

ALGORITMO HÍBRIDO ESPECIALIZADO APLICADO À COORDENAÇÃO ÓTIMA DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS

ALEXANDRE AKIRA KIDA*, LUIS ALFONSO GALLEGOPAREJA*

*Universidade Estadual de Londrina
Londrina, Paraná, Brasil

alexandrevida@gmail.com, gallegopareja@gmail.com

Abstract— This paper presents a new hybrid methodology that combines the genetic algorithm with integer linear programming (GA-ILP) to solve the problem of optimal coordination of directional overcurrent relays (DOCRs) in interconnected power systems. In the proposed model, time dial settings (TDSs) and plug settings (PSs) are treated as discrete variables. The aim of this work is to find discrete TDSs and PSs that improve the speed, sensitivity, selectivity and reliability of the protection scheme. The proposed methodology is applied to the transmission systems of six and eight-bus. The results show that the GA-ILP is efficient and effective to solve the problem of coordination.

Keywords— Optimization, Directional Overcurrent Relays, Electric Energy Systems.

Resumo— Este trabalho apresenta uma nova metodologia híbrida que combina o algoritmo genético com programação linear inteira (AG-PLI) para solucionar o problema da coordenação ótima de sobre corrente direcionais (RSDs), em sistemas de energia elétrica interconectados. No modelo proposto, os ajustes de tempo (Dials) e de *plug* (PSs) são tratados como variáveis discretas. O objetivo principal deste trabalho consiste em encontrar ajustes discretos de Dial e PS de forma a melhorar a velocidade, sensibilidade, confiabilidade e seletividade do esquema de proteção. A metodologia proposta é aplicada nos sistemas de transmissão de 6 e 8 barras. Os resultados mostram que o AG-PLI é eficiente e eficaz para solucionar o problema da coordenação.

Palavras-chave— Otimização, Relés de Sobre corrente Direcionais, Sistemas de Energia Elétrica.

1 Introdução

Os dispositivos de proteção pertencentes ao sistema elétrico são responsáveis por detectar e isolar os elementos submetidos à falha. Simultaneamente, estes dispositivos devem deixar a maior parte do sistema em operação, evitando interrupções desnecessárias ao fornecimento de energia. As características desejadas aos esquemas de proteção são: seletividade, sensibilidade, confiabilidade e velocidade (Urdaneta et al., 1988).

Durante uma falta, uma das principais consequências ao sistema elétrico é a elevação da magnitude da corrente elétrica. Os relés de sobre corrente direcionais (RSDs) são dispositivos que monitoram a corrente em um trecho e atuam, enviando um contato de *trip* para o disjuntor, quando esta corrente ultrapassa um valor preestabelecido e possui uma direção específica. Esses tipos de relés são amplamente utilizados como proteção primária em sistemas de subtransmissão e distribuição, e como proteção de retaguarda em sistemas de transmissão (Amraee, 2012). Os RSDs possuem dois ajustes básicos: ajuste de *plug* (*PS*) e de tempo (*Dial*).

No trabalho de Urdaneta et al. (1988), foi demonstrado que o problema da coordenação é não linear. Porém, caso os valores de *PSs* sejam previamente determinados, o problema pode ser linearizado. Assim, apenas os *Dials* são variáveis de decisão. Em So (1997), o problema foi solucionado com o algoritmo genético (AG) pela primeira vez. Os *PSs* e *Dials* foram considerados como variá-

veis de decisão e codificados de forma binária no cromossomo. No trabalho de Razavi et al. (2008), foi adicionado um novo parâmetro à função objetivo (FO) do AG. Este parâmetro adiciona uma penalização à FO, quando o arredondamento dos *Dials* – para os valores aceitos pelos relés – causam problemas de seletividade. Assim, foi possível considerar valores discretos *Dials*. Os autores demonstraram que, quando os relés não permitem ajustes contínuos, o arredondamento dos *Dials* pode levar à perda de seletividade.

Em Noghabi et al. (2009), foi proposto um algoritmo híbrido que combina AG com programação linear (AG-PL). Desta forma, o espaço de solução foi reduzido, visto que as variáveis de *Dial* não são codificadas no cromossomo, pois seus valores ótimos podem ser obtidos utilizando programação linear (PL). Bottura et al. (2014) utilizou o AG-PL (Noghabi et al., 2009) com a modificação na FO proposta por Razavi et al. (2008). Assim, foi possível considerar *PS* e *Dial* como variáveis discretas. Em Corrêa et al. (2015), a programação inteira binária (PIB) foi utilizada para solucionar o problema da coordenação, considerando valores discretos de *PSs* e *Dials*.

