

Um Critério para a Coordenação da Proteção de uma Rede de Distribuição: Estudo de Caso da UFRB

Aurino J. de Queiroz N. * Huilman S. Sanca *
Alfredo P. de Araújo N. * Francisco C. Souza J. **
Fernando A. Moreira ***

* *Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do
Recôncavo da Bahia - UFRB, BA, (e-mail:
engeletrica.aurino@gmail.com; plinioalfredo01@gmail.com;
huilman.sanca@ufrb.edu.br).*

** *Instituto Federal do Rio Grande do Norte - IFRN, RN (e-mail:
fcsouzajr@gmail.com)*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da
Bahia - UFBA, BA, (e-mail: moreiraf@ufba.br)*

Abstract: In this paper, a methodology for the coordination between the protection devices of a medium voltage distribution network is presented. This analysis is a case study of the Federal University of Recôncavo da Bahia (UFRB) feeder. For this purpose, methodologies for the coordination between fuses, between fuse and recloser and between recloser and overcurrent relay are presented. To obtain the results, real data from the 13.8 kV distribution feeder of the UFRB campus Cruz das Almas are used. The results obtained for the new protection coordination between the protection devices are satisfactory, as these results will be used for the installation of the new recloser in the campus feeder.

Resumo: Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para a coordenação entre os dispositivos de proteção de uma rede de distribuição de média tensão. Esta análise é um estudo de caso da rede da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Com esta finalidade, apresentam-se metodologias para a coordenação entre fusíveis, entre fusível e religador e entre religador e relé de sobrecorrente. Para a obtenção dos resultados, utiliza-se os dados reais da rede de distribuição em 13,8 kV da UFRB campus Cruz das Almas. Os resultados obtidos mostram-se satisfatórios para a nova coordenação de proteção entre os dispositivos de proteção, pois estes resultados serão utilizados para a instalação do novo religador à rede do campus.

Keywords: Distribution system; Protection coordination; Feeder; Recloser; Medium voltage.

Palavras-chaves: Sistema de distribuição; Coordenação da proteção; Alimentador; Religador; Média tensão.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) têm a função precípua de fornecer energia elétrica aos usuários no instante em que for solicitada, seja para grandes ou pequenos consumidores, com qualidade adequada. A energia que chega aos centros de consumo é provinda de três grandes blocos que compõem os SEPs: geração, transmissão e distribuição. A distribuição é responsável pelo fornecimento da energia aos consumidores finais.

A proteção da rede distribuição de energia elétrica possui um papel essencial na segurança e operação do sistema. Quando uma falta é identificada o fornecimento da energia é comprometido. Falhas neste sistema podem levar a acidentes, operações indevidas, erro de interpretação por parte do operador do sistema, piora nos indicadores de qualidade, deterioração de equipamentos, entre outros possíveis problemas (Kagan, 2010) (Ramos, 2014), trazendo prejuízo aos consumidores. Os dados mais frequentes no

que se refere aos fenômenos de falhas em uma rede de energia elétrica são derivados de descargas atmosféricas, quedas de árvores sobre a rede, vandalismo, contato de animais, entre outros. Cerca de 90% das faltas que ocorrem no sistema de distribuição são de natureza temporária (CPFL, 2003).

A alocação de dispositivos de proteção em pontos estratégicos nos circuitos de distribuição está diretamente relacionada a técnicas eficientes para especificação, coordenação e seletividade (Campitelli, 2007). Tais requisitos melhoram a qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica e os índices de confiabilidade do sistema.

A coordenação é o ato ou efeito de dispor dois ou mais dispositivos de proteção em série, de forma que exista uma sequência de operação pré-definida entre eles. A proteção é projetada e ajustada de forma a permitir o restabelecimento automático para faltas de origem transitória e manter seletividade para faltas permanentes, dentro

de uma seqüência de operação pré-estabelecida (Santos, 2012). Quando dois ou mais dispositivos de proteção estão instalados em série, de forma que exista uma seqüência de operação definida entre eles, esses dispositivos são considerados coordenados.

