

Método de Programação Linear Inteira Mista Aplicado no Problema de Coordenação de Relés de Sobrecorrente Direcionais

Klaus T. Martin*, Adriano C. Marchesan*, Milena T. Zonin**, Olinto B. de Araújo**, Ghendy Cardoso Jr.**, Marcelo F. da Silva**

*Farroupilha Federal Institute, Jaguari, Brazil (e-mail: klaustm@gmail.com).

**Santa Maria Federal University, Santa Maria, Brazil.

Abstract: This work presents a methodology for directional overcurrent relay coordination in interconnected Power Systems using Mixed Integer Linear Programming. This approach allows for a smaller number of variables compared to other methods, resulting in a shorter simulation time. The methodology is applied in 6, 8 and 15 bus test systems to compare the results with other methods present in the literature. The results demonstrate the methodology's ability to find the optimal solution with reduced computational processing times, enabling the use of this in real-time overcurrent relay coordination applications.

Resumo: Esse trabalho apresenta uma metodologia para coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em Sistemas Elétricos de Potência interconectados utilizando Programação Linear Inteira Mista. Essa abordagem possibilita um menor número de variáveis em relação a outros métodos, resultando em um menor tempo de simulação. A metodologia é aplicada nos sistemas teste 6, 8 e 15 barras para comparar os resultados com outros métodos presentes na literatura. Os resultados demonstram a capacidade da metodologia em encontrar a solução ótima com tempos de processamento computacional reduzidos, possibilitando o uso dessa em aplicações de coordenação de relés de sobrecorrente em tempo real.

Keywords: Overcurrent Relay; Linear Programming; Relay Coordination; Power System Protection; Interconnected Power Systems.

Palavras-chaves: Relé de Sobrecorrente; Programação Linear; Coordenação de Relés; Proteção de Sistemas de Potência; Sistemas de Potência Interconectados.

1. INTRODUÇÃO

Perturbações ou anormalidades no sistema elétrico de potência (SEP) podem provocar alterações significativas nas variáveis desse, de maneira que estas alterações podem ser utilizadas para distinguir entre mudanças toleráveis ou intoleráveis para o mesmo. Para atenuar os efeitos destas anormalidades, um sistema de proteção deve ser ajustado para identificá-las no sistema elétrico, as quais, se não detectadas, podem causar danos à equipamentos ou perda extensiva de serviço. O sistema de proteção deve ser confiável, ou seja, deve operar quando solicitado na existência de alguma falha e não deve operar desnecessariamente na ausência de falhas. Para tanto, esse deve possuir características de seletividade, ao detectar a falha e isolar o menor segmento possível da rede elétrica; estabilidade, ao manter os demais trechos em operação e garantindo assim a continuidade do fornecimento; sensibilidade, ao detectar até as menores anormalidades antes que estas causem danos mais significativos; e velocidade, ao operar rapidamente quando solicitado, minimizando assim os potenciais danos (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2005).

Além disso, para atingir um nível adequado de confiabilidade, os sistemas de proteção são projetados com redundância, ou

seja, considerando a falta de confiabilidade do próprio sistema. Uma das maneiras de obter-se a redundância é através do uso de dispositivos de retaguarda, para casos de falha do dispositivo de proteção primária. Os dispositivos de retaguarda devem ser coordenados com o primário, garantindo assim a operação ordenada dos dispositivos. A coordenação dos relés de proteção é um requisito técnico importante para que um esquema de proteção seja eficaz em garantir o isolamento seletivo e rápido de seções defeituosas nos sistemas de potência.

Em sistemas de distribuição e subtransmissão, um aumento súbito de corrente é um indicador comum de anormalidade, portanto, relés de sobrecorrente direcionais (DOCR – do inglês *Direct Overcurrent Relay*) são amplamente utilizados no esquema de proteção. O objetivo da coordenação dos DOCRs é determinar os ajustes de TDS e PCS desses relés para obter um tempo de operação mínimo de acordo com as restrições do problema.