Neste trabalho, uma nova metodologia híbrida que combina o AG com programação linear inteira (AG-PLI), é proposta para solucionar o problema da coordenação de RSDs, considerando os ajustes discretos (*PSs* e *Dials*). A programação linear inteira (PLI) é utilizada como um otimizador local para encontrar os *Dials* discretos ótimos. Quando utilizado o fator de penalização

na FO, como em Razavi et al. (2008) e Bottura et al. (2014), é verificado apenas se a configuração é factível ao arredondar os valores de *Dial*. Na metodologia proposta, para cada configuração de *PSs*, os valores ótimos de *Dials* são diretamente calculados utilizando PLI. Adicionalmente, a meta-heurística utilizada no AG-PLI é baseada no AG de Chu and Beasley (1997). O AG-PLI diferencia-se dos AGs híbridos encontrados na literatura especializada (Noghabi et al., 2009; Bottura et al., 2014) em relação à meta-heurística empregada e à técnica utilizada para calcular os *Dials*. Nas referências supracitadas, a PL é utilizada para computar os valores de *Dials* e as meta-heurísticas são baseadas no AG de Holland (1975). A principal diferença entre a PLI em relação à programação linear (PL) (Urdaneta et al., 1988) e programação inteira binária (PIB) (Corrêa et al., 2015) é que as variáveis (*Dials*) são tratadas como inteiras durante o processo de otimização.

Este trabalho é dividido em cinco seções. Na Seção 2, é apresentada a formulação matemática do problema da coordenação de RSDs. A Seção 3 apresenta a metodologia híbrida proposta para solucionar o problema da coordenação, considerando os passos discretos de *PSs* e *Dials*. Na Seção 4, são apresentados os principais resultados obtidos e os comparativos com os reportados na literatura. A Seção 5 apresenta as principais conclusões deste trabalho.

2 Formulação Matemática

O problema da coordenação ótima de relés de sobrecorrente direcionais (RSDs) de tempo inverso é um problema de otimização não linear e não convexo (Noghabi et al., 2009). O RSD possui dois parâmetros básicos: ajuste de *plug* (*PS*) e ajuste de tempo (*Dial*). Caso algum desses parâmetros sejam tratados como variáveis discretas, o problema passa a ser inteiro-misto.

2.1 Função Objetivo

Ante uma situação de falta, uma das consequências ao sistema elétrico é a súbita elevação dos níveis de corrente a valores perigosos. Quanto mais rápida a falha for isolada, menores são os esforços térmicos e mecânicos no sistema. Na coordenação ótima de RSDs, procura-se obter os parâmetros necessários para que os tempos de atuação das proteções primárias sejam mínimos (Amraee, 2012), como é apresentado em (1).

$$\text{Min.} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m T_{i,i}^k \quad (1)$$

sendo que, k – índice relacionado ao nível de falta analisado; m – número de relés; p – número de faltas consideradas dentro da zona de proteção pri-

mária; $T_{i,i}^k$ – tempo de atuação do relé i (R_i) para uma falta k , quando este atua como proteção primária.

O tempo de atuação do relé i (R_i), para cada falta k dentro da zona de proteção primária do relé j (R_j) é apresentado em (2). Este tempo depende do *Dial* de R_i ($Dial_i$) e $K_{i,j}^k$. Para os relés IEC, $K_{i,j}^k$ é definido em (3).

$$T_{i,j}^k = Dial_i \cdot K_{i,j}^k \quad (2)$$

$$K_{i,j}^k = \frac{A_i}{\left(\frac{I_{cc_{i,j}^k}}{PS_i \cdot RTC_i} \right)^{N_i} - 1} \quad (3)$$

sendo que, $Dial_i$ – ajuste de tempo de R_i ; $I_{cc_{i,j}^k}$ – corrente de falta vista por R_i para uma falta dentro da zona de proteção primária de R_j para o nível k ; $T_{i,j}^k$ – tempo de atuação de R_i para $I_{cc_{i,j}^k}$; PS_i – ajuste de *plug* da unidade temporizada de R_i ; RTC_i – relação de transformação do transformador de corrente de R_i ; A_i e N_i – constantes relacionadas ao tipo de curva de R_i . Para a curva IEC inversa, $A_i = 0,14$ e $N_i = 0,02$.