Na literatura, vários trabalhos abordam alternativas para a otimização dos dispositivos de proteção com o uso da técnica de coordenação. Em Bedekar (2009), o autor apresenta uma configuração para minimizar o tempo de interrupção da fonte de alimentação e evitar o mau funcionamento dos relés a partir da aplicação técnica de programação linear para a coordenação ideal de relés de sobrecorrente. Em Sookrod (2018) e CEMIG (2017) são propostas ferramentas de coordenação de relés de sobrecorrente para sistema de geração distribuída (DG) usando o conceito de esquema de proteção adaptável. Ambas as ferramentas contribuíram para otimizar os problemas de coordenação nos relés de proteção.

Em Macedo (2019), é analisada a instalação de um religador em uma subestação localizada em uma avenida do centro de Macapá, no estado do Amapá. São definidos alguns critérios para o dimensionamento dos parâmetros do religador e para realizar a coordenação do religador com os dispositivos de proteção a montante e jusante do mesmo.

Neste trabalho analisa-se a coordenação entre os dispositivos de proteção do alimentador de distribuição da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Campus Cruz das Almas, apresentando uma metodologia para a coordenação para diferentes combinações: entre fusíveis, entre fusível e religador e entre religador e relé de sobrecorrente. Os resultados apresentados serão utilizados para a instalação do novo religador adquirido pela universidade.

2. METODOLOGIA

Nessa seção apresentam-se os métodos utilizados para a realização da coordenação entre os distintos dispositivos de proteção da rede de média tensão.

2.1 Rede de Média Tensão do Campus da UFRB

O alimentador de distribuição da UFRB possui mais de 8km de extensão e o seu sistema de proteção possui um relé de sobrecorrente funções 50 e 51 da marca PEXTRON, modelo URPE7104, e chaves fusíveis como proteções do sistema. Este alimentador possui 53 pontos de chaves fusíveis e 44 subestações, dos quais sete são de 15kVA, nove de 45kVA, quatro de 75kVA, doze de 112,5kVA, quatro de 150kVA, quatro de 225kVA, um de 300kVA e três de 500kVA.

2.2 Dimensionamento do Religador Automático

Antes de realizar a coordenação entre os dispositivos de proteção é necessário realizar o dimensionamento do religador. Para o dimensionamento do religador, os seguintes critérios serão adotados CPFL (2003).

- (1) O religador deverá ter uma tensão nominal maior ou igual à tensão do alimentador.
- (2) A capacidade de interrupção do religador deverá ser maior ou igual à máxima corrente de curto-circuito.
- (3) A corrente nominal do religador deverá ser maior ou igual à corrente da carga, convenientemente medida

ou avaliada na situação de maior carga do circuito, incluindo manobras usuais, devendo assim, sempre que possível, prever futuros aumentos de carga.

- (4) O religador deve ser sensível a corrente mínima de curto-circuito no final do trecho por ele protegido.

2.3 Ajuste do Disparo de Fase

De acordo com CPFL (2003), a corrente mínima de disparo de fase do religador deve ser menor que a corrente de curto-circuito fase-fase simétrica dentro da zona de proteção deste, incluindo, sempre que possível, os trechos a serem adicionados em caso de manobras. Além disso, deve ser maior ou igual à máxima corrente de carga incluindo manobras usuais no ponto de instalação do religador multiplicado por um fator de correção (FC), prevendo futuros aumentos de carga:

$$FC \times I_{cargamax} \leq I_{pickup} < \frac{I_{cc2\phi}}{FS} \quad (1)$$

sendo, FC o fator de crescimento da carga; I_{pickup} corrente de disparo de fase do religador; FS fator de segurança (1,5 a 2); $I_{cargamax}$ corrente de carga máxima atual passante no ponto de instalação; $I_{cc2\phi}$ o curto-circuito bifásico simétrico no final do trecho protegido pelo religador.

