

SELETIVIDADE E INTEROPERABILIDADE SEGUNDO A NORMA IEC61850: UMA ABORDAGEM SOBRE ENERGIA INCIDENTE

KELI C. S. ANTUNES¹, LARA B. BORGES², AURÉLIO L. M. COELHO², FREDERICO O. PASSOS¹, PAULO M. SILVEIRA¹

1. Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903

2. Diretoria Acadêmica de Itabira (DAI), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

E-mails: kelicsantunes@gmail.com, larabatista18@gmail.com,
aurelio.coelho@unifei.edu.br, fredericopassos@unifei.edu.br,
pmsilveira@unifei.edu.br

Abstract— The occurrence of faults in the electrical system, in addition to interfering with its regular operation, can generate risks to network operators, that could cause serious burns or even fatalities. In order to quantify the heat released with the formation of the arc flash, methodologies of calculation of incident energy are used to determine a safety distances and the necessity of protection equipment. Knowing that the reduction of protection time is the simplest way to reduce the incident energy without involving acquisition and implantation costs, it is considered that the evolution of intelligent electronic devices (IED's) and the standardization of the electrical system automation process by the IEC61850 standard can result in improvement in the system protection times. This article presents a comparative approach of the incident energy values when different types of selectivities are implemented, they are the chronological, conventional logic (via cable) and by IEC61850 via GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event). For this purpose, an industrial real power system is modeled and simulated in ATP (Alternative Transient Program) for different short circuit cases to analyses the overcurrent relays responses in this context. The secondary current signals from this simulation are applied in the relays of a laboratory structure designed as a test-bed system. Afterwards the system is modeled in commercial software to perform the incident energy study. The main results and conclusions are presented and analyzed based in response times of the relays and the incident energy values obtained.

Keywords— Arc Flash, Incident Energy, GOOSE message, IEC 61850, Protection IED, Selectivity.

Resumo— A ocorrência de faltas no sistema elétrico acompanhadas da formação de arco representam riscos aos trabalhadores, pois podem gerar queimaduras graves ou até mesmo fatalidades. De forma a quantificar o calor liberado com a formação do arco elétrico, são utilizadas metodologias de cálculo de energia incidente possibilitando determinar as distâncias de segurança e os equipamentos de proteção necessários. Sabe-se que a redução do tempo de atuação da proteção é a forma mais simples de atuar na redução da energia incidente sem envolver custos de aquisições e implantações de mitigadores. Assim como, a evolução dos dispositivos eletrônicos inteligentes (IED's) e a padronização do processo de automação do sistema elétrico pela norma IEC61850 podem resultar na melhoria dos tempos de atuação das proteções do sistema. Nesse contexto, este artigo apresenta uma abordagem comparativa dos valores de energia incidente quando são implantadas as seletividades cronológica, lógica convencional (via cabo) e pela IEC61850 via mensagem GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event). Para isso, um sistema de potência industrial é modelado e simulado no ATP (Alternative Transient Program) para diferentes casos de curtos. Os sinais secundários resultantes da simulação são carregados em um equipamento de teste e aplicados nos relés de proteção de uma estrutura de laboratório projetada para os testes de forma a obter os tempos de atuação. Posteriormente o sistema é modelado em um software comercial para realização do estudo de energia incidente. Os principais resultados e conclusões são apresentados e analisados com base nos tempos de respostas dos relés e dos valores de energia incidente obtidos.

Palavras-chave— Energia Incidente, Arco Elétrico, Mensagem GOOSE, IEC 61850, Seletividade.

1 Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão sujeitos a constantes perturbações que afetam o seu funcionamento normal, sendo a mais comum o curto-circuito que pode ser causado por falhas na isolamento, intempéries ou rompimento dos condutores. Os curtos-circuitos, quando severos, podem gerar o arco elétrico colocando em risco os operadores que trabalham direta ou indiretamente nas instalações do SEP, além de danos aos equipamentos.

O arco elétrico é um fenômeno comum no SEP que, quando ocorre de maneira indesejada e descontrolada, atinge altas temperaturas, provoca a expansão do ar, liberação de vapores metálicos e projeção

de metal fundido, podendo provocar queimaduras graves ou até mesmo fatalidades.

