

Otimização multiobjetivos da confiabilidade de alimentadores de distribuição frente as descargas atmosféricas

R. J. Cabral^{#1,3}, A. S. Bretas^{#2}, R. C. Leborgne^{#3}, M. O. Oliveira^{#1}, J. A. Morales^{#4}

^{#1} *Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, N3365BOG, Oberá, Argentina*

^{#1} robert_rjc@hotmail.com

^{#2} *University of Florida (UFL), Gainesville, 32611, Florida, USA*

^{#3} *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Paulo Gama, 110 - 90040-060, Porto Alegre, Brasil*

^{#4} *Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Calle Vieja, 010150, Cuenca, Ecuador*

Resumo— Este trabalho apresenta a aplicação prática de um modelo de otimização mediante a seleção de estruturas e aterramentos para ser utilizado como sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). A metodologia considera o balanço ótimo entre as metas considerando a minimização dos investimentos do sistema e dos indicadores de confiabilidade dados por interrupções momentâneas e permanentes em redes de distribuição. O modelo matemático de otimização considera a seleção de diferentes tipos de estruturas: 1- estrutura normal sem blindagem; e 2 - estruturas com blindagem ligadas a um sistema de aterramento. A função objetivo considera restrições que incluem aspectos técnicos e econômicos da implementação do SPDA. Além disso, é apresentado um estudo de caso no qual um alimentador de distribuição de teste de 4 barras é considerado. Os resultados do teste destacam a generalidade do modelo matemático de otimização e ilustram o potencial da aplicação em sistemas de distribuição reais. É importante ressaltar que a metodologia de otimização é atualmente utilizada por uma Concessionária de Energia Elétrica como ferramenta orientada para a confiabilidade dos sistemas de distribuição considerando diferentes tipos de estruturas-aterramentos como SPDA.

Palavras chave— *Confiabilidade, Descargas Atmosféricas, Método de Otimização, Programação Multiobjetivos, SPDA.*

I. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição, se comparadas às demais linhas de níveis de tensão superiores, são consideradas mais numerosas e de estrutura mais complexa, pois um Sistema Elétrico de Potência (SEP) típico pode ter a metade de seu capital aplicado nos alimentadores de distribuição. Por décadas, as concessionárias de energia elétrica do mundo inteiro têm trabalhado na melhoria da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) fornecida aos seus consumidores [1]. Uma crescente preocupação destas empresas, e tema de grande interesse da sociedade, é a interação entre o fenômeno da descarga atmosférica e os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE). Procura-se, neste assunto, o desenvolvimento e melhoria do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) devido aos efeitos indesejados das descargas atmosféricas. A crescente preocupação por parte das concessionárias em melhorar o sistema de proteção, assim

como os índices de QEE dos SEP ante a interação com as descargas atmosféricas, tornou estes assuntos um grande desafio no ambiente acadêmico.

Sobretensões de origem atmosférica são uma das principais causas de faltas e avarias em redes de distribuição de energia elétrica. Elas podem causar interrupções momentâneas ou permanentes [2]-[3]. O cálculo deste tipo de sobretensão é realizado diante de muitas incertezas, dada a natureza aleatória do raio e o conhecimento impreciso dos seus principais parâmetros [4].

Faltas no sistema elétrico, devido às descargas atmosféricas, produzem uma degradação dos indicadores da qualidade de serviço de distribuição de energia elétrica, definidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [5].

Os distúrbios da QEE causam a insatisfação dos consumidores e grandes perdas econômicas para as companhias elétricas e para a sociedade. Estima-se que as descargas atmosféricas produzem 70% dos desligamentos em linhas de transmissão e de 30% a 60% dos desligamentos em redes de distribuição [6]-[7].

Em regiões com alta densidade de descargas atmosféricas, a principal prática de proteção para evitar que se sucedam falhas no SEP consiste na colocação de cabo de blindagem ou cabo de guarda sobre os condutores das fases [3]. Algumas empresas distribuidoras colocam captor Franklin e/ou descarregador para-raios nos postes próximos, nos quais existem transformadores de distribuição. O cabo de blindagem e o captor Franklin são conectados eletricamente através das estruturas (metálicas) ou com cabo de descida (poste de madeira ou concreto) aos aterramentos elétricos. Desta forma, direcionam-se para o solo as correntes de eventuais descargas incidentes ou induzidas. Atualmente, estas metodologias são utilizadas pelas Concessionárias para melhorar a confiabilidade do sistema e obter assim benefícios técnicos e econômicos [8]-[13].

As descargas indiretas são o principal motivo de desligamentos em redes com tensão nominal inferior a 69kV,

sendo que, para linhas com tensões de operação maiores, possuem sensibilidade menor [3]. Em linhas blindadas com cabos de guarda (linhas com tensão nominal superior a 69kV) a possibilidade de ocorrer desligamento por uma descarga nas proximidades da linha é significativamente reduzida. Especificamente para linhas de 69kV, o emprego (ou não) desses cabos depende da filosofia adotada por cada concessionária de energia, sendo comuns as duas situações [14].