2.4 Ajuste de Disparo de Neutro

A corrente mínima de disparo de neutro do religador deve ser menor que a corrente de falta fase-terra mínima, dentro da zona de proteção deste, e deve ser maior que a corrente de desbalanço do neutro:

$$I_{desbalanco} < I_{pickupneutro} < \frac{I_{cc\phi min}}{FS} \quad (2)$$

$I_{pickupneutro}$ a corrente de disparo de neutro do religador; $I_{cc\phi min}$ o curto-circuito fase terra mínimo no final do trecho protegido pelo religador.

2.5 Critérios da Coordenação Fusível-Fusível

Para a coordenação entre as chaves fusíveis, foram adotados os critérios conforme a Figura 1.

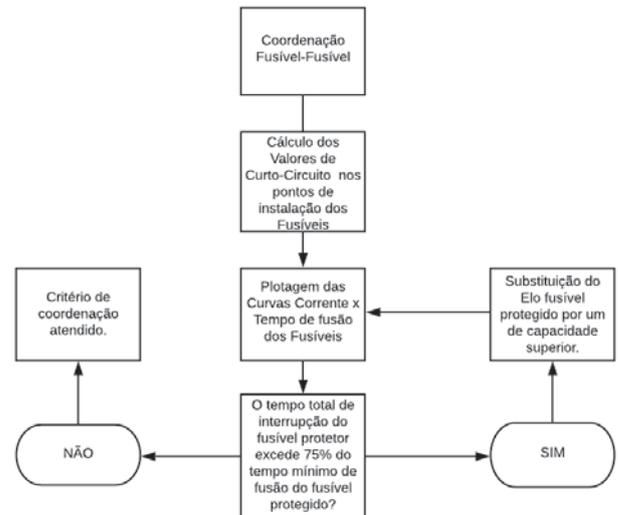


Fig.1. Fluxograma Coordenação Fusível-Fusível

- (1) O elo protegido, deverá coordenar com o elo protetor, pelo menos, para o valor da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no ponto de instalação do elo protetor.

- (2) o tempo total de interrupção do fusível protetor não pode exceder 75% do mínimo tempo de fusão do fusível protegido.

2.6 Critérios da Coordenação Religador-Fusível

Para a coordenação entre Religador e Fusível, foram adotados os critérios conforme a Figura 2.

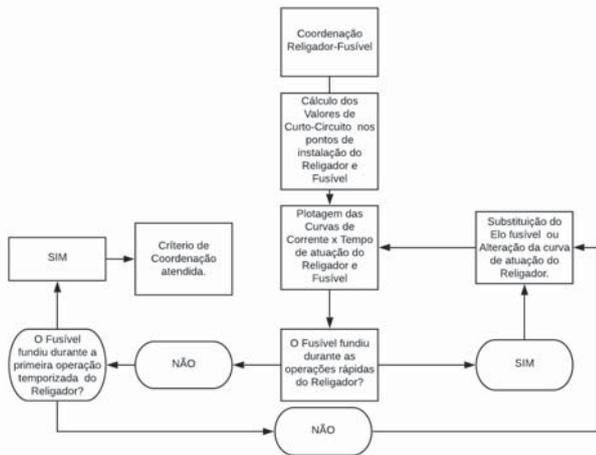


Fig.2. Fluxograma Coordenação Religador-Fusível

A coordenação entre um religador e um fusível é satisfatória quando o fusível não fundir enquanto o religador realiza suas operações rápidas, mas fundir durante a primeira operação temporizada do religador.

2.7 Critérios da Coordenação entre o Relé e o Religador

Para a coordenação entre Religador e o Relé de sobrecorrente, foram adotados os critérios conforme a Figura 3.