De forma a quantificar o calor liberado com a formação do arco elétrico, são utilizadas metodologias de cálculo de energia incidente como as abordadas nos métodos IEEE 1584 (IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations) e NFPA 70E (Standard for electrical safety requirement for employee workplace). Desse modo, pode-se determinar as distâncias de segurança e os equipamentos de proteção individual (EPI's) necessários para realização de trabalhos em determinado ponto do sistema elétrico.

Uma das alternativas para redução da energia incidente é reduzir o tempo de atuação das proteções. Isto diminui o tempo de duração do arco e consequentemente da energia incidente. Além disso, esta é

uma das alternativas mais simples e de menor custo a ser implementada. Neste contexto os avanços tecnológicos possibilitaram a evolução e aprimoramento das funções de proteção e controle dos dispositivos microprocessados. A padronização da automação do sistema elétrico, advinda da norma *IEC 61850* (2003), possibilitou que os relés desempenhassem diversas funções além da proteção, tais como: controle, medição, comunicação, intertravamento e monitoramento. Desta forma, os relés passaram a ser denominados *Intelligent Electronic Devices (IED's)*. Esse fato possibilita que os sistemas de proteção sejam projetados visando à extinção da falta o mais rápido possível de forma seletiva e coordenada, retirando de operação somente a parte que apresenta defeito, garantindo a segurança, confiabilidade e continuidade do serviço.

A redução do tempo é a forma mais simples de atuar na redução da energia incidente. Aquisições e implantações de mitigadores como: Resistências de Alto Valor Ôhmico (RAVO) no neutro do transformador, visando limitar a corrente de curto-circuito fase-terra, ou a instalação dos relés de arco, que além da aquisição, demanda parada dos equipamentos e equipe específica para instalação e configuração, resultam em custos elevados. Assim, surgiu o interesse em realizar um estudo comparativo dos valores de energia incidente liberada por arcos elétricos ocasionados por curtos-circuitos em um sistema com seletividade cronológica, seletividade lógica convencional e seletividade lógica via *GOOSE*.

Os fundamentos teóricos necessários para compreensão do trabalho, a metodologia utilizada, os principais resultados, discussões e conclusões são apresentados nas seções seguintes.

2 Fundamentação Teórica

Nesta seção são abordados conceitos gerais sobre arco elétrico, energia incidente, coordenação e seletividade, norma *IEC61850* e mensagem *GOOSE*, necessários para compreensão do trabalho.

2.1 Arco elétrico

A formação do arco elétrico ocorre quando a ionização do ar é suficiente para permitir a passagem da corrente elétrica através deste meio. Sua temperatura pode chegar a elevados valores (20.000°) mesmo que sua ocorrência seja de curtíssima duração (menos de 1s). Durante a ocorrência do fenômeno é liberada alta quantidade de energia na forma de calor e ondas de pressão devido à expansão térmica do ar, além de vapores metálicos e projeção de metais fundidos (IEEE Std 1584.1-2013, 2014), (Mohajeryami et al., 2017).

2.2 Energia Incidente

Definida como a quantidade de energia térmica que incide em uma superfície durante a ocorrência de

um arco elétrico, a energia incidente é expressa em calorias por centímetro quadrado (cal/cm²) (IEEE Std 1584.1-2013, 2014), (Mohajeryami et al., 2017).

Para quantificar a energia incidente e assim tomar as medidas de proteção adequadas, são utilizadas metodologias de cálculo como as tratadas nos métodos IEEE 1584 (*IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations*) e NFPA 70E (*Standard for electrical safety requirement for employee workplace*), sendo estas comumente utilizadas para sistemas industriais.

Como metodologia para o cálculo da energia incidente escolheu-se a IEEE 1584 para este trabalho. Seus cálculos são baseados em análises estatísticas de ensaios realizados e são necessárias informações como tensão nominal, corrente de curto-circuito trifásica, características das instalações e equipamentos, tempos de atuação dos dispositivos de proteção, tempos de abertura dos disjuntores.

O cálculo consiste em determinar inicialmente a corrente de arco (I_a). Para sistemas com tensão nominal maior que 1kV, esta corrente é calculada conforme (1).

$$I_a = 10^{[0,00402+0,983*\log(I_B)]} \quad (1)$$

onde I_B é a corrente de falta franca trifásica para a barra em kA.

