

Índice para Avaliação da Coordenação e Seletividade da Proteção em Sistemas de Distribuição.

Ruy C. B. Ferri.* Adriano P. de Moraes.** Ghendy Cardoso J.***
Olinto C. B. de Araújo.****Adriano C. Marchesan.*****

*Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil
(e-mail: ruyferri@gmail.com).

** Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil
(e-mail: adriano@ctism.ufsm.br).

*** Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil
(e-mail: ghendy@ufsm.br).

**** Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil
(e-mail: olinto@ctism.ufsm.br).

*****Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha (IFFar), Jaguari, RS, Brasil
(e-mail: adriano.marchesan@iffarroupilha.edu.br).

Abstract: This paper presents an index to evaluate the performance of protection for overhead electrical distribution system in relation to coordination and selectivity. Hereby, some of the main criteria adopted in the protection studies for recloser and fuse links are presented. The methodology for applying the index is demonstrated and it is used in a test system to show its functionality and usefulness.

Resumo: Este trabalho apresenta um índice para a avaliação do desempenho da proteção dos sistemas aéreos de distribuição em relação à coordenação e seletividade. Por meio deste, são apresentados alguns dos principais critérios adotados nos estudos de proteção para religadores e elos fusíveis. A metodologia para a aplicação do índice é demonstrada e o mesmo é utilizado em um sistema teste para mostrar o seu funcionamento e utilidade.

Keywords: Distribution system; Protection; Coordination; Selectivity; Performance; Index.

Palavras-chaves: Sistemas de Distribuição; Proteção; Coordenação; Seletividade; Desempenho; Índice.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica causada pelo desenvolvimento do país, assim como, a inserção de novas tecnologias na rede, faz com que cada vez mais sejam necessários estudos rigorosos direcionados para área de distribuição de energia elétrica. Nesse contexto, aumenta-se ainda mais a importância dos projetos relacionados à proteção de sistemas elétricos de distribuição.

O objetivo principal da proteção na distribuição é evitar ou minimizar os danos materiais causados por situações anormais no sistema, isolando a área de ocorrência da falha de uma maneira que afete o menor número possível de consumidores.

O melhor modo de atenuar os efeitos depreciativos decorrentes de uma falha é garantir que o sistema de proteção seja seletivo e coordenado. Em um sistema de proteção seletivo, o equipamento mais próximo da falta é o primeiro a atuar, independentemente da natureza da falta ser temporária ou permanente. A coordenação é alcançada quando dois ou mais dispositivos de proteção são dispostos em série operando de uma forma preestabelecida, permitindo o restabelecimento automático para faltas temporárias e seletividade para faltas permanentes (CEMIG, 2017).

Consequentemente, um índice capaz de avaliar o desempenho da proteção de sistemas de distribuição em relação a sua coordenação e seletividade poderia ser de grande ajuda para os engenheiros de proteção.

Na literatura são encontrados diversos índices sobre o impacto da geração distribuída na proteção, como em (Pholborisut et al. 2011), (Zeineidin et al. 2013) e (Huchel et al. 2017). De maneira geral, esses índices avaliam a perda ou não da coordenação após a inserção de geração distribuída em sistemas de distribuição.

Em (Lee et al. 2003) é introduzido um índice que avalia o desempenho da proteção através de lógica Fuzzy. O trabalho proposto por (Moon et al. 2005) utiliza os mesmos métodos de Lee et al. (2003), mas emprega uma função de distribuição normal como função de filiação. Ambos os trabalhos consideram valores intermediários dos ajustes da proteção como ponto ótimo, o que nem sempre acontece na prática.

Este artigo apresenta um índice para a avaliação da coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção presentes em redes de distribuição de energia. O índice proposto busca realizar essa tarefa de forma simples para que possa ser facilmente implementado e o sistema de proteção possa ser avaliado. Assim, não é necessário realizar todo o

estudo de proteção para verificar se um determinado sistema elétrico de distribuição está coordenado e seletivo.