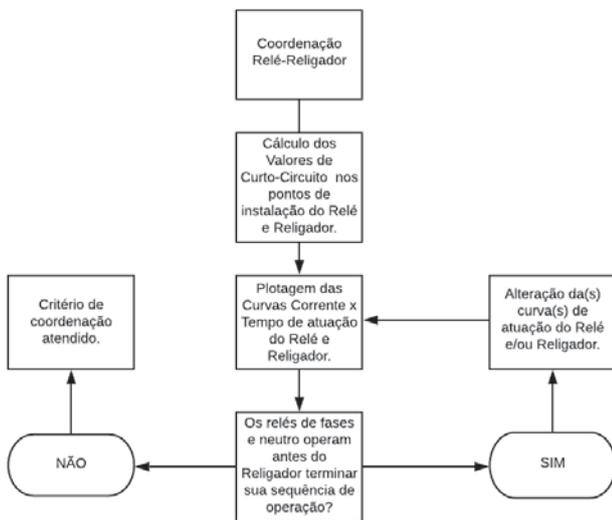


Fig.3. Fluxograma Coordenação Relé-Religador.

- (1) As correntes de *pick-up* de fase e terra do religador devem ser menores que as correntes de *pick-up* de fase e terra do relé, respectivamente.
- (2) Os relés de fase ou neutro não devem operar enquanto o religador realiza sua sequência de operação, até que a falta seja extinta ou até que o religador bloqueie.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se os resultados da coordenação de proteção usando a metodologias apresentadas na seção anterior.

O programa SUPERCOORDV2 é utilizado para a execução do cálculo dos valores de curto-circuito. A Tabela 1 apresenta esses valores. Primeiramente realiza-se a coordenação

Tabela 1. Valores de Curto-Circuito em 28 Pontos da Rede

Ponto	$I_{cc\phi\phi\phi}(A)$	$I_{cc\phi\phi}(A)$	$I_{cc\phi t}(A)$	$I_{cc\phi tmin}(A)$
1	2479	2146	1515	187
2	2322	2011	1425	186
3	2183	1890	1345	185
4	2383	2063	1460	186
5	1898	1643	1235	182
6	2029	1757	1298	183
7	1950	1688	1260	182
8	1875	1623	1224	182
9	1807	1564	1191	181
10	1676	1451	1136	179
11	2330	2017	1437	186
12	2310	2000	1428	186
13	2284	1978	1414	185
14	1998	1730	1288	183
15	2219	1921	1389	185
16	2138	1851	1346	184
17	1886	1633	1234	182
18	1751	1516	1168	180
19	2117	1833	1342	184
20	2093	1812	1329	184
21	1972	1707	1275	183
22	1915	1658	1239	182
23	1888	1635	1236	182
24	1834	1588	1205	181
25	1447	1253	1008	176
26	1254	1086	900	172
27	1221	1052	880	172
28	1259	1090	919	172

nação entre os elos fusíveis, dividindo o diagrama unifilar em trechos. Para a realização da coordenação será utilizado o programa da *S&C electric Coordinaite*.

Efetua-se a coordenação entre os dispositivos que estão localizados mais ao fim do alimentador.

3.1 Coordenação Entre os Elos Fusíveis

No alimentador da UFRB existem 53 pontos onde estão instalados elos fusíveis. Nesta seção apresentam-se três casos mais relevantes da coordenação entre elos fusíveis.

Realiza-se a coordenação entre os pontos 9 e 10, conforme mostrado na Figura 4, por estarem no final do alimentador.

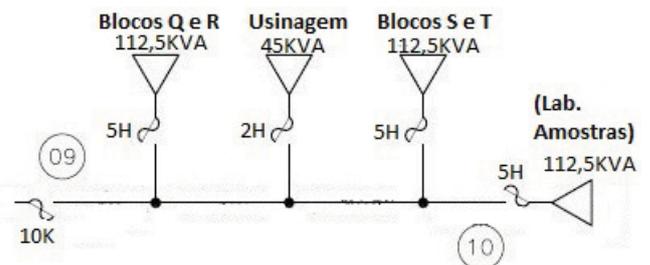


Fig.4. Trecho entre os pontos 9 e 10.

Atualmente, existe um elo fusível de 10K como fusível protegido no alimentador. É necessário realizar apenas a coordenação do fusível protegido com o maior entre os protetores. Portanto, é necessário verificar a coordenação entre o elo fusível de 10K e o elo fusível de 5H. Como apresenta-se no coordenograma da Figura 5.