2.2 Restrições

A FO apresentada em (1) está sujeita à três tipos de restrições: critério de seletividade, limites nos ajustes e limites nos tempos de atuação dos relés.

1) Critério de Seletividade

A restrição apresentada em (4) refere-se a diferença mínima necessária entre os tempos de atuação dos relés de proteção retaguarda e primária, para que estejam coordenados de forma seletiva. Um atraso proposital (ΔT_{rele}) entre os tempos de atuação dos relés é adicionado para que a proteção primária possua tempo suficiente para eliminar a falha, sendo que a proteção de retaguarda só deve atuar caso a primária falhe.

$$T_{protegido(i),i}^k - T_{i,i}^k \geq \Delta T_{rele} \quad (4)$$

sendo que, $T_{protegido(i),i}^k$ – tempo de atuação da proteção de retaguarda de R_i para o k nível de falta considerado dentro da zona de proteção de R_i ; ΔT_{rele} – tempo de coordenação entre relés.

2) Limites nos Ajustes dos Relés

Os relés devem permitir a operação normal do sistema. O valor de *PS* deve ser superior à máxima corrente de carga esperada, ponderado pela relação de transformação do transformador de corrente (RTC). O *PS* também deve ser menor do que a corrente de curto-circuito mínima dentro da zona de proteção do relé, ponderado pela RTC. Caso contrário, o relé não é sensibilizado pela falta. Essas condições são impostas em (5). Os valores de *PS* e de *Dial* são limitados em relação aos valores disponíveis no relé, como são apresentados em (6) e (7), respectivamente.

$$\frac{FC \cdot I_{carga,i}^{max}}{RTC_i} \leq PS_i < \frac{Icc_i^{min}}{RTC_i} \quad (5)$$

$$PS_i^{min} \leq PS_i \leq PS_i^{max} \quad (6)$$

$$Dial_i^{min} \leq Dial_i \leq Dial_i^{max} \quad (7)$$

sendo que, FC – fator de crescimento de carga; $I_{carga,i}^{max}$ – corrente de carga máxima considerada através de R_i ; Icc_i^{min} – corrente de curto-circuito mínima no trecho protegido por R_i ; PS_i^{min} – ajuste mínimo de PS_i ; PS_i^{max} – ajuste máximo de PS_i ; $Dial_i^{min}$ – ajuste mínimo de $Dial_i$; $Dial_i^{max}$ – ajuste máximo de $Dial_i$.

3) Limites nos Tempos de Atuação dos Relés

Embora deseja-se que os relés atuem o mais rápido possível, eles necessitam de um tempo mínimo para entrar em operação. Entretanto, os relés não podem demorar muito para atuar de modo a evitar causar danos irreversíveis aos equipamentos (Bedekar and Bhide, 2011). Os tempos de atuação dos relés são limitados pela restrição apresentada em (8).

$$T_i^{min} \leq T_i^{pri} \leq T_i^{max} \quad (8)$$

sendo que, T_i^{min} – tempo mínimo de atuação de R_i ; T_i^{pri} – tempo de atuação de R_i , quando este atua como proteção primária; T_i^{max} – tempo máximo de atuação de R_i .

3 Algoritmo Híbrido Especializado

Nesta secção, é apresentada a metodologia híbrida utilizada para solucionar o problema da coordenação de RSDs. O fluxograma da metodologia proposta é apresentado na Figura 1. Os parâmetros k_{pi} , μ e $MaxIter$ referem-se ao tamanho da população inicial, taxa de mutação e o critério de parada, respectivamente. O AG-PLI é finalizado caso a solução incumbente não se modifique após $MaxIter$ iterações.

O AG-PLI é baseado nas ideias principais do algoritmo genético (AG) apresentado em Chu and Beasley (1997). Este AG possui algumas diferenças em relação ao AG clássico (Holland, 1975): 1) a cada iteração, apenas um descendente é gerado, e este entra na população atual se preencher os critérios de aceitação¹; 2) a FO é composta por uma função de aptidão (*fitness*) e inaptidão (*unfitness*); e 3) existe a etapa de busca local para melhorar a FO do descendente.

3.1 Codificação

Neste trabalho, os *Dials* e *PSs* são considerados variáveis de decisão no problema de otimização.