O trabalho foi dividido em cinco seções, incluindo esta introdução. Na segunda seção apresentam-se os principais dispositivos de proteção empregados em sistemas aéreos de distribuição, seus ajustes, dimensionamentos e critérios de coordenação e seletividade. Na terceira seção é exposto o índice proposto e a maneira de calculá-lo. A quarta seção contém a aplicação do índice em um sistema-teste e a quinta seção, as conclusões deste trabalho.

2. PROTEÇÃO DE SISTEMAS AÉREOS DE DISTRIBUIÇÃO

Os sistemas elétricos de distribuição de energia são compostos de longas redes, em sua maioria aéreas e empregando cabos nus. Devido ao tamanho e a exposição podem sofrer faltas de diversas naturezas, o que torna crucial o uso de dispositivos de proteção (Boaski et al. 2017). Os dispositivos mais utilizados são religador e elo fusível, que são discutidos nas próximas subseções. Na subseção 2.1 são mostrados os critérios de ajuste e dimensionamento utilizados pelas concessionárias brasileiras e na subseção 2.2, os critérios de coordenação e seletividade entre os dispositivos.

2.1 Dimensionamento e ajuste dos dispositivos

O conjunto chave e elo fusível é um dos dispositivos mais utilizados para a proteção de sistemas aéreos de distribuição, principalmente devido ao seu baixo custo quando comparado aos demais equipamentos. Seu princípio de funcionamento consiste em interromper a passagem de corrente, quando essa atinge valores superiores aos dimensionados para o elemento fusível presente no interior do cartucho, conhecido como elo fusível, que acaba rompendo.

O elo fusível tem sua característica de operação definida por curvas do tipo *Tempo x Corrente*. Geralmente os fabricantes disponibilizam duas curvas: tempo mínimo de fusão e tempo total de interrupção, ambas importantes para os estudos de proteção. A curva de tempo mínimo de fusão representa o menor tempo que o elo fusível demora a se fundir para uma determinada corrente. A curva de tempo total de interrupção representa o tempo total que a chave fusível leva para interromper a passagem da corrente, tempo este que inclui a abertura da chave fusível e a extinção do arco elétrico (Corrêa et al. 2017).

Para elos fusíveis utilizados na proteção de ramais, existem dois critérios que devem ser levados em consideração para o correto dimensionamento. O primeiro critério é que a corrente nominal deverá ser maior que a corrente de carga prevista para o horizonte de estudo (CPFL, 2006), conforme representado por (1).

$$I_{elo} > KF \cdot I_{carga} \quad (1)$$

Onde: I_{elo} é a corrente nominal do elo fusível; KF é o fator de crescimento da carga; I_{carga} é a corrente de carga máxima no ponto de instalação do elo.

O segundo critério, que é evidenciado por (2), afirma que a corrente para o tempo de 300 segundos na curva de tempo total de interrupção deve ser menor que a menor corrente de curto-circuito fase-terra mínima do trecho onde o elo fusível é a proteção de retaguarda. Isso não sendo viável, deve-se assegurar que o elo fundirá pelo menos para a menor corrente de curto-circuito fase-terra mínima onde o mesmo é a proteção principal (CPFL, 2003).

$$I_{300} < I_{cc_{FT\min}} \quad (2)$$

Onde: I_{300} é a corrente em 300 segundos na curva de tempo total de interrupção; $I_{cc_{FT\min}}$ é a corrente curto-circuito fase-terra mínima até aonde o elo protege.