Entretanto, o processo de coordenação para topologias de rede em malha com múltiplas fontes é um problema complexo, uma vez que um mesmo relé pode ser o dispositivo primário de proteção em uma situação e o dispositivo de retaguarda em outras. Com o intuito de viabilizar a solução do problema de coordenação, este foi modelado como um problema de

otimização. O problema é não-linear e não-convexo, devido ao acoplamento existente entre as variáveis PCS e TDS, o que dificulta a obtenção da solução ótima devido a presença de máximos e mínimos locais.

Diferentes abordagens foram propostas na literatura para resolução dos modelos de coordenação baseados em otimização. Os métodos mais comuns são os baseados em técnicas evolutivas. Algoritmo Genético (RAZAVI et al., 2008), Otimização por Enxame de Partículas (ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA, 2006), Evolução Diferencial (SHIH et al., 2017), algoritmo *Seeker* (AMRAEE, 2012) e Otimização por Colônia de Formigas (SHIH; CASTILLO SALAZAR; CONDE ENRÍQUEZ, 2015) são algumas das técnicas utilizadas para encontrar o ajuste ótimo dos DOCRs. Entretanto, essas técnicas requerem um ajuste empírico dos seus parâmetros, de forma que não há a garantia de convergência para o valor ótimo global, podendo a solução ficar presa em mínimos locais.

Outros métodos de otimização do problema de coordenação são as abordagens analíticas. Embora possua uma formulação mais complexa que abordagens evolutivas, há a garantia de convergência para a solução ótima global. URDANETA et al. (1996) e CHATTOPADHYAY, SACHDEV e SIDHU (1996) modelaram a coordenação de relés de sobrecorrente como um problema de Programação Linear (PL) e utilizaram o método Simplex para solucionar o problema de PL. Em ambos os casos o ajuste de corrente foi assumido como pré-determinado. Dessa forma, as metodologias careciam de otimização, uma vez que se baseavam em palpites iniciais para os ajustes de corrente, ao invés de considerá-los variáveis do problema, e as metodologias poderiam convergir para mínimos locais. BIRLA, MAHESHWARI e GUPTA (2006) utilizaram a Programação Quadrática Sequencial para solucionar um modelo de Programação Não-Linear (PNL) o qual determinava os ajustes de corrente e tempo simultaneamente. É possível formular o problema como PL e considerar TDS e PCS como variáveis do problema e, assim, reduzir a carga computacional. Em boa parte dos casos, utiliza-se como técnica a discretização das variáveis, linearizando o modelo. CORRÊA et al. (2015) determinaram os ajustes de tempo e corrente de forma discreta. Para tanto, o problema de coordenação foi modelado através da Programação Inteira Binária (PIB), em que cada variável binária correspondia à uma combinação de tempo e corrente. Nesse caso, o tempo de processamento pode ser longo, devido ao número de variáveis existentes em virtude da discretização.

Com base nessa problemática, esse trabalho propõe uma metodologia para coordenação de DOCRs. O problema é formulado como um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Para ser possível essa formulação como PL, a variável PCS é obtida com valores discretos, enquanto a variável TDS é obtida com valores contínuos. Dessa maneira, é possível reduzir o tempo de processamento computacional, possibilitando à metodologia ser utilizada em aplicações de tempo real, no âmbito das redes elétricas inteligentes, ou *smart grids*. Para evidenciar a efetividade e as potencialidades da metodologia proposta, os resultados são comparados aos obtidos por outras metodologias existentes na literatura.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A curva de tempo de atuação vs corrente de sensibilização para relés de sobrecorrente é definida conforme (1).

$$t = TDS \times \left[\frac{\beta}{\left(\frac{I_{rele}}{PCS} \right)^\alpha - 1} \right] \quad (1)$$

Em que:

t é o tempo de operação do relé [s];

TDS é o ajuste de tempo do relé [s];

PCS é o ajuste de corrente do relé [s];

I_{rele} é a corrente de entrada do relé [A];

α e β são coeficientes padronizados que definem as características da curva do relé. A Tabela 1 apresenta os valores estabelecidos pelo padrão IEC 60255-151 (International Electrotechnical Commission, 2009).