As Concessionárias de Energia Elétrica aproveitam suas experiências passadas, dados históricos de confiabilidade e outras considerações técnicas para selecionar o tipo de estrutura e sistemas de aterramentos considerando o sistema de proteção existente (chaves, religadores e fusíveis). Métodos matemáticos de otimização, como programação linear inteira mista (PLIMM), provaram atingir a solução global ideal em um número finito de etapas [15]. Portanto, neste trabalho, um sistema reduzido é utilizado para testar o modelo matemático baseado no PLIMM proposto por [16] para otimização dos indicadores de confiabilidade *SAIFI* (*System Average Interruption Frequency Index*) e *MAIFI_E* (*System Average Interruption Event Frequency Index*). O modelo considera interrupções momentâneas e permanentes, bem como o número de clientes afetados em uma estratégia de projeto SPDA, aproveitando os custos inerentes à solução.

A solução ótima do modelo é encontrada usando solvers comerciais que garantem a solução global ideal para os modelos PLIMM [15]. Para avaliar o modelo de otimização proposto, é utilizado um sistema de teste composto por 3 seções de linhas de um alimentador real. Os resultados dos testes mostram a viabilidade e generalidade do modelo de otimização proposto.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. A seção II trata da sequência do cálculo da taxa de falhas por descargas atmosféricas e indicadores de confiabilidade. Na seção III, mostra o modelo de otimização dos indicadores de confiabilidade do sistema usando PLIMM. O estudo de caso e os resultados são apresentados na seção IV. A seção V descreve as conclusões.

II. CÁLCULO DA TAXA DE FALHAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E DOS INDICADORES DE CONFIABILIDADE

Uns dos trabalhos pioneiros no cálculo da taxa de falhas em linhas aéreas foi desenvolvido e publicado em 1954 [17]. Os estudos tratam de vários aspectos de sobretensões causadas por descargas atmosféricas em linhas aéreas, a determinação da frequência de ocorrência de descargas diretas e indiretas e o cálculo da taxa total de falhas [3].

A. Taxa de Falhas por Descargas Atmosféricas

O número de descargas de contorno totais sobre uma rede aérea de distribuição é o somatório do número de falhas por descargas diretas e indiretas, como mostrado em (2). Todas as descargas de contorno devido a falhas por descargas diretas (3) e indiretas (4) são assumidas como causadoras de faltas no sistema [3]. A taxa de falhas por descargas atmosféricas em alimentadores de distribuição é quantificada por N_{Total} .

$$N_{Total} = N_{dir} + N_{ind} \quad (2)$$

$$N_{dir} = N_g \left(\frac{28h_{eficaz}^{0.6} + b}{10} \right) P(I_0 \geq i_0) (1 - (Sf_{der} + Sf_{izq})) \quad (3)$$

$$N_{ind} = N_\rho N_g \left(\frac{h_{eficaz}}{10} \right) P(I_0 \geq i_0) \quad (4)$$

Onde:

N_{Total} é o número de descargas de contorno totais (falhas/100km/ano);

N_{ind} é o número de descargas de contorno por tensões induzidas (falhas/100km/ano);

N_{dir} é o número de descargas de contorno devido a descargas diretas (falhas/100km/ano);

b é a largura da estrutura ou distância máxima entre condutores (m);

Sf_{dir} e Sf_{esq} são os fatores de blindagem para os lados direito e esquerdo da rede;

N_ρ é o número de descargas indiretas (falhas/100km/ano), obtido na figura 5 na pág. 19 [3];

N_g é a densidade de descargas à terra (raios/100km²/ano);

h_{eficaz} é a altura real da estrutura ou altura eficaz (m);

$P(I_0 \geq i_0)$ é a probabilidade de que a corrente de pico da primeira descarga de retorno I_0 seja maior ou igual que i_0 [3].

B. Indicadores de Confiabilidade

As descargas atmosféricas podem ser por impacto direto no alimentador ou por descargas indiretas nas proximidades dos alimentadores, ambas produzem sobretensões críticas e podem causar interrupções momentâneas ou permanentes [1], [3]. O cálculo deste tipo de sobretensões é feito considerando muitas incertezas, dada a natureza aleatória do raio e o conhecimento impreciso de seus principais parâmetros [19].

As interrupções sustentadas e momentâneas resultantes de faltas permanentes e temporárias, respectivamente, são consequência da atuação do sistema de proteção do alimentador. Nota-se que: *i*)- a interrupção sustentada ocorre devido à atuação de um fusível ou religador para eliminar uma falta permanente, ou devido à atuação de um fusível para eliminar uma falta temporária; *ii*)- a maioria das descargas de contorno disruptivas resulta em faltas temporárias, enquanto apenas uma pequena fração das descargas de contorno disruptivas resulta em faltas permanentes.