O religador é um dispositivo de proteção contra sobrecorrentes empregado em circuitos aéreos de distribuição, que opera quando detecta correntes de curto-circuito, desligando e religando automaticamente os circuitos um número predeterminado de vezes. Quando um religador sente a presença de sobrecorrente, a circulação dessa corrente é interrompida pela abertura de seus contatos. Os contatos são mantidos abertos durante um determinado período de tempo, conhecido como tempo de religamento, após o qual se fecham automaticamente para reenergização da linha. Se, no momento do fechamento dos contatos, a corrente persistir, a sequência abertura/fechamento é repetida até três vezes consecutivas e, após a quarta abertura, os contatos ficam abertos, fazendo com que o novo fechamento tenha que ser manual (Eletrobrás, 1982).

Geralmente, o religador opera com dois tipos diferentes de curvas: uma rápida e outra temporizada. Sua característica de operação possibilita que ambas as curvas sejam empregadas em sua sequência de aberturas e fechamentos de maneira que o mesmo opere na curva rápida durante as primeiras operações e na curva lenta durante as últimas operações antes do bloqueio. Dessa maneira, a melhor aplicação para o religador é evitar o rompimento de elos fusíveis para faltas de natureza transitória (CPFL, 2006).

O religador dispõe de unidades independentes para a proteção de fase e neutro, dessa maneira, o ajuste de cada uma delas é feito separadamente. A corrente mínima de *pick-up* de fase deve ser menor que a corrente mínima de defeito fase-fase dentro da zona de proteção do religador e ser maior que a corrente de carga multiplicada por um fator de crescimento, conforme (3).

$$KF \cdot I_{carga} < I_{pf} < \frac{I_{cc_{2f\min}}}{FS} \quad (3)$$

Onde: I_{pf} é a corrente de *pick-up* de fase; $I_{cc_{2f\min}}$ é a menor corrente de curto-circuito fase-fase na zona de proteção do religador; FS é um fator de segurança.

Para a unidade de proteção de neutro, o *pick-up* deve ser menor que a menor corrente de defeito fase-terra mínimo, dentro da zona de proteção do religador, e deve ser maior que a máxima corrente de desbalanço para o neutro permitida, os limites de ajuste estão em (4).

$$(0,1 \text{ até } 0,3) \cdot I_{\text{carga}} < I_{pn} < \frac{I_{cc_{fi\text{min}}}}{FS} \quad (4)$$

Onde: (0,1 até 0,3) representa a faixa permitida para a corrente de desbalanço no neutro (10% até no máximo 30%); I_{pn} é a corrente de pick-up de neutro; $I_{cc_{fi\text{min}}}$ é a menor corrente de curto-circuito fase-terra mínima no zona de proteção do religador.

2.2 Seletividade e coordenação entre os dispositivos

Para garantir a seletividade entre elos fusíveis em série, o elo fusível protegido deve ser seletivo com o elo fusível protetor para o valor da máxima corrente de curto-circuito, no ponto de instalação do elo fusível protetor. Em virtude de o curto-circuito fase-terra ser o mais frequente e o valor fase-terra mínimo ser o mais provável de ocorrer, o elo protegido, normalmente, tem a sua seletividade testada com o elo protetor, pelo menos para o valor da corrente de curto-circuito fase-terra mínima, no ponto de instalação do elo protetor (Eletrobrás, 1982).

Os valores limites da seletividade podem ser determinados pelas curvas *Tempo x Corrente* dos elos fusíveis. A seletividade será satisfatória, quando a curva de tempo total do elo protetor não exceder 75% do tempo da curva de tempo mínimo de fusão do elo fusível protegido.

A Fig. 1 ilustra o conceito de elo fusível protetor e elo fusível protegido. O elo fusível protetor é instalado mais longe da subestação e mais próximo da carga, caso ocorra um curto-circuito em sua zona de proteção, ele deverá romper antes do elo fusível protegido, se existir seletividade entre ambos para o valor de curto-circuito em questão.



Fig. 1 Elos fusíveis protegido e protetor.

A coordenação entre um religador e um elo fusível (dispositivo que está mais próximo da carga) é satisfatória quando o fusível não fundir enquanto o religador realiza as suas operações rápidas, mas fundir durante a primeira operação temporizada do religador.