Em seguida calcula-se o valor de energia incidente normalizada através de (2), em que o tempo de atuação e a distância do operador em relação ao arco são normalizados em 0,2s e 610mm respectivamente.

$$E_N = 10^{[K_1+K_2+1,081*\log(I_a)+0,0011*G]} \quad (2)$$

onde E_N é a energia incidente normalizada (J/cm²); K_1 é -0,555 (barramento encapsulado) ou -0,792 (barramento aberto); K_2 é 0 (não aterrados ou aterrados com alta resistência) ou -0,113 (sistemas aterrados); I_a é a corrente de arco (kA); G é distância entre os condutores (mm).

A energia incidente real é então calculada conforme (3):

$$E = 4,184 * C_f * E_N * \left(\frac{t}{0,2}\right) * \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (3)$$

onde E é a energia incidente (cal/cm²); C_f é o fator de tensão (1 para tensão > 1kV ou 1,5 tensão ≤ 1kV); E_N é a energia incidente normalizada (J/cm²); D é a distância (mm) do ponto de arco elétrico até o trabalhador; x é o fator de distância (1,641 para 0,208 < tensão < 1kV ou 0,973 para 5 < tensão < 15kV); t é o tempo total de duração do arco (s).

Nota-se que a energia incidente é proporcional ao tempo de duração do arco e inversamente proporcional a distância do ponto do arco elétrico até o trabalhador.

Após o cálculo da energia incidente pode-se definir a categoria dos EPI's conforme a norma NFPA

70E, as quais são mostradas na Tabela 1 (Mardegan, 2012).

Tabela 1. Categoria de vestimentas em função da energia incidente (Norma NFPA 70E).

Categoria	0	1	2	3	4
Energia Incidente (cal/cm ²)	<1,195	4	8	25	40

2.3 Coordenação e Seletividade

A coordenação do sistema visa evitar a atuação indevida da proteção através da seletividade imposta por meio dos tempos ajustados nos dispositivos. Já a seletividade é responsável por garantir a desconexão da menor parte do circuito com defeito, no menor tempo possível. Existem diferentes tipos de seletividade, dos quais dois são apresentados brevemente na sequência e abordados com maiores detalhes em Mamede (2001).

- Seletividade Cronológica

Consiste em ajustar os dispositivos de proteção com diferentes intervalos de tempo ao longo do circuito, partindo do princípio que o dispositivo mais próximo à falta tenha um tempo de atuação menor que um dispositivo localizado a montante desta. São aplicados intervalos de coordenação de 0,3 a 0,5s (Mamede, 2001).

- Seletividade Lógica

Esse procedimento se utiliza da troca de informações através de sinais lógicos enviados via cabos elétricos entre os dispositivos de proteção, sendo que, ao perceber o curto-circuito, o *IED* mais próximo à falta envia sinal lógico bloqueando a função de proteção do *IED* a montante. Essa filosofia proporcionou consideráveis avanços com relação à redução do tempo de eliminação das falhas, apresentando tempos de coordenação de 0,15 a 0,20 s (Mamede, 2001), quando comparado aos outros esquemas de seletividade.

2.4 IEC 61850

A norma *IEC 61850* (2003) define padrões de automação e proteção do sistema elétrico, proporcionando liberdade de configuração, redução do custo com fiação e interoperabilidade entre dispositivos, características que possibilitam os equipamentos de diferentes fabricantes comunicarem entre si.

A norma *IEC61850* padroniza a comunicação entre dispositivos, sendo comum a utilização da mensagem *MMS* (*Manufacturing Message Specification*) para controle, sinalização e troca de arquivos, e a mensagem *GOOSE* para eventos críticos como intertravamento, envio de sinais de atuação (*trip*) e seletividade lógica (*IEC 61850*, 2003).