O número de faltas permanente e de faltas temporárias é calculado a partir da taxa de faltas permanentes de acordo com as equações (5) e (6).

$$\gamma = \Gamma \cdot N_{Total} \quad (5)$$

$$\lambda = (1 - \Gamma) \cdot N_{Total} \quad (6)$$

Onde:

γ é o número de faltas permanentes (faltas/100km/ano);

Γ é a relação entre o número de faltas permanentes e o número total de faltas;

λ é o número de faltas temporárias (faltas/100km/ano).

Os indicadores $SAIFI$ e $MAIFI_E$ são utilizados pelas Concessionárias de Energia Elétrica e as Agências Reguladoras na avaliação da confiabilidade dos SDEE e no estabelecimento de limites de continuidade [20] de acordo com (7) e (8).

$$SAIFI = \sum_{i=1}^{N_{cTotal}} \frac{NIS_i}{N_{cTotal}} \quad (7)$$

$$MAIFI_E = \sum_{i=1}^{N_{cTotal}} \frac{NEIM_i}{N_{cTotal}} \quad (8)$$

Onde:

NIS_n é o número de interrupções sustentadas do n -ésimo consumidor (interrupções/ano);

$NEIM_n$ é o número de eventos de interrupção momentânea do n -ésimo consumidor (interrupções/ano);

N_{cTotal} é o número total de consumidores do alimentador.

C. Fluxograma de Cálculo da Confiabilidade do SDEE

A metodologia utilizada para o cálculo dos indicadores de confiabilidade é apresentada no fluxograma da Fig. 1. O fluxograma mostra esquematicamente a sequência de cálculo necessária para a estimativa da quantidade anual de interrupções permanentes e momentâneas em um alimentador de distribuição. Mediante uma base de dados do sistema de distribuição, cada um dos componentes do sistema é modelado mediante o software de transitórios eletromagnéticos ATPDraw [23]. Com a variação de diferentes parâmetros se obtém um universo de resultados. Deste modo se estima a corrente crítica $i_{critica}$ que produz a descarga de contorno nos isoladores para logo determinar o número de descargas de contorno totais N_{Total} sobre uma rede aérea de distribuição. Conhecendo os dados do sistema e os tipos de proteção são calculados os indicadores de confiabilidade do SDEE.

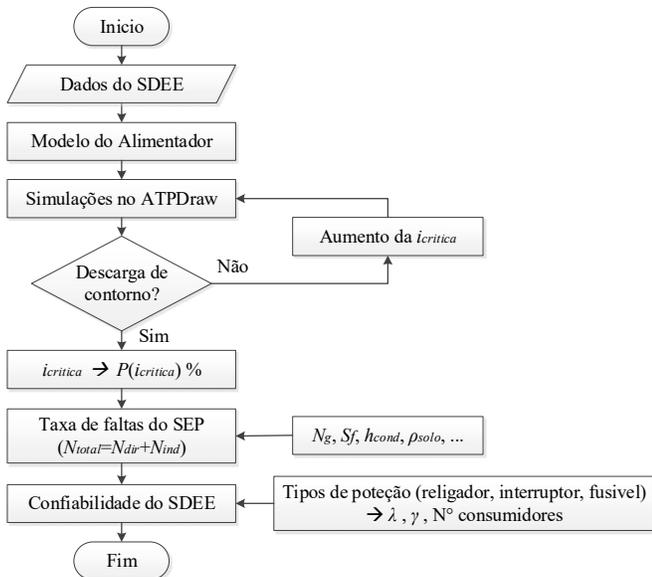


Fig. 1. Fluxograma do cálculo da confiabilidade do SDEE.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

A. Sistemas de Proteção Contra as Descargas Atmosféricas

A avaliação do desempenho dos sistemas de distribuição sob condições de descargas atmosféricas requer a modelagem dos componentes do SDEE na análise de transitórios eletromagnéticos. Vários estudos foram publicados sobre modelagem de sistemas de potência em análises transitórios [3], [4]. Neste trabalho, os modelos e parâmetros do sistema são utilizados de acordo com [8] - [12].

Atualmente, as concessionárias de distribuição utilizam diversas configurações de estruturas. A Fig. 2 ilustra os diferentes tipos de estruturas (postes e cruzetas) consideradas neste trabalho: (a) sem blindagem, (b) com Franklin captor e (c) com cabo de guarda; onde a distância $d = 1$ m.

