuito em regime permanente. Salienta-se que os próximos passos só serão realizados caso o disjuntor esteja ainda fechado.

Cálculo do tempo de atuação:

Com o instante da ocorrência do curto-circuito, calcula-se o tempo de atuação do relé através da Equação 2 podendo adotar as seguintes métricas.

Métrica 1 - Caso a corrente de falta de sequência zero se encontre em regime permanente, o tempo de abertura do disjuntor é determinado através da soma do tempo de atuação do relé com o tempo em que ocorreu o curto-circuito, interrompendo o cálculo do tempo de atuação do RDS de neutro, realizado iterativamente.

Métrica 2 - Uma outra opção no caso do cálculo do tempo, diferentemente de coletar os valores da corrente de curto-circuito em regime permanente, o tempo de atuação do relé é calculado desde o momento em que a corrente de curto-circuito ultrapassa o valor da corrente de *pick-up* pela Equação 5 [16].

$$\Delta t_{somp} \sum_{k=1}^{k_{op}} \left(\frac{1}{T_{ix}} \right) \geq 1 \quad (5)$$

onde Δt_{somp} é o intervalo de amostragem e k_{op} é a quantidade de amostras processadas até o acionamento do relé. Por exemplo, dado $\Delta t_{somp} = 1,25 \times 10^{-4}$ s ($f_{somp} = 8$ kHz) e $T_{ix} = 0,016$ s, o RDS analisado operaria a partir de 128 amostras consecutivas. Outro exemplo seria operar após 100 amostras com $T_{ix} = 0,016$ s (0,78125) e, acumulativamente, 56 amostras

com $T_{ix} = 0,032$ s (0,21875). Durante a execução da simulação, o resultado de (5) é verificado, de tal forma que quando o resultado for maior ou igual a 1, o relé envia o sinal para o disjuntor operar.

- 4) O último passo consiste em verificar se o tempo de simulação é igual ao tempo de abertura do disjuntor, se o curto-circuito se encontra dentro da zona de atuação e se a corrente de falta ainda é maior que a corrente de *pick-up*. Se todas essas condições forem verdadeiras, é enviado um sinal de *trip* correspondente à abertura do disjuntor. Caso contrário retorna ao estágio zero (item 2).

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As simulações foram realizadas em um sistema equivalente correspondente a parte de uma rede de 138 kV pertencente a rede brasileira (Figura 1) [17]. Neste estudo, um capacitor *shunt* de 0,2742 p.u. (sequência zero) foi instalado na barra 16137.

Os RDSs da Schweitzer foram considerados nas simulações (SEL-421 - disponível em 1 A e 5 A) [18]. A conexão de 90° foi definida para todos relés. A razão do TC está escrita em verde e *ME* representam os medidores de tensão e corrente. Cada disjuntor tripolar é operado quando o RDS detecta uma condição de falta. Os pontos de falta são *close-in* (situada a 1% do comprimento da linha) e na barra remota.

A otimização da proteção de neutro via *DPSO* é visualizada na Tabela III. Neste trabalho, adotou-se $C_1 = C_2 = 0,5$ e w respeita uma distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$, semelhante a r_1 e r_2 . Nota-se que 38,88% dos relés (7 de 18) atingiram o mínimo *TMS* existente no intuito de minimizar o tempo de atuação dos relés.

TABELA III. OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO DE NEUTRO USANDO *DPSO*

Relé	ID	Nome da curva	<i>TMS</i>	<i>tape</i>	I_p
R1	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,05	4,10	656
R2	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,05	4,90	196
R3	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,05	4,10	656
R4	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,05	4,90	196
R5	2	IEC-B (Muito Inverso)	0,05	0,82	205
R6	2	IEC-B (Muito Inverso)	0,05	0,82	328
R7	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,18	1,10	275
R8	2	IEC-B (Muito Inverso)	0,05	0,82	328
R9	3	IEC-C (Extremamente Inverso)	0,74	0,99	297
R10	3	IEC-C (Extremamente Inverso)	0,33	0,85	255
R11	1	IEC-A (Inverso Padrão)	0,54	0,98	245
R12	3	IEC-C (Extremamente Inverso)	0,17	1,07	642
R13	1	IEC-A (Inverso Padrão)	0,52	0,98	245
R14	2	IEC-B (Muito Inverso)	0,27	0,98	588
R15	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,19	3,86	308,8
R16	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,09	4,83	289,8
R17	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,10	4,42	353,6
R18	5	IEC-Inverso Tempo-Curto	0,18	4,09	327,2