A coordenação é efetuada com base na análise de suas características *Tempo x Corrente*. Para todos os valores de falhas possíveis, no trecho do circuito protegido pelo elo fusível, o tempo de mínimo de fusão do elo deve ser maior que o tempo de abertura do religador na curva rápida e o tempo total de interrupção do elo deve ser menor que o tempo mínimo de abertura do religador na curva temporizada.

Essas especificações definem uma faixa na qual o religador e elo fusível estão coordenados, limitada pelo ponto mínimo (intersecção da curva de tempo total do elo com a curva temporizada do religador) e pelo ponto máximo (intersecção

da curva mínima de fusão do elo com a curva rápida do religador).

Na Fig. 2 está um exemplo de coordenação entre esses dispositivos. As linhas tracejadas verticais definem os pontos máximo e mínimo da faixa de coordenação.

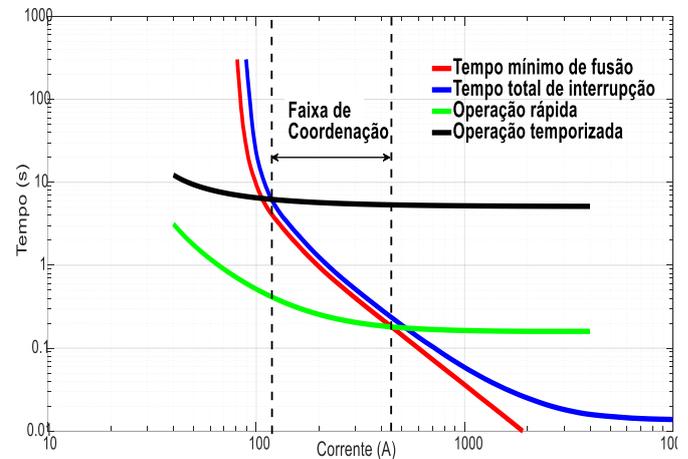


Fig. 2 Coordenação religador-elos fusíveis.

3. METODOLOGIA PARA A APLICAÇÃO DO ÍNDICE

Como discutido por Lee et al. (2003) as regras para ajuste da proteção em sistemas de distribuição são definidas através de inequações, onde o ajuste ou o dispositivo deve ser “menor que” e “maior que” determinados valores de corrente, o que pode ser notado nas inequações da seção anterior. Por conseguinte, não existe uma única solução possível e sim, uma faixa de diversos valores que atendem aos critérios.

O índice proposto por este trabalho tem como função avaliar o desempenho das possíveis soluções em relação à coordenação e seletividade. A metodologia proposta consiste inicialmente em quantificar a porcentagem do trecho da proteção primária que está sendo protegida de maneira correta pela retaguarda, para cada tipo de curto-circuito possível de ocorrer. Todo par de proteções, retaguarda e principal, deve ser avaliado. Posteriormente, os índices de todos os pares são somados, resultando no índice total do sistema para configuração de proteção apreciada.

Com o intuito de elucidar o funcionamento da metodologia proposta, vamos levar em consideração a Fig. 3, que contém as curvas *Tempo x Corrente* de dois elos fusíveis, um protegido e outro protetor. A curva tracejada representa a curva de tempo mínimo de fusão do elo protegido multiplicada por 0,75, para encontrar-se o ponto máximo de seletividade entre os elos. O ponto mínimo de seletividade é encontrado na curva de tempo total do fusível protegido para o tempo de 300 segundos. Para qualquer valor de curto-circuito entre os pontos de mínimo e máximo, a seletividade estará garantida e o elo protegido atuará como proteção de retaguarda do elo protetor. Se todos os valores de curto-circuito na zona de proteção do dispositivo primário estiverem entre os dois pontos, a quantificação será 1 (100% protegido).

Na prática, nem sempre todos os valores de corrente de curto-circuito na zona de proteção do dispositivo primário estarão

sendo corretamente protegidos pelo dispositivo de proteção de retaguarda.