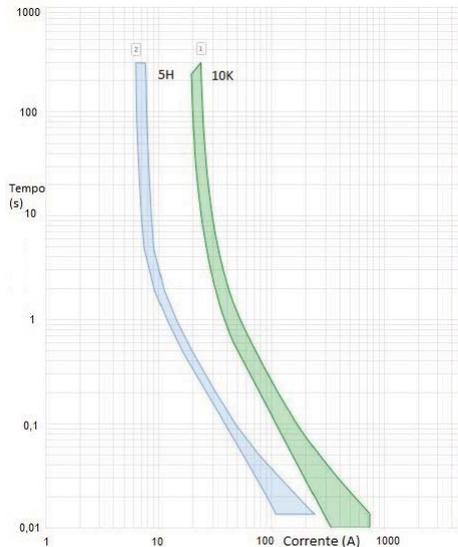


Fig.5. Coordenação Entre os Elos Fusíveis de 10K e 5H entre os Pontos 9 e 10.

O elo protegido deve coordenar com o elo protetor para pelo menos o valor do curto-circuito fase-terra mínimo. No ponto 10 esse valor é 179A Tabela 1. Sendo assim, a coordenação nesse trecho é satisfatória.

Em seguida, realiza-se a coordenação entre os pontos 6 e 9, conforme mostrado na Figura 6.

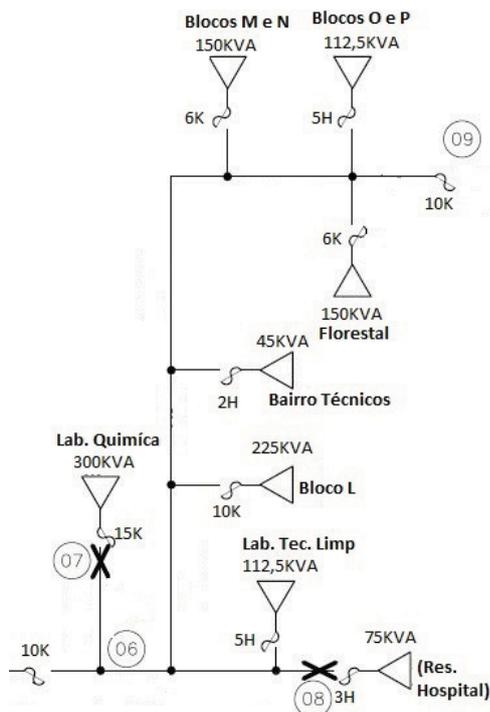


Fig.6. Trecho entre os pontos 6 e 9.

Atualmente, existe um fusível a montante do ponto 6 de capacidade 10K. Esse fusível é o elo protegido nesse trecho, e ele tem que coordenar com o elo de maior capacidade entre os protetores. Entre os elos protetores, o maior é o de 15K, portanto o elo de 10K deve ser substituído por um de ordem superior. Utilizando os elos preferenciais, será escolhido um elo fusível de 25K para garantir a coordenação como mostrado na Figura 7.

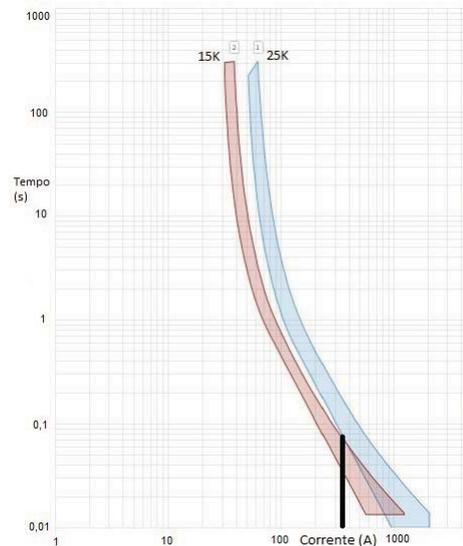


Fig.7. Coordenação Entre os Elos Fusíveis de 15K e 25K entre os Pontos 6 e 9.