A Figura 2 demonstra a dinâmica do *DPSO* ao longo de 600 iterações (valor máximo adotado) para cinco distintos relés. O movimento da melhor partícula é influenciado pelas demais partículas que estão no espaço de busca, sendo natural as oscilações enquanto o processamento ocorre na tentativa de varrer as diversas possibilidades. Na 366ª iteração, a função objetivo f atinge sua mínima amplitude (29,88 s). Em adição, um alto número de partículas permite verificar mais partes no espaço de busca em cada iteração, permitindo encontrar

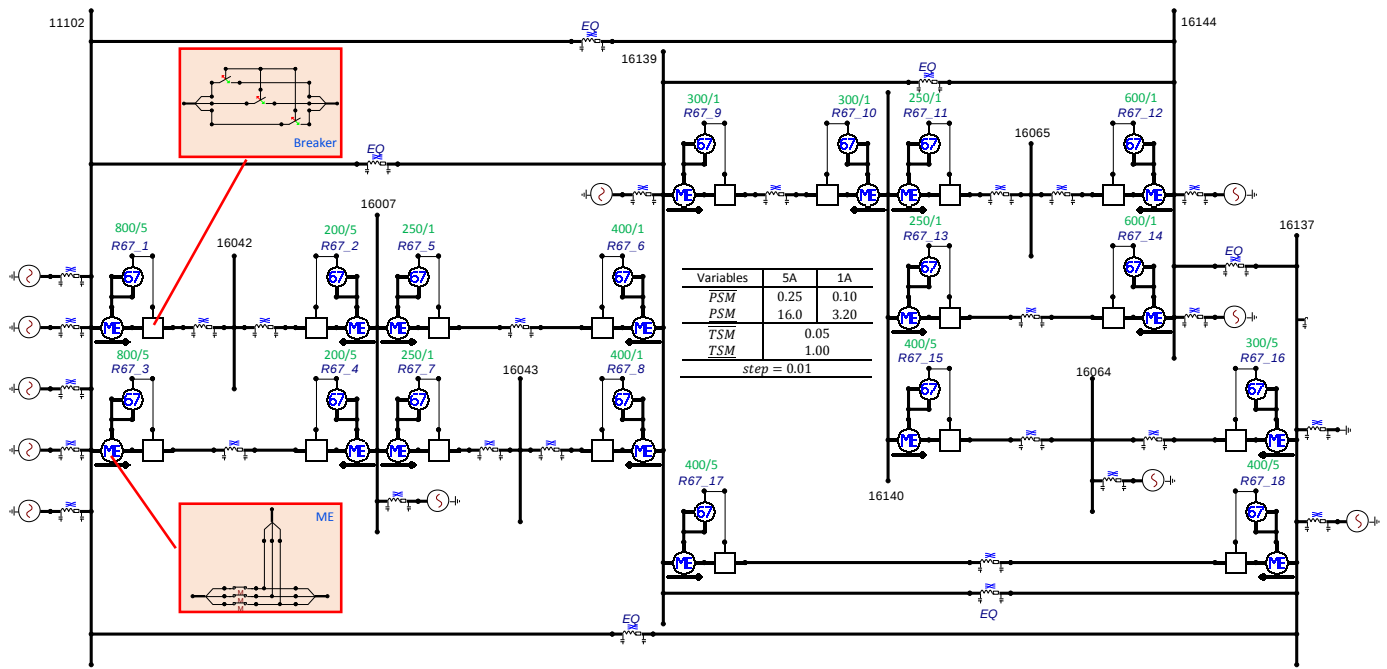


Fig. 1. SEP com 18 RDSs protegendo diversas linhas contra uma falta. O objeto 67 representa o relé e sua operação via ATP-EMTP foi discutida na Seção IV.

melhores soluções, se comparado com soluções encontradas em enxames menores. Todavia, isso pode aumentar o custo computacional (maior tempo de execução). Adotando 2.000 partículas, o tempo total de processamento foi cerca de 122 s, sabendo que pouco depois da metade do valor máximo de iterações, o valor ótimo já havia sido alcançado.