Tabela 1. Constantes padrão IEC para curvas de DOCRs.

Característica	α	β
Normalmente Inversa	0,02	0,14
Muito Inversa	1,0	13,5
Extremamente Inversa	2,0	80,0

É possível verificar que o tempo de operação de um relé é definido ajustando seus valores de PCS e TDS . O ajuste de corrente do relé de sobrecorrente é determinado de modo que o relé não atue para a máxima corrente de carga e atue para a mínima corrente de curto-circuito entre fases. Fatores são inclusos para garantir essas duas situações, conforme (2).

$$a \times I_{Lmax} < PCS < \frac{I_{Fmin}}{b} \quad (2)$$

Em que:

PCS é o ajuste de corrente da função 51 [A];

I_{Lmax} é a máxima corrente de carga [A];

a é um fator utilizado para garantir que o relé não opere indevidamente para condições breves de sobrecarga.

Normalmente, utiliza-se valores entre 1,25 e 2,5;

I_{Fmin} é a corrente mínima de curto-circuito entre fases [A];

b é um fator utilizado para garantir que o relé opere para condições de corrente mínima de curto-circuito entre fases. Normalmente, utiliza-se o valor de 1,05 para aplicações com relés digitais.

Além disso, é necessário também garantir um intervalo mínimo de tempo entre a operação do relé primário e a operação do relé de retaguarda, conhecido como Intervalo de Tempo de Coordenação (CTI – do inglês *Coordination Time Interval*). O CTI leva em consideração o tempo de operação do disjuntor e deve ser mantido durante toda a faixa de

coordenação entre relés primário e retaguarda, conforme (3). O padrão IEEE 242-2001 apresenta uma recomendação prática de que o CTI seja mantido em pelo menos 200 ms (“IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)”, 2001).

$$t_{b_x} - t_p \geq CTI \quad (3)$$

Em que: CTI é o Intervalo de Tempo de Coordenação [s]; p é o subscrito que representa o relé primário; b_x é o subscrito que representa o x relé de retaguarda; t_{b_x} é o tempo de operação do relé de retaguarda [s]; t_p é o tempo de operação do relé primário [s].

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Tendo em vista que o problema de coordenação da proteção de sobrecorrente é não-linear, devido ao acoplamento existente entre as variáveis PCS e TDS , para formulá-lo como PL é necessário utilizar algum artifício de linearização. Neste caso, como o objetivo é obter um ajuste de corrente discreto e um ajuste de tempo contínuo, os k valores discretos de ajuste de corrente para cada relé são listados em um parâmetro PCS_{ik} . O índice i corresponde ao conjunto de relés primários, denotado por I , enquanto o índice k corresponde ao conjunto dos coeficientes discretos de cada relé i , denotado por K . Os valores do parâmetro PCS_{ik} são utilizados para calcular os valores do parâmetro $vPCS_{ik}$, conforme (4). Nota-se que essa equação corresponde à equação do tempo de atuação do relé, entretanto sem a variável de ajuste de tempo (TDS). Os valores de corrente de $I_{primario}$ correspondem aos valores de corrente de falta vistos pelos relés primários de cada trecho.

$$vPCS_{ik} = \left[\frac{\beta}{\left(\frac{I_{primario}}{PCS_{ik}} \right)^\alpha - 1} + L \right] \quad (4)$$

Em que:

PCS_{ik} é o k valor de ajuste de corrente para o relé i ;

$I_{primario}$ é a corrente de entrada do relé que atua como primário no trecho [A];

α , β , L e são coeficientes padronizados que definem as características da curva do relé.

Utilizando este coeficiente, o tempo de atuação de um relé i para um determinado valor de discretização k pode ser calculado por (5).

$$T_i = vPS_{ik} * TDS_{ik} \quad (5)$$

Em que:

T_i é o tempo de atuação do relé i ;

TDS_{ik} é o ajuste contínuo de tempo do relé i .