Por exemplo, considerando um valor de corrente de curto-circuito fase-terra menor que 36 A (ponto mínimo) para o caso da Fig. 3, a quantificação é realizada achando-se o ponto onde a impedância para um curto-circuito fase-terra resulta em 36 A. O valor da impedância encontrado é dividido pela impedância do trecho, desconsiderando-se a impedância da parte anterior do sistema. Dessa maneira é possível saber a porcentagem do trecho que está sendo corretamente protegida pela retaguarda. Caso existissem correntes de curto-circuito maiores que o ponto máximo, a abordagem realizada seria a mesma, mas o valor de porcentagem encontrado deveria ser diminuído por 1, já que a dispositivo de retaguarda protegeria a zona principal apenas para os valores restantes da porcentagem em questão. Quando existem tanto correntes menores que o ponto mínimo quanto correntes maiores que o ponto máximo, a porcentagem relativa ao ponto mínimo deve ser diminuída da porcentagem relativa ao ponto máximo, pois o dispositivo de retaguarda estará protegendo corretamente o trecho resultante da diferença entre esses dois valores.

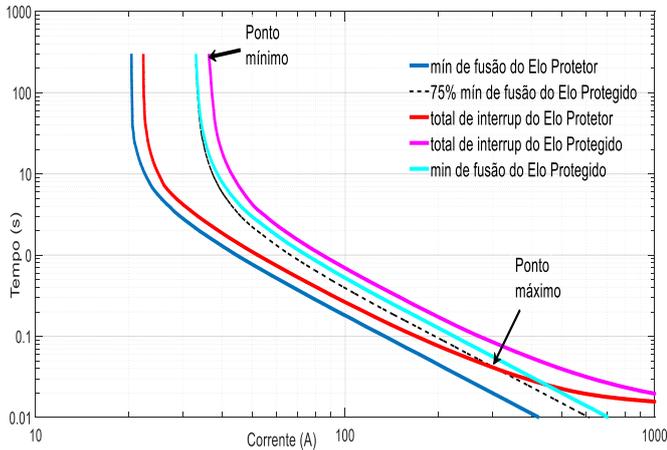


Fig 3. Seletividade entre dois elos fusíveis.

A quantificação é realizada para cada tipo de curto-circuito individualmente, pois a retaguarda pode ser perfeitamente coordenada ou seletiva com determinado tipo de falta, e parcialmente, ou até mesmo não ter coordenação e seletividade com os demais tipos. O resultado da quantificação para cada tipo de curto é aplicado em (5) que representa o índice de proteção da retaguarda em relação à zona de proteção do dispositivo primário para o tipo de falta em análise.

$$K_{cc} = P_{cc} \cdot \%_{cc} \cdot \frac{\lambda_i}{\sum_1^n \lambda_i} \quad (5)$$

Onde: K_{cc} é o índice entre dois dispositivos relativo ao tipo de falta considerado; P_{cc} é a porcentagem do trecho que proteção a de retaguarda atua corretamente para o tipo de falta considerado; $\%_{cc}$ é a porcentagem de ocorrência do tipo de falta; λ_i é a taxa de falha na zona de proteção do dispositivo primário ; n é a quantidade de pares de proteção.

O índice total de proteção entre dois dispositivos (principal e retaguarda) é encontrado utilizando-se (5) para todos os tipos de faltas e somando os resultados obtidos. Por exemplo, se para um estudo fossem consideradas as faltas trifásicas, bifásicas, fase-terra e fase-terra mínima, o índice total de proteção para dois dispositivos seria dado por (6).

$$K_{prT} = K_{3\phi} + K_{2\phi} + K_{\phi t} + K_{\phi t \min} \quad (6)$$

Onde: K_{prT} é o índice total entre um dispositivo de proteção principal e a sua retaguarda; $K_{3\phi}$ é o índice para faltas trifásicas; $K_{2\phi}$ é o índice para faltas bifásicas; $K_{\phi t}$ é o índice para faltas fase-terra; $K_{\phi t \min}$ é o índice para faltas fase-terra mínima.