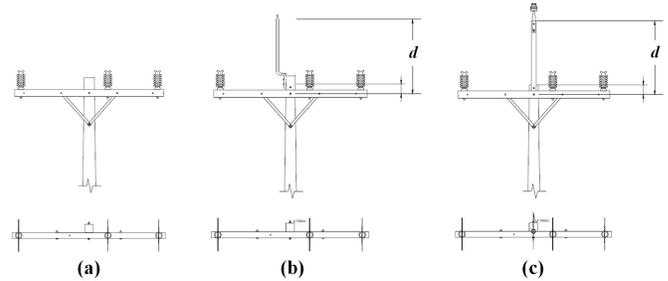


Fig. 2. Estruturas: (a) sem blindagem; (b) com captor Franklin e (c) com cabo de guarda.

A Fig. 3 ilustra a configuração do aterramento considerado neste trabalho. Os condutores são de cobre com um diâmetro de 19 mm e comprimento $L = 2,4$ m. Os condutores utilizados na interligação do aterramento e os cabos de descida das estruturas são de cobre com diâmetros que variam de 4 a 2AWG. As conexões são feitas por conectores de parafuso, tipo cunha ou soldas exotérmicas.

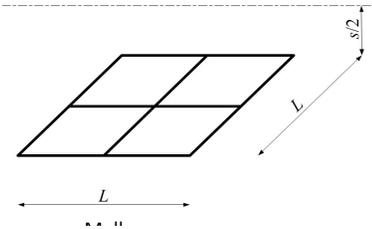


Fig. 3. Aterramento tipo malha utilizado em sistemas de distribuição [25].

B. Modelagem dos Componentes e Parâmetros de Simulação

Para simular sobretensões devido as descargas atmosféricas diretas e/ou surtos induzidos produzidos por descargas indiretas na vizinhança do alimentador de distribuição, o software de transitórios eletromagnéticos ATPDraw [23] e sua ferramenta TACS-MODELS [24] são usados. Com o ATPDraw, vários casos foram simulados, onde é determinada a corrente crítica produzida pela descarga disruptiva nas extremidades do isolador para cada tipo de estrutura (combinação de poste e aterramento). As linhas foram modeladas com parâmetros distribuídos dependentes da frequência com o modelo JMarti; as cargas através de blocos

ZIP; os aterramento, condutores e postes de interligação foram modelados com parâmetros concentrados.

As condições de simulação foram consideradas: a amplitude da corrente de descarga foi variada entre 0,1kA - 20kA; a resistividade do solo varia entre 100 e 2000 $\Omega\cdot m$; e o fator de blindagem adotaram-se valores de blindagem nulos ($S_f = 0$) para regiões de campo aberto sem vegetação; e em regiões com árvores ou prédios nas cidades adotou-se valores unitários de blindagem ($S_f = 1$), para todas as configurações de estruturas (combinações de postes e aterramento).

IV. MODELO DE OTIMIZAÇÃO DOS INDICADORES DE CONFIABILIDADE UTILIZANDO PLIMM

O modelo PLIMM visa atingir 3 objetivos simultaneamente: $SAIFI$, $MAIFI_E$ e o custo do investimento. Este modelo é formulado como um problema de Programação Linear Inteira Mista Multi-objetivos (PLIMM), visando o equilíbrio ideal entre estes objetivos. A programação por metas é uma técnica de otimização multiobjetivo baseada no conceito de satisfazer uma série de objetivos, tentando alcançar um conjunto de objetivos o mais próximo possível [21].

A Fig. 4 mostra o diagrama de fluxo que mostra a metodologia proposta para otimizar a confiabilidade do SDEE formulado como um problema PLIMM e medido pelos indicadores de confiabilidade $SAIFI$ e $MAIFI_E$ considerando os custos de investimento.

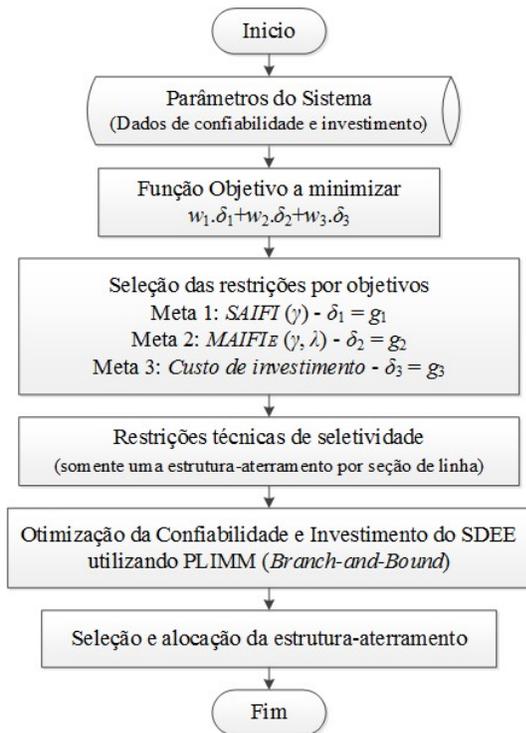


Fig. 4. Fluxograma do modelo PLIMM para otimização dos indicadores de confiabilidade e investimento do sistema.