2.5 Mensagem Goose

As mensagens *GOOSE* são utilizadas para comunicação entre *IED*'s, sendo esta definida como comunicação horizontal. Para assegurar sua veloci-

dade e confiabilidade, elas são enviadas para a rede de maneira assíncrona. Na Figura 1 pode-se observar que, na ocorrência de um evento, a publicação da mensagem ocorre no menor intervalo de tempo possível (T_1). Após três mensagens este intervalo é dobrado (T_2 e T_3) até atingir o tempo de retransmissão em condição estável (T_0). Estas mensagens carregam apenas o endereço *MAC* (*Media Access Control*), trafegam nas duas camadas inferiores do modelo *OSI* (*Open Systems Interconnect*) e são transmitidas a todos os dispositivos conectados à rede. Porém, apenas os dispositivos configurados captam a mensagem *GOOSE*. Estes fatores possibilitam que estas mensagens atinjam tempos de transmissão de até 4ms (*IEC 61850*, 2004), (Santos et al., 2007), (Tarlochan et al., 2011).



Figura 1. Tempos de transmissão das mensagens *GOOSE*. (*IEC 61850*, 2003).

3 Materiais e Métodos

Para a realização deste estudo, um sistema de potência real é representado via simulação no *software ATPDraw* para obtenção dos sinais de falta e via *software* comercial para realização do estudo de arco elétrico. O diagrama unifilar deste sistema de potência é ilustrado na Figura 2. Ele é composto por uma conexão com a concessionária de energia em 230 kV no ponto A. Entre os pontos A e B, tem-se uma LT de 5,8 km que interconecta a concessionária à subestação principal, onde existe um transformador abaixador, conectado em Δ -Y, de 230 kV para 13,8 kV e potência de 40 MVA fornecendo energia às cargas conectadas ao ponto C. O disjuntor 1 (DJ1) é comandado por um *IED* para proteção da LT (*IED A*), e os disjuntores 2 (DJ2) e 3 (DJ3) são comandados por um *IED* para proteção do transformador (*IED B*).

Para os estudos do tempo de extinção de um curto-circuito, é simulada uma falta no ponto D e analisados os tempos de atuação dos *IED*'s para diferentes tipos de seletividade.



Figura 2. Topologia da rede analisada

Os dados reais utilizados para modelagem dos componentes são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Para análise das proteções, foram simulados curtos-circuitos monofásicos, por serem mais comuns no sistema elétrico, além de curtos-circuitos trifásicos devido a sua intensidade. Neste estudo, considerou-se o ponto da falta entre o secundário do transformador e o DJ3. Neste cenário, para as seletividades lógicas, o DJ2 deve eliminar a falta, de forma instantânea através da atuação da função ANSI 50 ajustada no IED B, e, em caso de falha deste, o disjuntor a montante (DJ1) deve realizar a proteção de retaguarda através da atuação da função ANSI 51 ajustada no IED A.

Tabela 2. Dados dos condutores da Linha de Transmissão.

Resistência Condutores Fase	0,1075 Ω /km
Resistência Condutores Para-raios	3,81 Ω /km

Tabela 3. Dados do transformador abaixador.

Transformador (Δ -Y): 230-13,8 kV e S = 40 MVA
Impedância percentual: 11,9 %

3.1 Reprodução dos Sinais

Os sinais das correntes de curtos-circuitos, obtidos na simulação no ATPDraw foram exportados em arquivo com extensão .pl4 e reproduzidos na mala de testes OMICRON CMC356 através do módulo Advanced TransPlay do software OMICRON Test Universe (OTU) para serem aplicados nos relés sob teste.

O módulo Configuração DJ, também do software OTU, foi utilizado para representar o comportamento apenas do DJ2, uma vez que não é possível simular disjuntores simultâneos. Considerou-se o tempo de abertura do disjuntor de 4 ciclos (66,67 ms). Os demais disjuntores foram simulados virtualmente através de lógicas implementadas nos relés.

3.2 Parametrização dos IED's

Foi utilizado o IED A para a proteção da LT e o IED B para proteção do transformador. No IED B foi parametrizada a função de sobrecorrente instantânea (ANSI 50) e no IED A foi ajustada a função de sobrecorrente temporizada (ANSI 51) com tempo definido, para devida coordenação na ocorrência de faltas no ponto D ilustrado na Figura 2.