O DPSO foi implementado usando a linguagem C++ e compilado no Visual Studio 10.0. A configuração do computador usado é a seguinte: Dell Optiplex 790, cujo processador é Intel Core™ i7-2600 3,40 GHz, 8 GB de memória, executando Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1.

As Tabelas IV e V mostram os tempos de operação dos dispositivos de proteção encontrados pelo DPSO e a validação das simulações realizada pelo ATP-EMTP. As variáveis são explicadas a seguir: R_p - relé primário; R_b - relé de retaguarda (backup); $t_{R_p}^{ATP_1}$ e $t_{R_b}^{ATP_1}$ - tempo de operação de R_p e de R_b , respectivamente, via ATP-EMTP (Métrica 1); $t_{R_p}^{ATP_2}$ e $t_{R_b}^{ATP_2}$ - tempo de operação de R_p e de R_b , respectivamente, via ATP-EMTP (Métrica 2); $t_{R_p}^{DPSO}$ e $t_{R_b}^{DPSO}$ - tempo de operação de R_p e de R_b , respectivamente, via DPSO; $ER_{R_p}^\Gamma$,

$ER_{R_p}^\Delta$ e $ER_{R_b}^\Delta$ - Erro Relativo (ER) de $t_{R_p}^{ATP_1}$, $t_{R_p}^{ATP_2}$ e $t_{R_b}^{ATP_2}$, respectivamente, com DPSO; $NC_{R_p}^\Delta$ e $NC_{R_b}^\Delta$ - diferença entre número de ciclos de $t_{R_p}^{ATP_2}$ e $t_{R_b}^{ATP_2}$, respectivamente, com DPSO e; PF - ponto da falta (nó).

Diante de um curto-circuito *close-in*, para a Métrica 1, o maior ER do relé primário foi no relé R10, tendo R12, R14 e R16 como elementos de retaguarda (0,3087% - valor absoluto). Já o menor ER foi de 0,0318% para o relé primário R17. Ao tratar dos relés de *backup* para esse mesmo tipo de curto-circuito, o maior ER em módulo foi de 1,3878% para relé R13, que atua caso R12 falhe. Já o menor ER em módulo foi de 0,0101% para relé R10, que pode atuar se R17 falhar. Demais situações de valores mínimos e máximos absolutos dessas variáveis estão sinalizados pela coloração verde e vermelha, respectivamente. Em relação a $NC_{R_p}^\Delta$ (curto-circuito *close-in*), 6 casos (27,27%) estão entre 0,1 – 0,2 ciclos, 8 casos (36,36%) estão entre 0,2 – 0,3 ciclos, 1 caso (4,55%) está entre 0,3 – 0,4 ciclos, 1 caso (4,55%) está entre 0,4 – 0,5 ciclos e 6 casos (27,27%) estão acima de 0,5 ciclos. Já para $NC_{R_b}^\Delta$, 3 casos (13,64%) estão entre 0 – 0,1 ciclos, 4 casos (18,17%) estão entre 0,1 – 0,2 ciclos, 3 casos (13,64%) estão entre 0,2 – 0,3 ciclos, 1 caso (4,55%) está entre 0,5 – 1,0 ciclos, 3 casos (13,64%) estão entre 1,0 – 2,0 ciclos e 8 casos (36,36%) são maiores que 2 ciclos. Percebe-se que a diferença do número de ciclos entre ATP-EMTP e DPSO é maior para os relés de *backup*, havendo faixa de valores superior a 2 ciclos.