O método de programação por objetivos é utilizado neste trabalho, a ideia básica é que os níveis de aspiração sejam especificados para a função objetivo, minimizando a soma ponderada dos desvios destes níveis de aspiração. Isso é

conhecido como programação de metas ponderada. Uma função objetivo (FO) em conjunto com restrições com um nível de aspiração de cada objetivo. Os níveis de aspiração são selecionados para que não possam ser alcançados simultaneamente. A formulação algébrica do modelo de programação de metas foi apresentada pela primeira vez em [22]. As metas são definidas como:

- Meta 1 é dado pelo indicador $SAIFI$;
- Meta 2 é dado pelo indicador $MAIFI_E$;
- Meta 3 é dado pelo custo de investimento da Concessionária.

As restrições são a seleção de um único conjunto de estrutura-aterramento para cada seção da linha do alimentador. Neste trabalho utiliza-se o modelo matemático de otimização PLIMM proposto em [16] para validação do mesmo por meio de um sistema teste reduzido de 4 barras descrito na seção V.

V. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

A. Sistema Teste de 4 Barras

Para o estudo de caso, é utilizado um sistema teste de 4 barras e 3 seções de linhas correspondentes à linha 1, linha 3 e linha 4 do alimentador de distribuição descrito na Fig. 5.

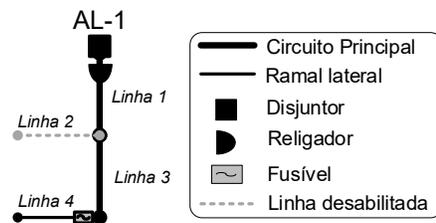


Fig. 5. Diagrama unifilar do sistema teste de 4 barras.

A variável binária, definida como x_{ij} , mostra o aterramento da estrutura localizado na seção de linha i . As combinações possíveis de estrutura-aterramento j são descritas a seguir:

- 1- SB (estrutura sem blindagem);
- 2- CF_Malha (estrutura com captor Franklin e aterramento tipo malha);
- 3- CG_Malha (estrutura com cabo de guarda e aterramento tipo malha).

A aplicação prática do modelo PLIMM é testada e mostrada para obter simultaneamente os indicadores de confiabilidade desejados ($SAIFI$ e $MAIFI_E$) e o investimento do sistema ($Custo_{investimento}$). As combinações possíveis são mostradas na Tabela 1, que é classificada de acordo com os valores de investimento crescentes para que a comparação entre o valor da restrição e o valor simulado pelo algoritmo de otimização PLIMM possa ser feita.

Para as estruturas existentes (sem blindagem), o investimento é nulo $Custo_{investimento}^{Min} = R\$ 0,00$. Nessa condição, os indicadores de confiabilidade são $SAIFI^{Max} = 0,158227$ (int. sust./ano), $MAIFI_E^{Max} = 0,825548$ (int. mom./ano). Por outro lado, quando são alocadas estruturas com cabo de guarda e aterramento tipo malha, os indicadores de confiabilidade são $SAIFI^{Min} = 0,078618$ (int. sust./ano), $MAIFI_E^{Min} = 0,410189$ (int. mom./ano). Neste caso, o valor de investimento é $Custo_{investimento}^{Max} = R\$ 11.567,00$.

TABELA 1. COMBINAÇÕES POSSÍVEIS DE ESTRUTURAS-ATERRAMENTOS VS INDICADORES DE CONFIABILIDADE E INVESTIMENTO – EM ORDEM CRESCENTE DE INVESTIMENTO.