A interseção entre as curvas de tempo máximo do elo fusível protetor e de tempo mínimo do elo fusível protegido acontecem em um valor superior a 300A. O elo protegido deve coordenar com o elo protetor pelo menos para o valor de curto-circuito fase-terra mínimo. No ponto 7 esse valor é 182A Tabela1, sendo assim a coordenação entre eles é satisfatória.

Finalmente, realiza-se a coordenação entre os pontos 4 e 5, conforme mostrado na Figura 8.

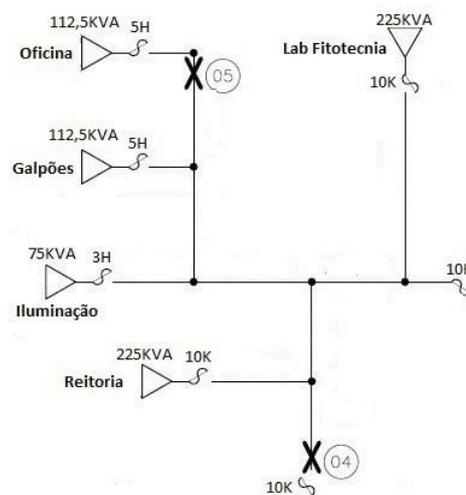


Fig. 8. Trecho entre os pontos 4 e 5.

Primeiramente, é necessário considerar a substituição do elo fusível localizado no alimentador de 10K por um de

25K, localizado a montante do ponto 6. Atualmente um elo de 10K é localizado no ponto 4. É necessário então o substituir por um elo de capacidade maior (utilizando elos fusíveis preferenciais, será utilizado um elo fusível de 40K) e realizar a coordenação com o elo de 25K, o elo de maior capacidade entre os protegidos, para garantirmos uma boa coordenação como apresenta-se na Figura 9.

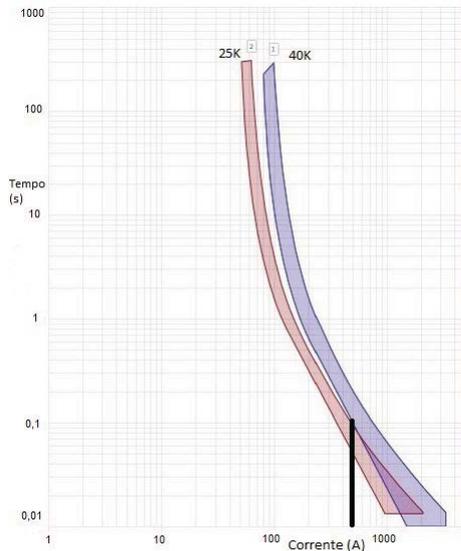


Fig. 9. Coordenação Entre os Elos Fusíveis de 25K e 40K entre os Pontos 4 e 5.

A interseção entre as curvas de tempo máximo do elo fusível protetor e de tempo mínimo do elo fusível protegido acontecem em um valor superior a 400 ampéres. O elo protegido deve coordenar com o elo protetor pelo menos para o valor de curto-circuito fase-terra mínimo. No ponto 5 esse valor é 182A Tabela1, sendo assim a coordenação entre eles é satisfatória.

3.2 Coordenação entre Religador e Chave Fusível

A coordenação entre o religador e a chave fusível deve ser feita de maneira que durante as operações rápidas do religador, os elos fusíveis não sejam fundidos. No entanto, durante a operação retardada do religador os elos fusíveis devem ser fundidos.

Ajuste do Religador: É necessário realizar os ajustes de disparo de fase e neutro do religador. Como visto na seção 2.2, alguns critérios serão adotados. A ideia é que o religador seja instalado no ponto 1. O nível de tensão nominal do sistema é 13,8kV e o valor de curto circuito trifásico no ponto de instalação do religador de acordo com a Tabela 1 é de 2479A.