Na Tabela V, o símbolo $\times$ significa que o relé analisado não operou, pois a corrente de curto-circuito não atingiu a corrente de *pick-up* estabelecida. Por outro, o símbolo $*$ significa que embora a corrente de *pick-up* tenha sido atingida, o elemento direcional não permitiu o dispositivo operar, sendo que a atuação ocorreria somente se relés de sobrecorrente convencionais fossem utilizados. Por exemplo, se R13 fosse um relé convencional, ele atuaria após quase 1,68 s para um curto-

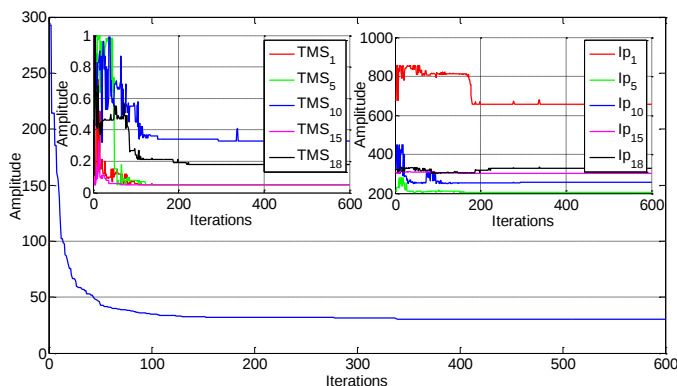


Fig. 2. Função objetivo f , TMS 's e I_p 's dos relés R1, R5, R10, R15 e R18.

TABELA IV. VALIDAÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO DO *DPSO* VIA *ATP-EMTP* (CURTO-CIRCUITO CLOSE-IN)

R_p	R_b	$t_{R_p}^{ATP1}$	$t_{R_b}^{ATP1}$	$t_{R_p}^{ATP2}$	$t_{R_b}^{ATP2}$	$t_{R_p}^{DPSO}$	$t_{R_b}^{DPSO}$	$ER_{R_p}^F$	$ER_{R_b}^F$	$ER_{R_p}^A$	$ER_{R_b}^A$	$NC_{R_p}^A$	$NC_{R_b}^A$
R9	R5	0,2727	0,6415	0,2819	0,5431	0,2732	0,6418	-0,1757	-0,0514	3,1845	-15,3771	0,5220	-5,9214
	R7	0,2727	0,5248	0,2819	0,4905	0,2732	0,5254	-0,1757	-0,1104	3,1845	-6,6426	0,5220	-2,094
	R18	0,2727	0,5256	0,2819	0,4731	0,2732	0,5237	-0,1757	0,3647	3,1845	-9,6620	0,5220	-3,036
R10	R12	0,0688	1,4326	0,0777	1,4374	0,0690	1,4330	-0,3087	-0,0279	12,6250	0,3070	0,5226	0,264
	R14	0,0688	1,4754	0,0777	1,4761	0,0690	1,4790	-0,3087	-0,2434	12,6250	-0,1961	0,5226	-0,174
	R16	0,0688	1,4942	0,0777	1,4610	0,0690	1,4820	-0,3087	0,8232	12,6250	-1,4170	0,5226	-1,26
R11	R9	1,2316	1,4822	1,2353	1,4835	1,2320	1,4850	-0,0325	-0,1886	0,2679	-0,1010	0,1980	-0,09
	R14	1,2316	1,4754	1,2353	1,4761	1,2320	1,4790	-0,0325	-0,2434	0,2679	-0,1961	0,1980	-0,174
	R16	1,2316	1,4942	1,2353	1,4610	1,2320	1,4820	-0,0325	0,8232	0,2679	-1,4170	0,1980	-1,26
R12	R13	0,0425	8,7305	0,0507	8,6751	0,0426	8,6110	-0,2959	1,3878	19,070	0,7444	0,4872	3,846
	R9	1,1826	1,4822	1,1859	1,4835	1,1830	1,4850	-0,0338	-0,1886	0,2451	-0,1010	0,1740	-0,09
	R12	1,1826	1,4326	1,1859	1,4374	1,1830	1,4330	-0,0338	-0,0279	0,2451	0,3070	0,1740	0,264
R13	R16	1,1826	1,4942	1,1859	1,4610	1,1830	1,4820	-0,0338	0,8232	0,2451	-1,4170	0,1740	-1,26
	R11	0,1961	8,6189	0,2021	8,6147	0,1964	8,5230	-0,1426	1,1252	2,9022	1,0759	0,3420	5,502
R14	R9	0,0753	1,4822	0,0787	1,4835	0,0753	1,4850	-0,0571	-0,1886	4,4598	-0,1010	0,2016	-0,09
	R12	0,0753	1,4326	0,0787	1,4374	0,0753	1,4330	-0,0571	-0,0279	4,4598	0,3070	0,2016	0,264
	R14	0,0753	1,4754	0,0787	1,4761	0,0753	1,4790	-0,0571	-0,2434	4,4598	-0,1961	0,2016	-0,174
R15	R17	0,0396	0,2891	0,0431	0,2917	0,0396	0,2898	-0,0480	-0,2484	8,9209	0,6556	0,2118	0,114
	R5	0,0409	0,6415	0,0443	0,5484	0,0409	0,6419	-0,0318	-0,0670	8,2071	-14,5661	0,2016	-5,61
	R7	0,0409	0,5248	0,0443	0,4905	0,0409	0,5255	-0,0318	-0,1294	8,2071	-6,6603	0,2016	-2,1
R16	R10	0,0409	0,2959	0,0443	0,3043	0,0409	0,2959	-0,0318	0,0101	8,2071	2,8388	0,2016	0,504
	R15	0,0793	0,7472	0,0829	0,6500	0,0794	0,7505	-0,0466	-0,4384	4,4344	-13,3911	0,2112	-6,03