¹O descendente deve ser diferente de todos indivíduos da população atual e o seu valor de FO deve ser melhor que a do pior indivíduo.

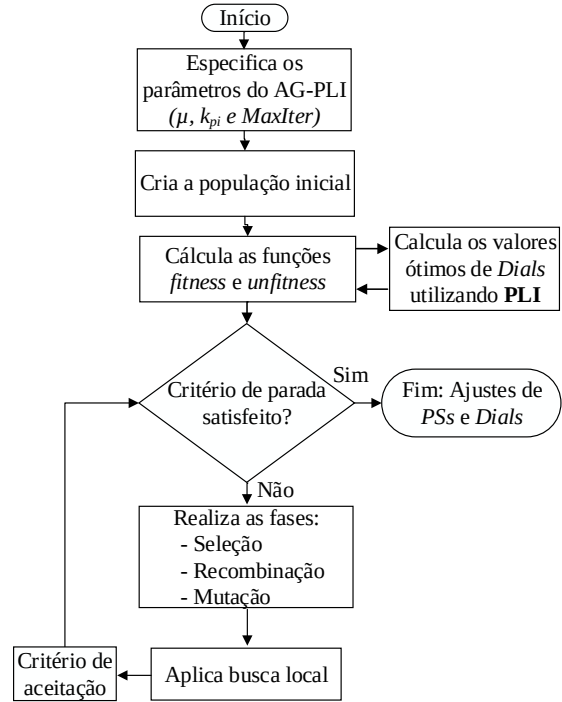


Figura 1: Fluxograma do AG-PLI.

Os *Dials* não são codificados no cromossomo, uma vez que são determinados utilizando PLI (Secção 3.3.1). Assim, é reduzido significativamente o espaço de busca. A estrutura do cromossomo é apresentada na Figura 2. É utilizada a codificação decimal nos genes, onde cada gene de PS_{gene} corresponde a um valor de PS aceito pelo seu respectivo relé, considerando seus ajustes discretos.

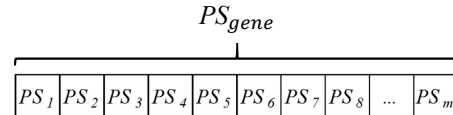


Figura 2: Exemplo do cromossomo do AG-PLI.

3.2 População Inicial

Com objetivo de obter uma população inicial de boa qualidade, os valores de PSs dos relés de cada indivíduo são escolhidos aleatoriamente, desde que satisfaçam as restrições (5) e (6). Ao limitar os valores de PS_{gene} , dos k_{pi} indivíduos, são evitadas algumas propostas ineficazes são durante a formação da população inicial.

3.3 Função Objetivo

As funções *fitness* e *unfitness* são calculadas ao decodificar as informações de PSs do cromossomo, sendo que os *Dials* são calculados utilizando PLI. Com posse dessas variáveis, a função de *fitness* é calculada utilizando (1). A função *unfitness* é computada aplicado um fator de pe-

nalização proporcional ao número de restrições violadas. As funções *fitness* e *unfitness* são combinadas para formar a FO.

3.3.1 Cálculo dos Dials Ótimos Utilizando Programação Linear Inteira

Neste trabalho, o cálculo dos *Dials* ótimos é realizado utilizando programação linear inteira (PLI), sendo possível considerar os valores discretos de *Dials*. Uma vez que, quando os relés não permitem ajustes contínuos, o arredondamento dos *Dials* pode levar à perda de seletividade (Razavi et al., 2008). Após decodificada a informação sobre os *PSs* do cromossomo, o problema da coordenação torna-se linear visto que $K_{i,j}^k$ (3) passa ser constante. Assim, apenas os *Dials* são considerados como variáveis de decisão. De forma geral, um problema de PLI pode ser formulado de acordo com as equações (9) a (12).

$$\text{Min. } \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \quad (9)$$

sujeito à

$$\mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq} \quad (10)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (11)$$

$$x_i \text{ inteiro } \forall i \quad (12)$$

sendo que, $\mathbf{f}$ e $\mathbf{x}$ – vetores linha dos coeficientes da função objetivo e de incógnitas do problema, respectivamente; $\mathbf{A}$ e $\mathbf{A}_{eq}$ – matrizes com os coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de igualdade e desigualdade, respectivamente; $\mathbf{b}$ e $\mathbf{b}_{eq}$ – vetores coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de igualdade e desigualdade, respectivamente.