Como a porcentagem de ocorrência de cada tipo de curto-circuito é levada em consideração no cálculo, o tipo de falta com um histórico de ocorrência mais elevado apresenta maior influência sobre o índice total entre dois dispositivos.

A taxa de falha para o trecho onde o índice está sendo avaliado também é levada em consideração. A mesma é dividida pelo somatório das taxas de falha dos demais trechos que terão suas proteções de retaguarda avaliadas pelos seus respectivos índices. Em vista disso, trechos que tiverem maior taxa de falha, apresentarão uma contribuição maior para o índice total do sistema, que pode ser calculado por (7).

$$K_T = \sum_1^n K_{Tpr} \quad (7)$$

Onde: K_T é o índice total do sistema; K_{prT} é o índice total entre dois dispositivos.

O índice total do sistema sempre irá possuir um valor entre zero e um, em zero significa que não existe coordenação ou seletividade para nenhum trecho do sistema, e um significa que os dispositivos de retaguarda estão coordenados ou seletivos para todos os valores de faltas nas zonas de proteção dos dispositivos primários.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ÍNDICE

Para demonstrar o funcionamento do índice proposto, o mesmo foi aplicado no sistema teste presente na Fig. 4. O sistema teste contém um religador (R) e cinco elos fusíveis (F1, F2, F3, F4 e F5). A modelagem do sistema foi realizada no software MATLAB® e os cálculos de fluxo de carga e curto-circuito seguiram os métodos presentes em (Kersting, 2007). Mais informações sobre o sistema estão disponíveis no Apêndice.

O índice é calculado para duas configurações diferentes de proteção que estão presentes na Tabela 1, ambas respeitando os critérios mínimos definidos na seção 3. Nos dois casos são utilizados apenas elos fusíveis preferenciais do tipo K (6K, 10K, 15K, 25K, 40K, 65K, 100K, 140K ou 200K). As porcentagens de ocorrência consideradas para cada tipo de falta são: 70% para curto-circuito fase-terra mínimo, 10% para curto-circuito fase-terra, 15% para curto-circuito bifásico e 5% para curto-circuito trifásico.

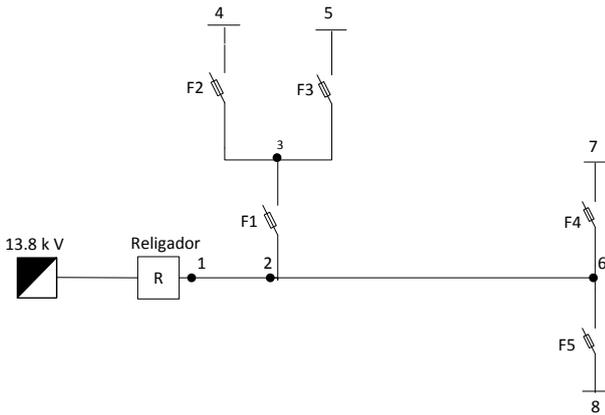


Fig 4. Sistema teste.

Tabela 1. Primeira configuração da Proteção

Dispositivo	Configuração 1	Configuração 2
F1	25K	40K
F2	15K	25K
F3	10K	25K
F4	65K	40K
F5	40K	40K
R pick-up de fase	60 A	60 A
R pick-up de neutro	20 A	20 A

Na Tabela 2 encontra-se o desempenho para todos os pares de proteção da primeira configuração testada. Uma boa maneira de saber se o desempenho está apropriado é compará-lo com o desempenho máximo possível, presente na Tabela 3, para cada par de proteções de interesse. No cálculo do máximo desempenho possível a variável P_{cc} de (5) é considerada 1 para todos os tipos de curto.