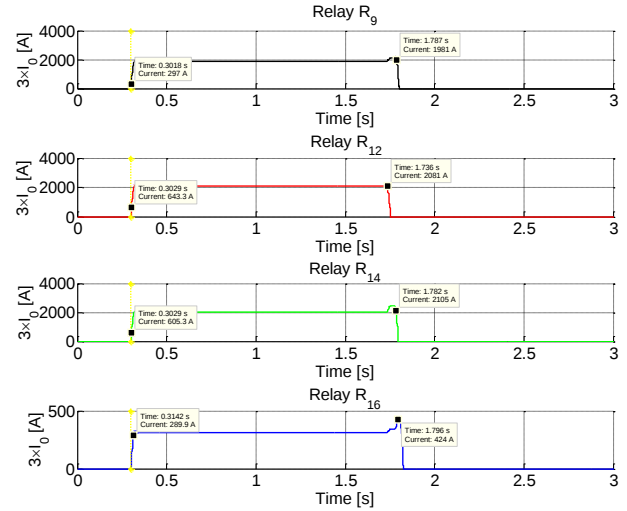
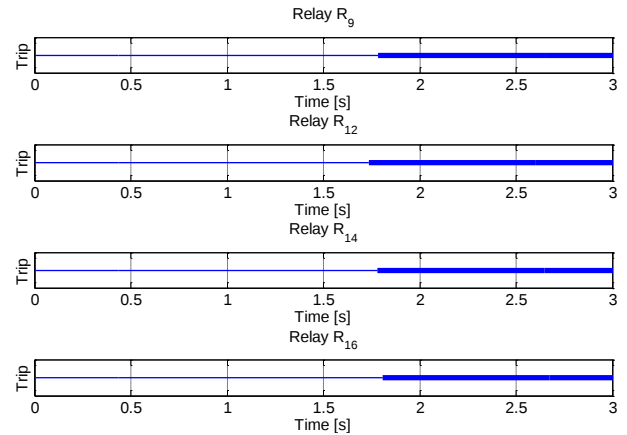
TABELA V. VALIDAÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO DO *DPSO* VIA *ATP-EMTP* (CURTO-CIRCUITO NA BARRA REMOTA)