Deste modo, o modelo matemático do problema da coordenação é reformulado para eliminar os efeitos da consideração dos *Dials* inteiros. A FO (1) é modificada para (13); as restrições (4), (7) e (8) são alteradas para (14), (15) e (16), respectivamente.

$$\text{Min. } \text{Passo}_{Dial} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m T_{i,i}^k \quad (13)$$

$$\text{Passo}_{Dial}(T_{protegido(i),i}^k - T_{i,i}^k) \geq \Delta T_{rele} \quad (14)$$

$$\frac{Dial_i^{min}}{\text{Passo}_{Dial}} \leq Dial_i \leq \frac{Dial_i^{max}}{\text{Passo}_{Dial}} \quad (15)$$

$$\frac{T^{min}}{\text{Passo}_{Dial}} \leq T_i^{pri} \leq \frac{T^{max}}{\text{Passo}_{Dial}} \quad (16)$$

sendo que, Passo_{Dial} corresponde ao passo de *Dial* dos relés.

Após formulado o problema da coordenação de acordo com as modificações apresentadas em (13) a (16), e considerando os valores de *Dial* como variáveis inteiras, o problema da coordenação é solucionado utilizando PLI. As abordagens normalmente utilizadas para solucionar essa

classe de problema são as técnicas de enumeração (*branch – and – bound*, por exemplo), algoritmos de corte de planos e a teoria de grupos (Bradley et al., 1977). Após a solução do problema, são fornecidos os valores de *Dials* inteiros que minimizam os tempos de atuação dos relés. Como os valores de *Dial* são originalmente discretos, é aplicada a desnormalização apresentada em (17) para todos os *Dials*.

$$Dial_i \leftarrow \text{Passo}_{Dial} \cdot Dial_i, \quad \forall i. \quad (17)$$

3.4 Seleção

A seleção dos pais é realizada pelo método da roleta, onde os indivíduos mais aptos possuem maiores chances de serem selecionados. Nesta etapa a roleta é girada duas vezes, de modo a escolher dois pais.

3.5 Recombinação

Ambos indivíduos escolhidos na fase de seleção atuam como pais no processo de recombinação, sendo utilizado a recombinação em um único ponto. Após este processo, dois descendentes são gerados, e apenas o mais apto (com melhor FO) é armazenado.

3.6 Mutação

A mutação é responsável por introduzir diversidade genética no indivíduo para que a solução possa sair de um mínimo (ou máximo) local. O número de genes mutados está relacionado com a taxa de mutação (μ). Os genes mutantes recebem um valor aleatório que satisfaz as restrições (5) e (6). O indivíduo mutado apenas é armazenado caso sua FO seja melhor do que a do não mutado.

3.7 Busca Local

Após as fases de seleção, recombinação e mutação, um novo descendente é gerado. Sendo que este pode ser factível ou infactível. Em ambos os casos, a busca local é realizada com objetivo de melhorar a qualidade do indivíduo. A busca local realiza uma busca na vizinhança de cada $PS_{gene}(i)$. A vizinhança de $PS_{gene}(i)$ corresponde aos valores de *PSs* disponíveis próximos ao valor atual de $PS_{gene}(i)$.

4 Testes e Resultados

O AG-PLI é aplicado nos sistemas de 6 e 8 barras, considerando passos de *Dial* de 0,01. Para o sistema de 6 barras, é considerado que os valores de *PSs* possuem passos de 0,01 A. Os resultados são comparados com os reportados em Corrêa et al. (2015), que também utiliza os mesmos sistemas elétricos, e considera as mesmas correntes

de curto-circuito, e os mesmos passos de *Dial* e *PS*. O AG-PLI é executado 100 vezes, e os tempos médios de execução são armazenados.

As simulações são realizadas em um computador com processador Intel® Core™ i5 CPU@3,5GHz com 16GB de RAM, no sistema operacional Windows 10 64 bits. O resolvidor utilizado para solucionar o problema de PLI é o *cplex-milp* do CPLEX®, no ambiente do MATLAB®. Este resolvidor é baseado na técnica de *branch – and – cut* que combina o *branch – and – bound* com algoritmos de cortes de planos (IBM, 2010).