A variável TDS_{ik} corresponde ao ajuste contínuo de tempo do relé i correspondente ao valor de discretização k , cujo valor deve ficar entre um valor mínimo TDS_L e um valor máximo TDS_H , os quais dependem do modelo de relé que está sendo utilizado. O mesmo procedimento é realizado para os relés que atuam como retaguarda, em que os valores do parâmetro $vPCS_{pb_{jik}}$ são calculados conforme (6). Os valores de corrente de $I_{retaguarda}$ correspondem aos valores de corrente de falta vistos pelos relés que atuam como retaguarda de cada trecho.

$$vPCS_{pb_{jik}} = \left[\frac{\beta}{\left(\frac{I_{retaguarda}}{PCS_{jk}} \right)^\alpha - 1} + L \right] \quad (6)$$

Conjuntos

I corresponde ao conjunto de relés primários presentes no problema;

J_i corresponde ao conjunto de relés de retaguarda para cada relé primário i presente no problema;

K corresponde ao conjunto dos coeficientes discretos de cada relé i .

Parâmetros

CTI corresponde ao tempo mínimo de coordenação;

$vPCS_{ik}$ corresponde aos coeficientes discretos do relé primário i ;

$vPCS_{pb_{jik}}$ corresponde aos coeficientes discretos do relé de retaguarda j ;

TDS_H corresponde ao limite superior do ajuste de tempo;

TDS_L corresponde ao limite inferior do ajuste de tempo.

Variáveis

x_{ik} corresponde à variável binária, que possui valor 1 para um dos k valores de ajuste do relé i e 0 para os demais;

T_i corresponde ao tempo de atuação do relé i ;

TDS_{ik} corresponde ao ajuste de tempo k do relé i .

Modelo de Programação Linear Inteira Mista

$$\min \sum_{i \in I} T_i \quad (7)$$

Sujeito a

$$T_i = \sum_{k \in K} vPS_{ik} * TDS_{ik} \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$TDS_{ik} \geq TDS_L \cdot x_{ik} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (10)$$

$$TDS_{ik} \leq TDS_H \cdot x_{ik} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (11)$$

$$\left(\sum_{k \in K} vPSpb_{ijk} \cdot TDS_{jk} \right) - T_i \geq CTI \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (12)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (13)$$

$$TDS_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (14)$$

A função objetivo do modelo é descrita por (7), a qual busca minimizar o tempo de atuação de cada relé i presente no problema. O valor do tempo de atuação T de cada relé i é calculado no modelo através da restrição (8). A restrição (9) determina que a variável binária x_{ik} assuma o valor 1 para um determinado valor k de ajuste do relé i . Isso garante que somente um dos k valores de ajuste será escolhido para o relé i , de forma que as demais variáveis binárias do relé i recebem valor 0. A variável x_{ik} que assumir o valor 1 determina, através das restrições (10) e (11), que a variável TDS_{ik} , correspondente ao ajuste de tempo do relé i , deve assumir um valor entre os limites TDS_L e TDS_H impostos por essas restrições. Ressalta-se que, para os demais valores de k do relé i , o valor do ajuste de tempo será 0, não interferindo assim no somatório da restrição (8). A restrição (12) corresponde ao tempo mínimo de coordenação (CTI) que deve ser respeitado entre o relé primário e o relé de retaguarda. A restrição (13) corresponde à variável binária x_{ik} e a restrição (14) determina que o valor de ajuste de tempo dos relés deva ser positivo.

4. RESULTADOS

Para evidenciar as potencialidades do modelo de PLIM na abordagem do problema de coordenação de DOCRs, 3 estudos de caso são realizados, abordando os sistemas teste de 6, 8 e 15 barras. Os resultados obtidos são comparados à outras metodologias que exploraram os mesmos estudos de caso. O modelo foi processado através do *solver* comercial CPLEX ® 12.10 em um computador executando Windows 10 com Intel Core i5 3,2 GHz e 4 GB RAM.