R_p	R_b	$t_{R_p}^{ATP1}$	$t_{R_b}^{ATP1}$	$t_{R_p}^{DPSO}$	$t_{R_b}^{DPSO}$	$ER_{R_p}^F$	$ER_{R_b}^F$	PF
R9	R5	1,4822	X	1,4850	X	0,1886	0	16140
	R7	1,4822	X	1,4850	X	0,1886	0	16140
	R18	1,4822	X	1,4850	X	0,1886	0	16140
R10	R12	0,2959	9,1013	0,2959	9,1460	-0,0101	0,4887	16139
	R14	0,2959	5,3002	0,2959	5,3080	-0,0101	0,1469	16139
	R16	0,2959	X	0,2959	X	-0,0101	0	16139
R11	R9	8,6189	47,4010	8,5200	46,6300	-1,1608	-1,6534	16144
	R14	8,6189	X	8,5200	X	-1,1608	0	16144
	R16	8,6189	X	8,5200	X	-1,1608	0	16144
R12	R13	1,4326	1,6812*	1,4330	1,6830*	0,0279	0,1070*	16140
	R9	8,7305	47,4010	8,6080	46,6300	-1,4231	-1,6534	16144
	R12	8,7305	X	8,6080	X	-1,4231	0	16144
R13	R16	8,7305	X	8,6080	X	-1,4231	0	16144
	R11	1,4754	1,7282*	1,4790	1,7300*	0,2434	0,1040*	16140
R14	R9	0,7472	X	0,7504	X	0,4251	0	16137
	R12	0,7472	X	0,7504	X	0,4251	0	16137
	R14	0,7472	X	0,7504	X	0,4251	0	16137
R15	R17	1,4942	X	1,4820	X	-0,8232	0	16140
	R5	0,2891	X	0,2897	X	0,2140	0	16137
	R7	0,2891	X	0,2897	X	0,2140	0	16137
R16	R10	0,2891	X	0,2897	X	0,2140	0	16137
	R15	0,5256	0,7806*	0,5237	0,7796*	-0,3647	-0,1244*	16139

circuito na barra remota de *R12*. Nota-se que a maioria dos RDSs de retaguarda (*backup*) não atua sob hipótese alguma diante de um curto-circuito na barra remota. Essa situação não é conflituosa pois presume que os dispositivos mais próximos desse defeito possam cumprir seu papel de atuação. Cita-se *R9* cujo nenhum relé de retaguarda (*R5*, *R7* ou *R18*) entrou em operação diante de um curto-circuito em 16140, mas observa-se que caso ocorresse um curto-circuito muito próximo dessa mesma barra, como *R10* - *close-in* (Tabela IV), esse operaria em 0,0688 s, antes mesmo de *R9*.

A Figura 3 mostra a atuação dos dispositivos no domínio do tempo para uma falta fase-terra na barra 16140. O curto-circuito ocorreu em 300 ms e é indicado pela reta vertical amarela. É visto que o relé *R9* foi sensibilizado em 0,3018 s quando a corrente atingiu 297 A ($= I_p$). 1,485 s depois (1,7868 s) a falta foi extinta. Outro exemplo, pode-se citar o relé *R12* que é sensibilizado em 0,3029 s quando a corrente de curto-circuito ultrapassa $I_p = 642$ (643,3 A). O *trip* do relé foi acionado em 1,736 s. Já *R14* e *R16* atuam 1,479 s e 1,482 s, respectivamente, após a sensibilização dos mesmos. A condição de *trip* desses relés é mostrada na Figura 4.