4.1 Sistema de 6 Barras

O sistema de 6 barras é apresentado na Figura 3. Este sistema possui 6 barras, 7 linhas, 3 geradores e 14 RSDs. Os valores das correntes de falta, ponderados pela RTC, vistos por cada par de relés protetor-protetido, podem ser encontrados em Thangaraj et al. (2010). Os valores de *Dial* e *PS* variam de 0,05 a 1,1 e 1,25 a 1,5 A, respectivamente. É adotado $\Delta T_{rele} = 0,2$ segundo. Os relés seguem a norma IEC com curva inversa. São considerados T^{min} e T^{max} de 0,05 e 1 segundo, respectivamente.

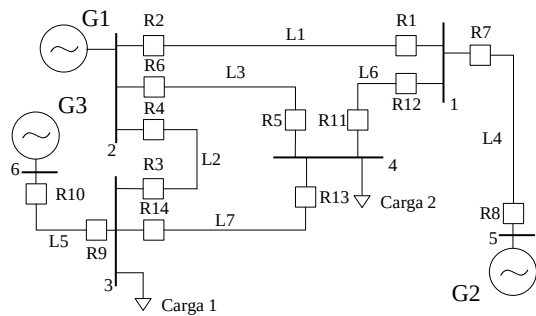


Figura 3: Diagrama unifilar do sistema de 6 barras.

Os resultados referentes aos valores de *Dial*, *PSs* e FO são apresentados na Tabela 1. É utilizado k_{pi} , $MaxIter$ e μ de 40, 500 e 5%, respectivamente. O menor intervalo entre os tempos de atuação dos pares de relés protetor-protetido foi de 0,2009 segundo, referente aos relés R_3 - R_{10} . O menor tempo de atuação da proteção primária foi de 0,1884 segundo para R_6 . Esses valores estão dentro dos limites impostos pelo problema.

Na Tabela 2, é realizado um comparativo entre o AG-PLI e a programação inteira binária (PIB) (Corrêa et al., 2015). A FO fornecida pela metodologia proposta é melhor do que a encontrada pela PIB. Isso porque as técnicas determinísticas convergem para a solução ótima global apenas em casos específicos de convexidade (Amraee, 2012). A solução encontrada pelo AG-PLI implica em uma maior velocidade no esquema de proteção. Entretanto, o tempo computacional médio demandado pelo AG-PLI foi 68,78 % maior

Tabela 1: Valores de *PSs* e *Dials* para o sistema de 6 barras.

Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>	Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>
R_1	1,38	0,11	R_8	1,25	0,05
R_2	1,46	0,19	R_9	1,25	0,05
R_3	1,25	0,10	R_{10}	1,42	0,05
R_4	1,31	0,11	R_{11}	1,44	0,07
R_5	1,25	0,05	R_{12}	1,29	0,06
R_6	1,41	0,05	R_{13}	1,44	0,05
R_7	1,25	0,05	R_{14}	1,38	0,08
FO (s)	10,3659				

do que a PIB.

Tabela 2: Comparativo entre os resultados do sistema de 6 barras.

Técnica	Tempo (s)	FO (s)
PIB (Corrêa et al., 2015)	13,08	10,5300
AG-PLI	22,0762	10,3659

4.2 Sistema de 8 Barras

Na Figura 4, é apresentado o sistema de 8 barras. Este possui 8 barras, 7 linhas, 2 geradores e 14 RSDs. O gerador indicado por RE corresponde a uma rede elétrica externa modelada com capacidade de curto-circuito de 400 MVA. Os valores das correntes de falta que sensibilizam cada par de relés protetor-protetido e o valor da RTC de cada relé podem ser encontrados em Amraee (2012). Os *Dials* podem variar de 0,1 a 1,1. Os *PSs* disponíveis são {0,5, 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5} A. Os relés seguem a norma IEC, com curva inversa. É considerado ΔT_{rele} de 0,3 segundo. Neste sistema, não são considerados limites para os tempos de atuação dos relés.

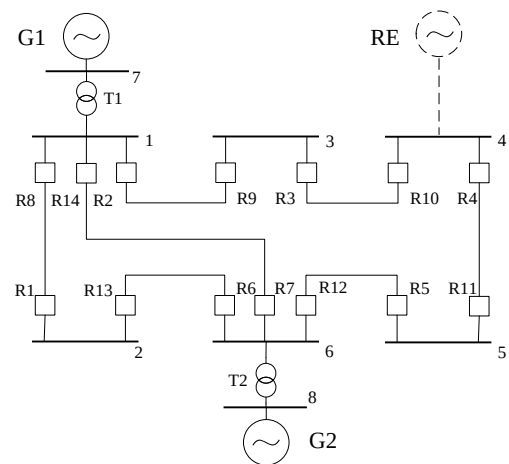


Figura 4: Diagrama unifilar do sistema de 8 barras.