Pela comparação entre ambas as tabelas, nota-se que o elo fusível F1 é seletivo para todos os valores de corrente de falta na zona de proteção de F3, enquanto que com F2 não é seletivo apenas para alguns valores de curto-circuito trifásico. O religador R não coordena com F3 para nenhum valor de falta e não é retaguarda para F4 para correntes de curto-circuito fase-terra mínimas, indicando que essa talvez não seja a configuração de proteção mais adequada para esse sistema. O desempenho total da primeira configuração é de 0,6936.

Para a segunda configuração testada os valores de *pick-up* do religador são mantidos, assim como a escolha para F5, já que a coordenação entre ambos é máxima. Os demais elos fusíveis têm seus valores nominais alterados. A Tabela 4 apresenta o desempenho da segunda configuração.

Comparando a Tabela 5 com a Tabela 3, percebe-se que com essa configuração os elos fusíveis são seletivos entre si para toda a faixa de valores de falta, além disso, R coordena perfeitamente com F1, F4 e F5 para as unidades de fase e

neutro, e coordena perfeitamente com F2 e F3 para a unidade de neutro. O índice total do sistema é de 0,9456 sendo superior ao da primeira configuração.

Tabela 2. Desempenho da primeira configuração.

Pares de proteção	Desempenho				
	$\phi_{l\min}$	ϕ_l	2ϕ	3ϕ	Total
F1-F2	0,0897	0,0128	0,0192	0,0051	0,1268
F1-F3	0,0972	0,0139	0,0208	0,0069	0,1389
R-F1	0,0810	0,0116	0	0	0,0926
R-F2	0,0897	0	0	0	0,0897
R-F3	0	0	0	0	0
R-F4	0	0,0150	0,0225	0,0075	0,0450
R-F5	0,1404	0,0201	0,0301	0,0100	0,2006

Tabela 3. Máximo desempenho possível para o sistema.

Pares de proteção	Desempenho				
	$\phi_{l\min}$	ϕ_l	2ϕ	3ϕ	Total
F1-F2	0,0897	0,0128	0,0192	0,0064	0,1281
F1-F3	0,0972	0,0139	0,0208	0,0069	0,1389
R-F1	0,0810	0,0116	0,0174	0,0058	0,1147
R-F2	0,0897	0,0128	0,0192	0,0064	0,1281
R-F3	0,0972	0,0139	0,0208	0,0069	0,1389
R-F4	0,1048	0,0150	0,0225	0,0075	0,1497
R-F5	0,1404	0,0201	0,0301	0,0100	0,2006

Tabela 4. Desempenho da segunda configuração.

Pares de proteção	Desempenho				
	$\phi_{l\min}$	ϕ_l	2ϕ	3ϕ	Total
F1-F2	0,0897	0,0128	0,0192	0,0064	0,1281
F1-F3	0,0972	0,0139	0,0208	0,0069	0,1389
R-F1	0,0810	0,0116	0,0174	0,0058	0,1147
R-F2	0,0897	0,0128	0	0	0,1025
R-F3	0,0972	0,0139	0	0	0,1111
R-F4	0,1048	0,0150	0,0225	0,0075	0,1497
R-F5	0,1404	0,0201	0,0301	0,0100	0,2006

Cabe salientar que o objetivo desta seção não é encontrar a melhor configuração possível da proteção para o sistema teste e sim comparar diferentes configurações para demonstrar o funcionamento e utilidade do índice proposto por este trabalho.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um índice para a avaliação da coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção em sistemas aéreos de distribuição. A metodologia proposta leva

em consideração os critérios tradicionais utilizados nos estudos de proteção para desenvolver uma nova abordagem capaz de quantificar o desempenho dos dispositivos.

Com os cálculos do índice implementados computacionalmente, o mesmo pode ser de grande ajuda tanto para projetos de proteção em novas redes, quanto para a avaliação de projetos já realizados. Além disso, com a utilização do índice o tempo de análise de coordenogramas pode cair drasticamente.