Comb. n°	Linha 1	Linha 3	Linha 4	Invest [RS]	SAIFI [int.sust./ano]	MAIFI _E [int.mom./ano]
1	SB	SB	SB	0	0,158227	0,825548
2	SB	SB	CF_Malha	2452	0,158044	0,723405
10	CF_Malha	SB	SB	2578	0,133269	0,739493
4	SB	CF_Malha	SB	3329	0,126000	0,714430
3	SB	SB	CG_Malha	3393	0,157973	0,683805
19	CG_Malha	SB	SB	3568	0,123593	0,706130
7	SB	CG_Malha	SB	4607	0,113506	0,671351
11	CF_Malha	SB	CF_Malha	5030	0,133086	0,637349
5	SB	CF_Malha	CF_Malha	5781	0,125817	0,612287
13	CF_Malha	CF_Malha	SB	5907	0,101042	0,628375
12	CF_Malha	SB	CG_Malha	5971	0,133015	0,597749
20	CG_Malha	SB	CF_Malha	6020	0,123410	0,603986
6	SB	CF_Malha	CG_Malha	6722	0,125746	0,572687
22	CG_Malha	CF_Malha	SB	6897	0,091366	0,595012
21	CG_Malha	SB	CG_Malha	6961	0,123339	0,564386
8	SB	CG_Malha	CF_Malha	7059	0,113323	0,569207
16	CF_Malha	CG_Malha	SB	7185	0,088548	0,585296
9	SB	CG_Malha	CG_Malha	8000	0,113252	0,529607
25	CG_Malha	CG_Malha	SB	8174	0,078872	0,551933
14	CF_Malha	CF_Malha	CF_Malha	8359	0,100859	0,526231
15	CF_Malha	CF_Malha	CG_Malha	9300	0,100788	0,486631
23	CG_Malha	CF_Malha	CF_Malha	9349	0,091183	0,492869
17	CF_Malha	CG_Malha	CF_Malha	9637	0,088365	0,483152
24	CG_Malha	CF_Malha	CG_Malha	10290	0,091112	0,453269
18	CF_Malha	CG_Malha	CG_Malha	10578	0,088294	0,443552
26	CG_Malha	CG_Malha	CF_Malha	10626	0,078689	0,449789
27	CG_Malha	CG_Malha	CG_Malha	11567	0,078618	0,410189

TABELA 2. RESULTADOS DO MODELO PLIMM PARA OS 3 CENÁRIOS.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Combinação n°	11	25	26
g_1 [int./ano]	0,13	0,078	0,078
δ_1 [int./ano]	0,003	0,0009	6,89x10 ⁻⁴
SAIFI [int./ano]	0,133	0,0789	0,078689
g_2 [int./ano]	0,63	0,55	0,449
δ_2 [int./ano]	0,007	0,0019	7,9x10 ⁻⁴
MAIFI _E [int./ano]	0,637	0,5519	0,449789
g_3 [RS]	5.000,00	8.200,00	10.700,00
δ_3 [RS]	30,00	25,00	74,00
Custo Invest. [RS]	5.030,00	8.175,00	10.626,00
FO	0,031	0,058	0,001

Pode-se observar que os resultados das simulações estão de acordo com os valores das metas g_1 , g_2 e g_3 correspondentes aos objetivos SAIFI, MAIFI_E e Custo_{investimento}, respectivamente, mostrados na Tabela 2. Para cada cenário, a metodologia de seleção e alocação de estrutura-aterramento prioriza o menor valor possível dos desvios padrões δ_1 , δ_2 e δ_3 , de acordo com os pesos w_1 , w_2 e w_3 .

Os resultados da FO calculada para os valores metas dos cenários 1, 2 e 3 para cada combinação possível de estruturas são apresentados na Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

De acordo com (9), os valores máximos são utilizados para calcular os fatores de normalização ou pesos w_1 , w_2 e w_3 da função objetivo FO, e são dados por:

$$w_1 = 1/(SAIFI^{Máx}) = 6,32 \text{ (int. sust./ano)}^{-1};$$

$$w_2 = 1/(MAIFI_E^{Máx}) = 1,2113 \text{ (int. mom./ano)}^{-1} \text{ e};$$

$$w_3 = 1/(Custo_{investimento}^{Máx}) = 0,00008645 \text{ (R\$)}^{-1}.$$

Para a análise do estudo de confiabilidade, é preciso considerar diversos casos de estudo onde são utilizados diferentes valores das metas g_1 , g_2 e g_3 segundo (9). A seguir, são descritos os cenários para validar o modelo de otimização simultânea dos indicadores de confiabilidade e investimento total formulado como problema PLIMM. Para cada cenário, são quantificadas as metas g_1 , g_2 e g_3 para os objetivos SAIFI, MAIFI_E e Custo_{investimento}, respectivamente.

• **Cenário 1:**

$$g_1 = SAIFI = 0,13 \text{ (int. sust./ano)};$$

$$g_2 = MAIFI_E = 0,63 \text{ (int. mom./ano)} \text{ e};$$

$$g_3 = Custo_{investimento} = \text{R\$}5.000,00.$$

• **Cenário 2:**

$$g_1 = SAIFI = 0,08 \text{ (int. sust./ano)};$$

$$g_2 = MAIFI_E = 0,55 \text{ (int. mom./ano)} \text{ e};$$

$$g_3 = Custo_{investimento} = \text{R\$}8.200,00.$$

• **Cenário 3:**

$$g_1 = SAIFI = 0,078 \text{ (int. sust./ano)};$$

$$g_2 = MAIFI_E = 0,449 \text{ (int. mom./ano)} \text{ e};$$

$$g_3 = Custo_{investimento} = \text{R\$}10.700,00.$$

Os resultados obtidos do modelo matemático de otimização utilizando PLIMM são apresentados na Tabela 2. As metas g_1 , g_2 e g_3 , correspondentes aos objetivos SAIFI, MAIFI_E e Custo_{investimento}, respectivamente, são marcadas na cor azul, e os resultados da simulação na cor preta.