4.1 Estudo de Caso 1: sistema teste 6 barras

O sistema teste 6 barras compreende um sistema de geração/transmissão composto por 11 linhas e 3 geradores síncronos. A proteção é formada por 22 DOCRs, os quais formam 64 pares primário-retaguarda. Os dados do sistema são descritos em (WOOD; WOLLENBERG, 1996) e os valores de corrente de curto-circuito e de carga podem ser encontrados em (ALAM; DAS; PANT, 2016). A Fig. 1 exhibe a topologia do sistema teste 6 barras.

Os critérios utilizados por ALAM, DAS e PANT (2016) correspondem a:

- TDS: ajuste contínuo entre 0,1 e 1,1;

- PCS: ajuste discreto entre 0,5 e 2,0, com passo de 0,25, limitado entre 1,25 vezes a corrente de carga máxima e 2/3 da corrente de falta mínima entre fases;
- Característica: IEC Normalmente Inversa;
- Tempo de operação do relé: limitado entre 0,1 e 4,0 segundos;
- CTI = 0,2 segundos.

Como a característica de curva é definida previamente, as variáveis de decisão para a coordenação dos DOCRs se restringem ao PCS e TDS de cada relé. A Tabela 2 apresenta os valores de PCS e TDS obtidos pelo emprego da PLIM. Para fins de comparação, a mesma tabela apresenta o ajuste obtido por SABERI e AMRAEE (2017) empregando o método da Decomposição de Benders Generalizada (GDB). É possível constatar que a PLIM é capaz de obter uma resposta equivalente. Além disso, destaca-se o tempo de processamento de 240 ms para obtenção da solução ótima. Destaca-se que os resultados não foram comparados aos obtidos por ALAM, DAS e PANT (2016) em virtude de estes considerarem uma função objetivo diferente da considerada neste trabalho e expressa em (7).

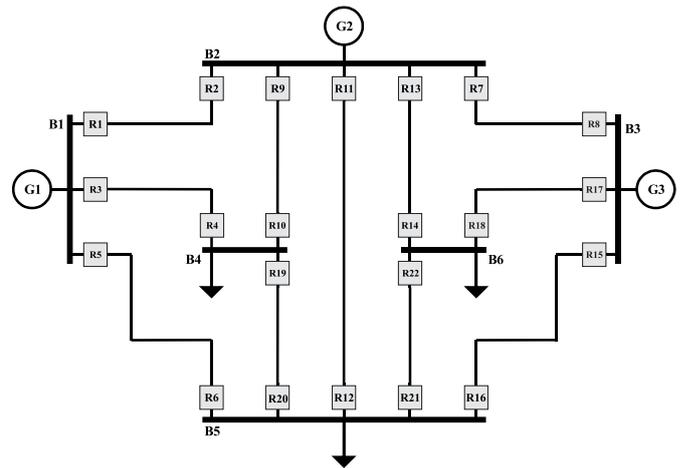


Fig. 1. Topologia do sistema teste 6 barras.

Tabela 2. Valores de TDS e PCS obtidos com os métodos GDB e PLIM.

Relé	GDB		PLIM	
	TDS	PCS	TDS	PCS
1	0,102	2,00	0,102	2,00
2	0,107	1,25	0,107	1,25
3	0,121	2,00	0,121	2,00
4	0,100	0,50	0,100	0,50
5	0,100	2,00	0,100	2,00
6	0,100	2,00	0,100	2,00
7	0,107	2,00	0,107	2,00
8	0,140	2,00	0,140	2,00
9	0,100	1,50	0,100	1,50
10	0,105	1,25	0,105	1,25
11	0,101	1,25	0,101	1,25
12	0,102	1,25	0,102	1,25
13	0,108	2,00	0,108	2,00

14	0,119	2,00	0,119	2,00
15	0,122	2,00	0,122	2,00
16	0,144	2,00	0,144	2,00
17	0,105	1,25	0,105	1,25
18	0,127	2,00	0,127	2,00
19	0,102	1,75	0,102	1,75
20	0,116	2,00	0,116	2,00
21	0,114	2,00	0,114	2,00
22	0,116	2,00	0,116	2,00
FO [s]	7.476		7.476	