Já a Figura 5 apresenta a atuação dos RDSs no domínio do tempo para uma falta *close-in* em *R9*. Uma falha nesse

Fig. 3. Corrente no domínio do tempo dos relés *R9*, *R12*, *R14* e *R16* (Fase A) - curto-circuito fase-terra na barra remota 16140 ($3 \times I_0$).Fig. 4. Atuação de *R9*, *R12*, *R14* e *R16* - curto-circuito fase-terra na barra remota 16140 ($3 \times I_0$).

relé foi simulada. Percebe-se que a sequência de relés a serem acionados são: *R10* (0,5973 s), *R7* (0,8353 s), *R18* (0,8362 s) e *R5* (0,9463 s) após o início da simulação. Como a abertura dos disjuntores é realizada passo a passo, modificando a topologia do sistema, a corrente de curto-circuito sofre ondulações ascendentes e descendentes. Devido a existência de uma unidade geradora na barra 16064, o curto-circuito não é devidamente eliminado após a operação do último

RDS de *backup* ($\approx 1s$). Salienta-se que naquele local poderia ser instalado um relé para salvaguardar a máquina (proteção de gerador), porém este trabalho aborda somente RDS em linhas de transmissão. Por fim, o *trip* dos dispositivos são visualizados na Figura 6.

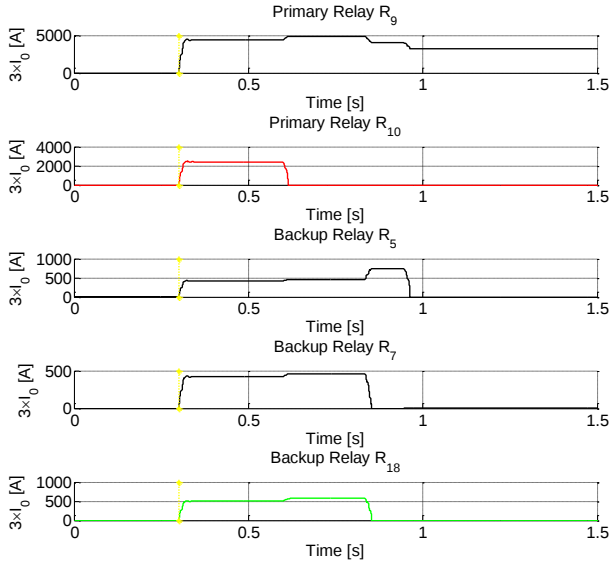


Fig. 5. Corrente no domínio do tempo dos relés R_5 , R_7 , R_9 , R_{10} e R_{18} (Fase A) - curto-circuito fase-terra *close-in* em R_9 ($3 \times I_0$).

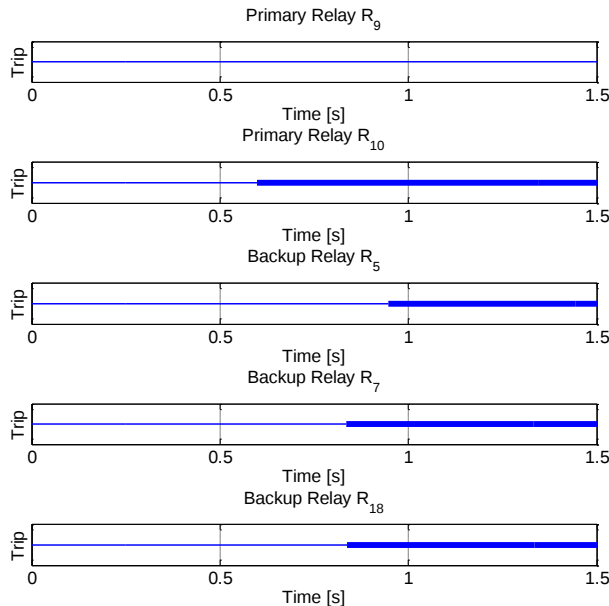


Fig. 6. Atuação de R_5 , R_7 , R_9 , R_{10} e R_{18} - curto-circuito fase-terra *close-in* em R_9 ($3 \times I_0$).