Ajuste de Disparo de Fase: A corrente de pickup do religador deve ser maior que a corrente nominal do circuito onde o mesmo será instalado, e menor que o valor de curto-circuito bifásico no final do trecho ao qual ele protege:

$$FC \times I_{cargamax} \leq I_{pickup} < \frac{I_{cc2F}}{FS} \quad (3)$$

A corrente nominal avaliada no ponto 1 é de 39A, e o valor mínimo de curto-circuito bifásico no final do trecho segundo a Tabela 1 é no ponto 27, de 1052A. Adotando

um fator de crescimento de carga de 1,3 e um fator de segurança de 1,5, tem-se:

$$1,3 \times 39 \leq I_{pickup} < \frac{1052}{1,5} \quad (4)$$

$$50,7 \leq I_{pickup} < 701,33 \quad (5)$$

Portanto, a corrente de disparo de fase tem que ser maior ou igual que 50,7A e menor que 701,33A.

Ajuste de Disparo de Neutro: A corrente mínima de disparo de neutro do religador deve ser menor que a corrente falta fase-terra mínima, dentro da zona de proteção deste, e deve ser maior que a corrente de desbalanço do neutro.

$$I_{desbalanco} < I_{pickupneutro} < \frac{I_{ccFTmin}}{FS} \quad (6)$$

Será adotado um fator de desbalanço do neutro de 30%, e fator de segurança de 1,5. De acordo com a Tabela 1, o valor de curto circuito fase-terra mínimo no final do trecho no ponto 27 é de 172A.

$$0,3 \times 39 < I_{pickupneutro} < \frac{172}{1,5} \quad (7)$$

$$11,7 < I_{pickupneutro} < 114,67 \quad (8)$$

Portanto, a corrente de disparo de neutro deve ser maior que 11,7A e menor que 114,67A.

É conveniente escolher valores os mais próximos possíveis do limite inferior da desigualdade como a corrente de disparo. Portanto, será escolhido a corrente de disparo de 51A para a fase, e de 12A para o neutro.

O controle de religador escolhido para realizar essa análise é o SEL-351R, que é um controlador da SEL, que possui compatibilidade com vários religadores no mercado. A partir das informações de corrente de pickup é possível então, realizar a análise da coordenação entre o religador, e o fusível mais próximo à jusante, como mostrado no ordenograma da Figura 10, coordenação entre o religador e o fusível de 40k.

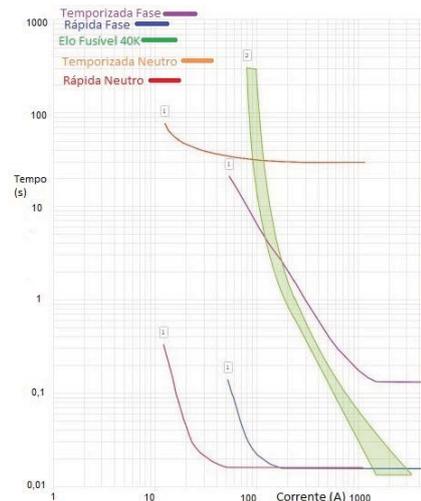


Fig. 10. Coordenação Entre Religador e o Fusível de 40K.

Através da análise do ordenograma é possível observar que as operações rápidas de neutro e fase do religador irão atuar primeiro do que a chave fusível. No entanto, se a

falta não for extinta durante as operações rápidas, o elo fusível será fundido no intervalo entre as operações rápida e temporizada do religador.

3.3 Coordenação entre Relé e Religador

O relé no alimentador da UFRB funciona como proteção de retarguada do religador. Isto é, se durante uma falta o religador apresentar algum tipo de problema e não atuar, o relé será o responsável em seccionar o circuito, evitando maiores problemas. Os ajustes do relé já foram realizados pelo engenheiro responsável. Com essas informações, se torna necessário então, realizar a análise do coordenograma. Através dos cálculos realizados na seção anterior de correntes de pickup de fase e terra do religador e com os ajustes de pickup do relé, é possível observar que as correntes de ajuste do religador são menores que as correntes de ajuste do relé dentro da faixa de coordenação.

Na Figura 11, mostra-se o coordenograma entre o relé e o religador.