Outras aplicações podem ser citadas, como empregar o índice em algoritmos de otimização para buscar o melhor desempenho possível da proteção e avaliar se a proteção ainda é válida em casos de reconfiguração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEEE-D pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho, que faz parte do projeto P&D para sua utilidade.

REFERÊNCIAS

- Boaski M. A. F., Santos C., Sperandio M., Bernardon D. P., Ramos M. J. and Porto D. S. (2017). Coordination and Selectivity of Protection Devices with Reliability Assessment in Distribution Systems, *System Reliability, Constantin Volosencu, IntechOpen*.
- Cemig (2017), Proteção de Sobrecorrentes do Sistema de Distribuição de Média Tensão da Cemig, *Norma de distribuição*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Corrêa R., Donida D. Z., Costa G. B., Bertoletti A. Z., Bencke F. T., Morais A. P. (2018). Curve Fitting Analysis of Distribution Fuse Links Using the Cross-Validation Technique, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), IEEE, Brasil*.
- CPFL (2003). Proteção de Redes Aéreas de Distribuição – Sobrecorrente. Norma Técnica 2912, versão 1.1.
- Eletrobrás (1982). Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição, *Coleção de Distribuição de Energia Elétrica, Editora Campus Eletrobrás, Vol. 2*. Rio de Janeiro.
- Kersting W. H. (2007), Distribution System Modeling and Analysis, 2nd Edition, *CRC Press*, Boca Raton, Florida.
- Huchel L., Zeineldin H. and El-Saadany E. F. (2017). Protection Coordination Index Enhancement Considering Multiple DG Locations Using FCL, *IEEE trans. On Power Delivery, Vol 32, No. 1*.
- Lee S. J., Kang S. H., Choi M. S., Kim S. T. and Chang C. K. (2000). Protection Levels Evaluation of Distribution Systems Based on Dempster-Shafer Theory of Evidence, *Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, Vol. 3*, pp. 1894-1899.
- Moon H. K., Hyun S. H. and Lee J. S. (2005). A Novel Protective Effectiveness Evaluation Method Based on a Parametric Point of View for Distribution Systems, *Key Engineering Materials 277-279*, 692-697.
- Pholborisut N., Saksornchai T. and Eua-arporn B. (2011). Evaluating the Impact of Distributed Generation on Protection System Coordination Using Protection Miscoordination Index. *The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and*

Information Technology (ECTI) Association of Thailand, Thailand.

Zeineldin H., Mohamed Y.-R., Khadkikar V. and Pandi V. (2013). A protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems, *IEEE Trans. Smart Grid, vol. 4, no. 3*, pp. 1523–1532.

Apêndice. INFORMAÇÕES SOBRE O SISTEMA-TESTE

Correntes de Curto-circuito em Amperes.

Ponto	$\phi_{r\min}$	ϕ_r	2ϕ	3ϕ
1	162,90	372,24	402,00	464,19
2	162,49	370,72	399,84	461,70
3	156,75	354,20	375,99	434,17
4	152,50	341,18	357,70	413,04
5	152,18	340,18	356,31	411,44
6	161,40	366,63	394,06	455,06
7	155,65	350,00	370,22	427,53
8	154,48	346,46	365,23	421,77

Outras informações do sistema.

Ponto	I_{carga} (A)	Impedância (Ω)	Taxa de Falha/ano
Até 1	45,99	4,17 + 21i	-
1-2	45,99	0,102 + 0,07i	0,65
2-3	14,77	1,690 + 0,63i	0,75
2-6	31,22	0,28 + 0,187i	0,94
3-4	8,30	1,33 + 0,49i	0,83
3-5	6,47	1,43 + 0,53i	0,90
6-7	15,60	1,71 + 0,63i	0,97
6-8	15,62	2,08 + 0,77i	1,30