4.2 Estudo de Caso 2: sistema teste 8 barras

O sistema teste utilizado para o segundo estudo de caso é o 8 barras, ilustrado pela Fig. 2. O sistema é composto por 2 geradores síncronos operando em 10 kV, 2 transformadores com relação de 1.500, 7 linhas, distribuídas entre as 8 barras, operando em 150 kV e um sistema equivalente com potência de curto-circuito de 400 MVA conectado à barra 4. O esquema de proteção do sistema é composto por 14 relés de sobrecorrente direcionais. Os dados do sistema e os valores de corrente de carga e de curto-circuito podem ser encontrados em (BRAGA; TOME SARAIVA, 1996). Esse sistema teste foi utilizado por AMRAEE (2012) para avaliar o desempenho de sua técnica com Algoritmo *Seeker* (OAS). As configurações utilizadas neste estudo de caso são as seguintes:

- TDS: ajuste contínuo entre 0,1 e 1,1;
- PCS: ajuste discreto entre 0,5, 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5;
- Característica: IEC Normalmente Inversa;
- Tempo de operação do relé: limitado entre 0,1 e 4,0 segundos;
- CTI = 0,3 segundos.

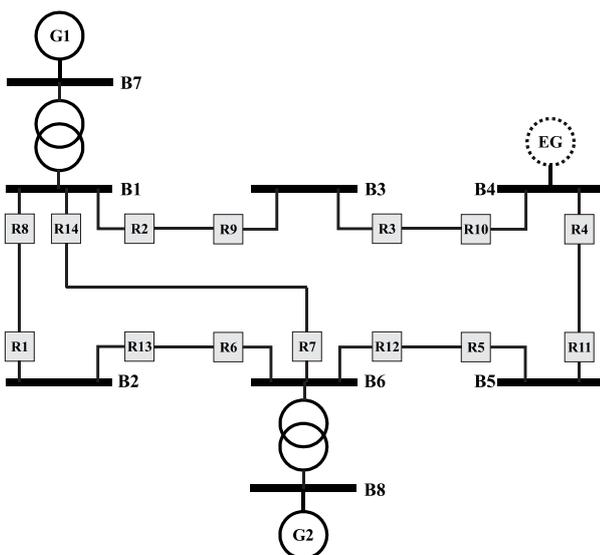


Fig. 2. Topologia do sistema teste 8 barras.

A Tabela 3 apresenta os valores de *PCS* e *TDS* obtidos pelo emprego da PLIM em comparação com os valores obtidos por OAS. Novamente, constata-se que a PLIM é capaz de encontrar uma resposta equivalente ao outro método. Neste caso o tempo de processamento do método foi de 160 ms.

Tabela 3. Valores de *TDS* e *PCS* obtidos com os métodos OAS e PLIM.

Relé	OAS		PLIM	
	TDS	PCS	TDS	PCS
1	0,113	2,0	0,113	2,0
2	0,260	2,5	0,260	2,5
3	0,225	2,5	0,225	2,5
4	0,160	2,5	0,160	2,5
5	0,100	2,5	0,100	2,5
6	0,173	2,5	0,173	2,5
7	0,243	2,5	0,243	2,5
8	0,170	2,5	0,170	2,5
9	0,147	2,5	0,147	2,5
10	0,176	2,5	0,176	2,5
11	0,187	2,5	0,187	2,5
12	0,266	2,5	0,266	2,5
13	0,114	2,0	0,114	2,0
14	0,246	2,5	0,246	2,5
FO [s]	8,4270		8,4270	

4.3 Estudo de Caso 3: sistema teste 15 barras

Neste terceiro caso é utilizado o sistema teste 15 barras, ilustrado na Fig. 3, o qual consiste em um sistema de distribuição composto por 6 geradores síncronos, 21 linhas de distribuição e uma subestação. O esquema de proteção é composto por 42 DOCRs, formando 82 pares primário-retaguarda. Dados do sistema, assim como valores de corrente de curto-circuito é possível encontrar em (AMRAEE, 2012).