Os *PSs*, *Dials* e FO fornecidos pelo algoritmo são apresentados na Tabela 3. É utilizado k_{pi} , $MaxIter$ e μ de 20, 500 e 5%, respectivamente. O menor intervalo entre os tempos de atuação dos

pares de relés protetor-prot gado foi de 0,3006 segundo referente aos relés R_{10} - R_{11} . Esse valor está dentro do limite imposto pelo problema.

Tabela 3: Valores de PS s e $Dials$ para o sistema de 8 barras.

Relé	PS (A)	$Dial$	Relé	PS (A)	$Dial$
R_1	2,50	0,10	R_8	2,50	0,17
R_2	2,50	0,28	R_9	2,50	0,15
R_3	2,50	0,24	R_{10}	2,50	0,18
R_4	2,00	0,19	R_{11}	2,50	0,19
R_5	2,50	0,10	R_{12}	2,50	0,27
R_6	2,50	0,18	R_{13}	2,50	0,10
R_7	2,50	0,26	R_{14}	2,50	0,25
FO (s)			8,6944		

Na Tabela 4, é apresentado o comparativo entre os resultados obtidos com a PIB. A metodologia proposta convergiu para a mesma solução ($FO = 8,6944$ segundos), sendo 75,27 % mais rápida do que a PIB.

Tabela 4: Comparativo entre os resultados do sistema de 8 barras.

Técnica	Tempo (s)	FO (s)
PIB (Corr�ea et al., 2015)	34,11s	8,6944
AG-PLI	8,4352	8,6944

5 Conclusões

Neste artigo, a metodologia proposta obteve sucesso em realizar a coordenação ótima de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas interconectados. A utilização de uma meta-heurística de busca global (AG) em conjunto com um otimizador local (PLI), mostrou-se eficaz para solucionar o problema da coordenação de RSDs, considerando os ajustes discretos de PS e $Dial$ disponíveis nos relés.

Os resultados mostram que a metodologia proposta é promissora, sendo possível encontrar soluções de qualidade melhor ou igual às reportadas na literatura, em tempos computacionais razoáveis. A velocidade do algoritmo é importante em esquemas de proteção em tempo real onde os relés devem ser parametrizados de forma automática a cada mudança de topologia da rede.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES/CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

Amraee, T. (2012). Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery* **27**(3): 1415–1422.

Bedekar, P. P. and Bhide, S. R. (2011). Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA-NLP approach, *IEEE Transactions on Power Delivery* **26**(1): 109–119.

Bottura, F. B., Oleskovicz, M. and Coury, Denis V. de Souza, Silvio. Ramos, M. (2014). Hybrid Optimization Algorithm for Directional Overcurrent Relay Coordination, *PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE* pp. 1–5.

Bradley, S. P., Hax, A. C. and Magnanti, T. L. (1977). *Applied Mathematical Programming*, Addison-Wesley.

Chu, P. and Beasley, J. (1997). A genetic algorithm for the generalised assignment problem, *Journal of the Operational Research Society* **48**(8): 804–809.

Corr ea, R., Cardoso, G., Araújo, O. C. and Mariotto, L. (2015). Online coordination of directional overcurrent relays using binary integer programming, *Electric Power Systems Research* **127**: 118–125.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.

IBM (2010). ILOG AMPL Version 12.2 Users Guide.

Noghabi, A. S., Sadeh, J. and Mashhadi, H. R. (2009). Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA, *IEEE Transactions on Power Delivery* **24**(4): 1857–1863.

Razavi, F., Abyaneh, H. A., Al-Dabbagh, M., Mohammadi, R. and Torkaman, H. (2008). A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination, *Electric Power Systems Research* **78**(4): 713–720.

So, C. (1997). Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination, *6th International Conference on Developments in Power Systems Protection*, Vol. 1997, IEE, pp. 66–69.

Thangaraj, R., Pant, M. and Deep, K. (2010). Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **23**(5): 820–829.

Urdaneta, A. J., Nadira, R. and Perez, L. G. (1988). Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems., *IEEE Transactions on Power Delivery* **3 n 3**(3): 903–911.