VI. CONCLUSÃO

Apesar da técnica meta-heurística já ser largamente abordada na literatura, este artigo trouxe como maior objetivo a validação da solução encontrada pelo *DPSO*, na coordenação de RDSs, através de um modelo de relé no *ATP-EMTP*. Desta forma, a análise no domínio do tempo, não apenas descreve o comportamento do sistema de proteção no sistema em estudo em um nível elevado de precisão, mas também confirma que o *DPSO* fornece resultados aplicáveis para os relés primários e seus retaguarda como pode ser observado nas Tabelas IV e V. Assim, mesmo considerando o fato que a meta-heurística não leva em conta o regime pós-abertura de um disjuntor, pode-se

concluir que sua aplicação é satisfatória, tendo em vista a não existência de uma abertura incorreta durante as simulações. Por fim, futuros trabalhos devem incluir a unidade instantânea e a proteção de fase.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processos n. 2012/25292-1|link e n. 2014/27342-1|link) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] C. R. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*, 1st ed. Wiley, Jan. 1956.
- [2] H. Zeineldin, "Optimal coordination of microprocessor based directional overcurrent relays," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2008, May 2008, pp. 000 289–000 294.
- [3] M. Y. Shih, C. Castillo Salazar, and A. Conde Enríquez, "Adaptive directional overcurrent relay coordination using Ant Colony Optimization," *Generation, Transmission Distribution, IET*, vol. 9, no. 14, pp. 2040–2049, 2015.
- [4] F. Razavi, H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadi, and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 4, pp. 713 – 720, 2008.
- [5] M.-T. Yang and A. Liu, "Applying hybrid PSO to optimize directional overcurrent relay coordination in variable network topologies," *Journal of Applied Mathematics*, p. 9, 2013.
- [6] M. Mansour, S. Mekhamer, and N. El-Kharbawe, "A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1400–1410, July 2007.
- [7] T. Amraee, "Coordination of directional overcurrent relays using Seeker Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1415–1422, July 2012.
- [8] M. Hussain, S. Rahim, and I. Musirin, "Optimal overcurrent relay coordination: A review," *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 332 – 336, 2013.
- [9] H. K. Høidalen, (2016, Mar.) ATPDraw: The graphical preprocessor to ATP electromagnetic transients program. Accessed on: March 29th, 2016. [Online]. Available: <http://www.atpdraw.net/index.php>
- [10] *Measuring relays and protection equipment - Part 151: Functional requirements for over/under current protection*, 1st ed., Aug. 2009. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/1166>
- [11] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. 4, Nov 1995, pp. 1942–1948 vol.4.
- [12] W. M. S. Bernardes, "Discrete Particle Swarm Optimization for directional overcurrent relays coordination in electric power system," Master dissertation, University of São Paulo, São Paulo, Brazil, Mar. 2013, in Portuguese. [Online]. Available: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-14052013-094113/pt-br.php>
- [13] W. M. S. Bernardes, F. M. P. Santos, E. N. Asada, S. A. Souza, and M. J. Ramos, "Application of discrete PSO and evolutionary PSO to the coordination of directional overcurrent relays," in *17th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*, Tokyo, Japan, July 2013, pp. 1–6.
- [14] F. B. Bottura, W. M. S. Bernardes, M. Oleskovicz, E. N. Asada, S. A. Souza, and M. J. Ramos, "Coordination of directional overcurrent relays in meshed power systems using hybrid genetic algorithm optimization," in *Proc. 12th International Conference on Developments in Power System Protection*. Copenhagen, Denmark: IEEE, Apr. 2014, pp. 1–6.
- [15] J. Mahseredjian, V. Dinavahi, and J. Martinez, "Simulation tools for electromagnetic transients in power systems: Overview and challenges," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1657–1669, July 2009.
- [16] R. Corrêa, "Optimization of coordination of directional overcurrent relays in electric power systems using Binary Integer Programming," Master dissertation, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Brazil, Feb. 2012, in Portuguese.
- [17] Brazilian Power System Operator. Short-circuit studies: short-circuit database. Accessed in 12 Aug. 2015. [Online]. Available: http://www.ons.org.br/operacao/estudos_curto_circuito.aspx
- [18] Schweitzer Engineering Laboratories. SEL-421 Protection, Automation and Control System (Data Sheets). Accessed on: March 29th, 2016. [Online]. Available: <https://www.selinc.com/SEL-421/>