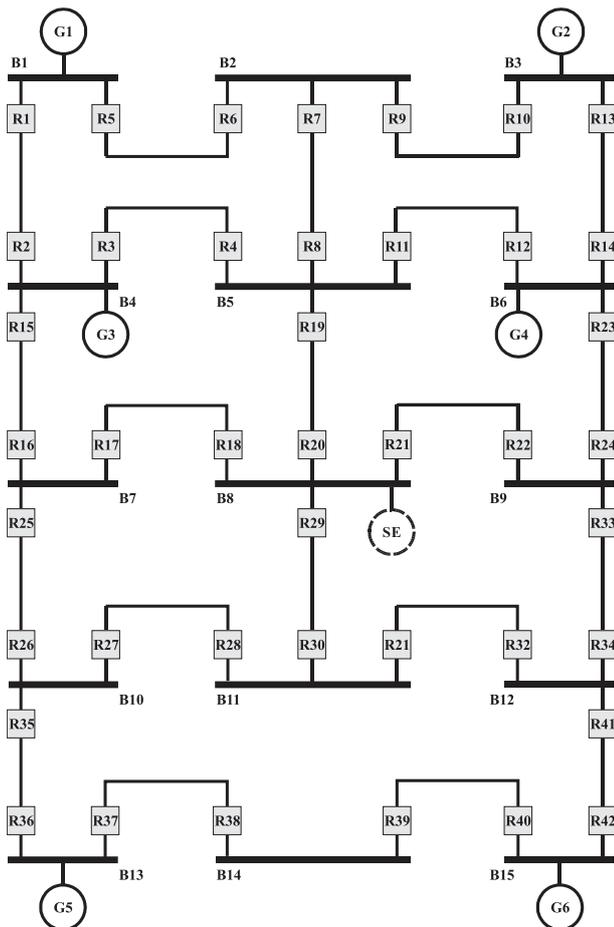


Fig. 3. Topologia do sistema teste 15 barras.

No trabalho realizado por SABERI e AMRAEE (2017), o sistema teste 15 barras foi utilizado para também avaliar o desempenho do método GDB. Os parâmetros adotados foram os seguintes:

- TDS: ajuste contínuo igual ou superior a 0,05;
- PCS: ajuste discreto entre 0,5 e 2,5, com passo de 0,5;
- Característica: IEC Normalmente Inversa;
- Tempo de operação do relé: limitado em 4,0 segundos;
- CTI = 0,2 segundos.

A Tabela 4 apresenta os valores de ajuste de PCS e TDS obtidos pelo método PLIM proposto neste trabalho em comparação com o ajuste obtido por SABERI e AMRAEE (2017) através do método GDB. O método de PLIM foi capaz de obter uma função objetivo ligeiramente menor comparada a obtida pelo método GDB. O tempo de processamento do modelo foi de 1,4 s.

Tabela 4. Valores de TDS e PCS obtidos com os métodos GDB e PLIM.