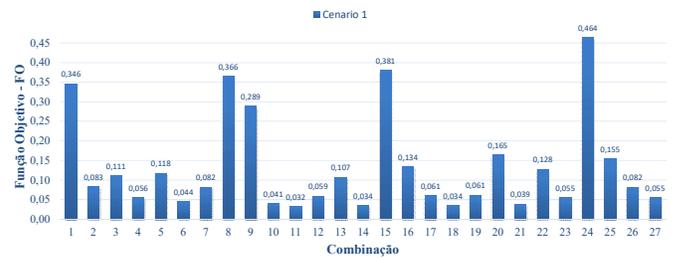


Figura 6. Função objetivo para cada combinação de estrutura-aterramento – Cenário 1.

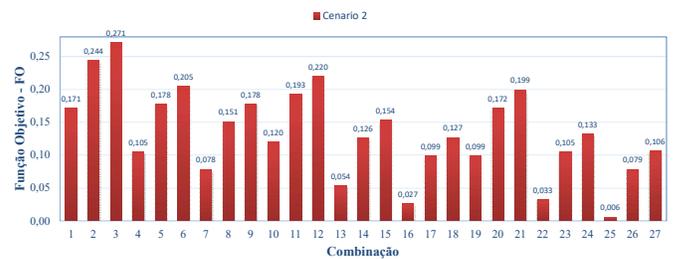


Figura 7. Função objetivo para cada combinação de estrutura-aterramento – Cenário 2.

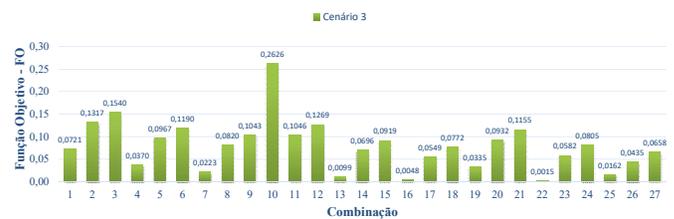


Figura 8. Função objetivo para cada combinação de estrutura-aterramento – Cenário 3.

Pode observar-se na Figura 6 que a combinação 11 foi a que forneceu a menor FO para o cenário 1. Este resultado

coincide com o obtido pelo modelo PLIMM. Na Figura 7, observa-se que a combinação 25 resultou na menor FO para o cenário 2. Este resultado coincide com o obtido pelo modelo PLIMM. Finalmente, a Figura 8 mostra que a combinação 26 fornece a menor FO para o cenário 3 validando o resultado fornecido pelo modelo PLIMM.

VI. CONCLUSÕES

Um modelo matemático de otimização usando o PLIMM proposto por [16] foi testado para a seleção de SPDA em sistemas de distribuição. A formulação do modelo é usada para selecionar estruturas e aterramento, a fim de alcançar um equilíbrio ideal entre os desvios dos indicadores de confiabilidade ($SAIFI$ e $MAIFI_E$) e o custo de investimento do sistema ($Custo_{investimento}$). Três tipos de topologias usadas como SPDA foram testadas em cada seção do alimentador para obter a solução ideal. Os resultados mostram que, para o cenário 1, foi selecionada a combinação n°11 que forneceu o maior valor de função objetivo igual a $FO = 0,031$ com indicadores de confiabilidade $SAIFI = 0,133$ [int. perm./ano], $MAIFI_E = 0,667$ [int. mom./ano] e $Custo_{investimento} = R\5.030 . Por outro lado, no cenário 3 foi selecionada a combinação n° 26 que forneceu o menor valor da função objetivo $FO = 0,001$ com indicadores de confiabilidade $SAIFI = 0,078$ [int. perm./ano], $MAIFI_E = 0,449$ [int. mom./ano] e $Custo_{investimento} = R\10.626 , neste caso o investimento disponível foi suficiente para instalar melhor o SPDA nas seções de linha. A aplicação do modelo matemático de otimização utilizando o PLIMM permitiu analisar a influência de diversas estruturas-aterradas como SPDA sob a ótica sistêmica. De acordo com os resultados dos testes apresentados, a aplicação do modelo matemático proposto para otimizar a seleção e atribuição da estrutura-aterramento como SPDA tem o potencial de melhorar a confiabilidade do sistema. O modelo matemático de otimização proposto proporciona um ganho significativo para as empresas de distribuição de energia elétrica. Por meio do uso da metodologia apresentada, as distribuidoras de energia elétrica podem conhecer, para cada combinação possível, os indicadores de confiabilidade $SAIFI$ e $MAIFI_E$ com o investimento e obter melhorias significativas em suas redes de distribuição.