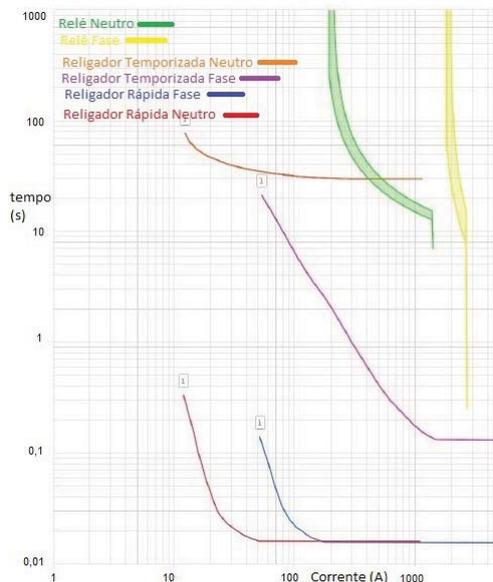


Fig.11. Coordenação Entre o Relé e o Religador.

Através da análise do coordenograma, é possível observar que os relés de fase e neutro não irão operar enquanto o religador realiza sua sequência de operação. Atendendo, dessa forma, mais um critério importante para a coordenação entre esses dispositivos.

4. CONCLUSÃO

A coordenação foi realizada de forma que o sistema se tornasse o mais seletivo possível. Com a inserção do religador, o problema das faltas transitórias é solucionado, evitando que faltas transitórias se tornassem faltas permanentes. Para a coordenação entre os elos fusíveis, foi utilizado o critério em que o tempo máximo de fusão do elo protetor não deve exceder 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido. Dessa forma, o sistema se torna cada vez mais seletivo, tendo em vista que as chaves fusíveis são as proteções primárias do sistema de distribuição na UFRB. Além disso, com a substituição de alguns elos fusíveis, o sistema irá apresentar uma coordenação mais eficiente.

Para a coordenação do religador com o elo fusível, foi adotado o critério em que durante as operações rápidas do

religador, os elos fusíveis devem ser mantidos intactos. No entanto, durante as operações temporizadas do religador, o elo fusível será fundido. Dessa maneira, durante uma falta temporária, os elos fusíveis serão preservados e o sistema voltará ao seu estado normal de funcionamento após o religamento. Para a coordenação entre o relé e o religador, foi levado em consideração que o relé na rede da UFRB funciona como proteção de retarguada para o religador. Ou seja, se houver alguma falha na operação do religador, o relé irá atuar, extinguindo a falta.

AGRADECIMENTOS

Ao CETEC/UFRB, IFRN, DEE/UFBA e CNPq.

REFERÊNCIAS

- Bedekar, Prashant P.; Bhide, S.R.K.V.S. (2009). Coordination of overcurrent relays in distribution system using linear programming technique. *International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation. IEEE*.
- Campitelli, E.M. (2007). Análises e estudos para alocação e ajustes de dispositivos de proteção em redes de média tensão de energia elétrica com geração distribuída. *Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira*.
- CEMIG (2017). *Proteção de Sobrecorrentes do Sistema de Distribuição de Média Tensão*. CEMIG.
- CPFL (2003). *Proteção de Sobrecorrente*. ed. [S.l.]: CPFL.
- Kagan, N. (2010). *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. Editora Edgard Blucher.
- Macedo, A. (2019). Análise dos benefícios da inserção de um religador na subestação do sistema de distribuição de energia elétrica da avenida fab, localizada no centro demacapá. *Monografia, UNIFAP*.
- Ramos, M.J.S. (2014). Metodologia para análise de coordenação e seletividade de dispositivos de proteção durante reconfigurações de redes de distribuição. *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS)*.
- Santos, R.A. (2012). *Proteção contra sobrecorrentes em redes de distribuição aéreas de 13,8 kv: Análise de desempenho do sistema atual e proposta para melhoria. Monografia-CESEP*.
- Sookrod, Poonyapa; WirasANTI, P. (2018). Overcurrent relay coordination tool for radial distribution systems with distributed generation. *5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE). IEEE*.