Relé	GDB		PLIM	
	TDS	PCS	TDS	PCS
1	0,050	2,5	0,050	2,5

2	0,064	1,5	0,050	2,0
3	0,078	2,5	0,073	2,5
4	0,050	2,5	0,050	2,5
5	0,083	2,5	0,080	2,5
6	0,073	2,5	0,073	2,5
7	0,080	2,5	0,076	2,5
8	0,059	2,5	0,059	2,5
9	0,076	2,5	0,076	2,5
10	0,067	2,5	0,065	2,5
11	0,071	2,0	0,050	2,5
12	0,051	2,5	0,051	2,5
13	0,073	2,5	0,073	2,5
14	0,050	2,5	0,052	2,0
15	0,050	2,5	0,050	2,0
16	0,056	2,5	0,055	2,5
17	0,060	2,5	0,060	2,5
18	0,050	2,0	0,050	2,0
19	0,067	2,5	0,067	2,5
20	0,050	2,5	0,050	2,5
21	0,050	2,5	0,050	2,5
22	0,063	2,5	0,063	2,5
23	0,107	1,0	0,054	2,0
24	0,051	2,5	0,051	2,5
25	0,076	2,5	0,076	2,5
26	0,063	2,5	0,062	2,5
27	0,074	2,5	0,074	2,5
28	0,096	2,5	0,096	2,5
29	0,061	2,5	0,061	2,5
30	0,062	2,5	0,062	2,5
31	0,071	2,5	0,071	2,5
32	0,062	2,5	0,062	2,5
33	0,097	2,5	0,097	2,5
34	0,090	2,5	0,090	2,5
35	0,079	2,5	0,079	2,5
36	0,069	2,5	0,069	2,5
37	0,091	2,5	0,091	2,5
38	0,091	2,5	0,091	2,5
39	0,084	2,5	0,084	2,5
40	0,095	2,5	0,095	2,5
41	0,098	2,5	0,098	2,5
42	0,057	2,5	0,057	2,5
FO [s]	9,371		9,144	

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma metodologia para coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em Sistemas Elétricos de Potência utilizando Programação Linear Inteira Mista. Em virtude da não-linearidade do problema, a variável PCS foi discretizada. Desta maneira, foi obtido o ajuste de corrente de forma discreta e o ajuste de tempo de forma contínua. Como resultado dessa formulação o número de variáveis no modelo foi reduzido e, conseqüentemente, reduziu-se o tempo de processamento computacional para encontrar a solução ótima, o que torna a metodologia compatível para aplicações de coordenação de DOCRs em tempo real. Além disso, nos três estudos de caso realizados, os resultados evidenciaram a

potencialidade da metodologia em rapidamente encontrar a solução ótima para o problema de coordenação.

REFERÊNCIAS

- ALAM, M. N.; DAS, B.; PANT, V. An interior point method based protection coordination scheme for directional overcurrent relays in meshed networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 81, p. 153–164, out. 2016.
- AMRAEE, T. Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 3, p. 1415–1422, 2012.
- BIRLA, D.; MAHESHWARI, R. P.; GUPTA, H. O. A new nonlinear directional overcurrent relay coordination technique, and banes and boons of near-end faults based approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 3, p. 1176–1182, 2006.
- BRAGA, A. S.; TOME SARAIVA, J. **Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the Simplex method**. Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96). **Anais...IEEE**, 1996Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/551243/>>
- CHATTOPADHYAY, B.; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S. An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, p. 165–173, 1996.
- CORRÊA, R. et al. Online coordination of directional overcurrent relays using binary integer programming. **Electric Power Systems Research**, v. 127, p. 118–125, 2015.
- HEWITSON, L.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power System Protection**. [s.l.] Elsevier Science, 2005.
- IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)**. **IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book]**, 2001.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60255-151:2009 Measuring relays and protection equipment - Part 151: Functional requirements for over/under current protection**, 2009.
- RAZAVI, F. et al. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, v. 78, n. 4, p. 713–720, abr. 2008.
- SABERI, H.; AMRAEE, T. Coordination of directional overcurrent relays in active distribution networks using generalised benders decomposition. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 16, p. 4078–4086, 9 nov. 2017.
- SHIH, M. Y. et al. Enhanced differential evolution algorithm for coordination of directional overcurrent relays. **Electric Power Systems Research**, v. 143, p. 365–375, 2017.
- SHIH, M. Y.; CASTILLO SALAZAR, C. A.; CONDE ENRÍQUEZ, A. Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimisation. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 9, n. 14, p. 2040–2049, 2015.
- URDANETA, A. J. et al. Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, p. 122–128, 1996.
- WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. **Power Generation, Operation and Control**. **John Wiley & Sons Inc, America**, 1996.
- ZEINELDIN, H. H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization. **Electric Power Systems Research**, v. 76, n. 11, p. 988–995, 2006.