Deve-se notar que este trabalho visa mostrar a validação do modelo matemático PLIMM proposto em [16]. Neste trabalho, um sistema de teste reduzido de 4 barras é usado para "validar e demonstrar a eficácia do modelo PLIMM", verificando a convergência de resultados em relação às metas ou objetivos propostos, sendo que no trabalho [16] a sensibilidade à variação de vários parâmetros foi analisada.

REFERENCIAS

- [1] Bollen, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. 1.ed. New York: IEEE Press Series on Power Engineering – Edition John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [2] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std.1243-1997, 1997.
- [3] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std.1410-2010, 2010.
- [4] J. A. Martinez, F. A. Castro-Aranda, "Lightning Performance Analysis of Overhead Transmission Lines Using the EMTP," *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 20, no. 3, p. 2200-2210, Jul, 2005.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, PRODIST – Proc. de Dist. de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nac.. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2012. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_4.pdf>.
- [6] Silva, S. P.; et al. Estudo de Avaliação de Desempenho de Redes de Distribuição frente a Descargas Atmosféricas, In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2, 2003. p. 99-102.
- [7] Silva, S. P.; Piantini, A.; Franco, J. L.; Gonçalves, J. Lightning Performance Studies for a 13.8 kV Distribution Network, In: SIPDA - Int. Symposium on Lightning Protection, 7, Curitiba, 2003, p. 137-143.
- [8] R. J. Cabral, D. S. Gazzana, R. C. Leborgne, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, M. Telló, "Analysis of Distribution Lines Performance Against Lightning Using ATP-EMTP," in EMC 2012 - IEEE International Symposium on EMC Europe, Rome, Sept. 2012.
- [9] R. J. Cabral, D. S. Gazzana, R. C. Leborgne, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, M. Telló, "Improvement of an Overhead Distribution Feeder Performance Against Lightning Considering the Wire-Guard Protection," in ICLP 2012 – IEEE ICLP, 31, Vienna, Sept. 2012.
- [10] R. J. Cabral, D. S. Gazzana, R. C. Leborgne, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, D Schwanz, M. Telló, "Effect of Shielding and Grounding on Lightning Performance of 23kV Distribution Feeders," in NAPS 2013 - IEEE 45th North American Power Symposium, Manhattan, Sept. 2013.
- [11] R. J. Cabral, D. S. Gazzana, R. C. Leborgne, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, M. Telló, J. Morales, E. A. Orduña, "Improved Distribution Feeder Topology Against Lightning," in SIPDA 2013 – IEEE XII International Symposium on Lightning Protection, Belo Horizonte, Oct. 2013.
- [12] R. J. Cabral, A. S. Bretas, R. C. Leborgne, Morales, E. A. Orduña, "Sensitivity Assessment of Lightning-Induced Surges in Distribution Feeders Using ATP," in DPSP 2014 - IET XII International Conference on Developments in Power System Protection, Copenhagen, Apr. 2014.
- [13] J. Morales, E. A. Orduña, R. J. Cabral, A. S. Bretas, C. Rehtanz, "Novel Methodology for Analysis and Study of Distribution Feeder Performance Against Lightning Disturbances," in DPSP 2014 - IET XII International Conference on DPSP, Copenhagen, Apr. 2014.
- [14] Visacro, S.; Soares, J.; Schroder, M. A. O. Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station, *Journal of Geophysical Research*, 109, D01105, 2004.
- [15] GAMS - General Algebraic Modeling System. [Online]. Available: <<http://www.gams.com>>.
- [16] Bretas, A. S.; Cabral, R. J.; Leborgne, R. C.; Ferreira G. D.; Morales J. A. Multi-Objective MILP Model for Distribution Systems Reliability Optimization: a Lightning Protection System Design Approach. *IJEPES Elsevier*, v. 98, p. 256-268, June 2018.
- [17] Golde, R. H. "Lightning Surges on Overhead Distribution Lines Caused by Indirect and Direct Lightning Strokes," *Trans. of American Inst. of Electrical Engineers*, v.73, n.1, p.437-447, Jan. 1954.
- [18] Eriksson, A. J. "The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. PWRD-2, n.2, p. 859-870, Jul. 1987.
- [19] P. Chowdhuri, et al, "Parameters of Lightning Strokes: A review," *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.20, pp.346-358. Jan 2005.
- [20] IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, IEEE Std. 1366, 2003.
- [21] Tamiz, M.; Jones, D.; Romero, C. Goal Programming for Decision Making: An Overview of the Current State-of-the-art, *Transactions on European Journal of Operational Research*, p. 569-581, n. 111, 1998.
- [22] Miettinen, K. M. *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 1999, p. 121-122.
- [23] H. W. Dommel, *ElectroMagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)*, BPA, Portland, 1986.
- [24] L. Dube, *Users Guide to MODELS in ATP*, April 1996. 150p.
- [25] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std.80-2000, New York, 2000.