A lógica de controle do IED B, desenvolvida no software de parametrização do respectivo fabricante, é apresentada na Figura 3, onde na sua saída binária OUT102 é enviado o sinal de trip para comando de abertura do DJ2. Este sinal de trip (TRIPT) é proveniente do segundo nível da função de sobrecorrente instantânea (ANSI 50), já que o primeiro nível é utilizado para a seletividade lógica (50TP1) que, quando implementada, é transmitida pela sua saída binária OUT103 ao IED a montante (IED A). Em caso de falha na abertura do DJ2, é enviado o sinal lógico 50BF (Break Failure) através da sua saída binária

OUT105 para atuação do IED A. Esta saída é ativada quando, após o envio do trip e passado o tempo de abertura do DJ2, este ainda se mantém fechado. Estas condições são verificadas através de um temporizador (PCT05Q) e pelo sinal de disjuntor fechado, recebido pela entrada IN102.

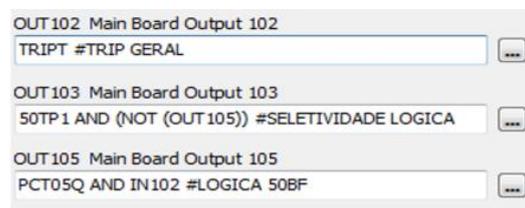


Figura 3. Lógica de controle do IED B.

Na Figura 4 ilustra-se a lógica do IED A, desenvolvida no software do respectivo fabricante, em que o bloco OC4PTOC realiza a função de sobrecorrente temporizada (ANSI 51). Esta função é bloqueada em caso de recepção do sinal de seletividade lógica do IED B. Na ocorrência de falha no DJ2, o sinal de 50BF é recebido pelo IED A que envia o sinal TRIP instantaneamente para abertura do DJ1. Tanto o sinal de seletividade lógica quando o sinal de 50BF podem ser recebidos por sinal lógico via cabo (SELETIVIDADE_LOGICA e 50BF) ou mensagens GOOSE via rede (SEL_LOGICA_GOOSE e 50BF_GOOSE) de acordo com a filosofia implementada.

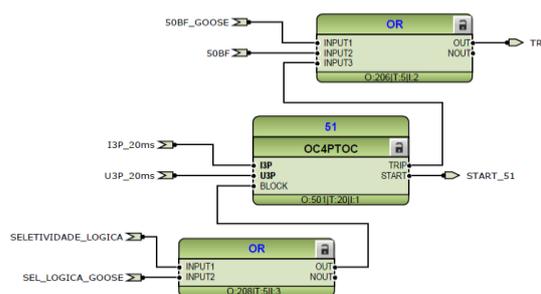


Figura 4. Lógica de controle IED A.

3.3 Configuração das Mensagens Goose

Para seletividade lógica via mensagem GOOSE, foi necessária a configuração do IED B para envio dos sinais lógicos, via rede, ao IED A localizado a montante. Para isso utilizou-se outro software do respectivo fabricante para a configuração dos pacotes contendo as informações (ver Figura 5).



Figura 5. Configuração das Mensagens GOOSE.

3.4 Rede de Comunicação

Foi estabelecida uma rede de comunicação entre os IED's para tráfego das mensagens GOOSE, além de servir para alteração de parâmetros e coleta das oscilografias dos IED's e comunicação com a mala de testes. A Figura 6 exemplifica a arquitetura de testes utilizada.

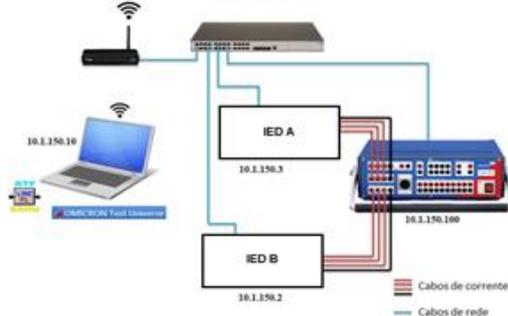


Figura 6. Arquitetura do sistema de testes.

3.5 Sincronização

Para que fosse possível a análise dos tempos de atuação dos IED's por meio de suas oscilografias, eles foram colocados em uma mesma base de tempo por meio de sincronização horária via *SNTP* (*Simple Network Time Protocol*). Para isso, utilizou-se *software* para possibilitar que o computador funcione como servidor *SNTP*.

3.6 Estudo de energia incidente

Para o estudo da energia incidente modelou-se o sistema elétrico em um *software* comercial. Este estudo segue as metodologias *NFPA 70E 2004* e *IEEE 1584* e combina cálculos de curto-circuito, equações empíricas e tempos de operação dos dispositivos de proteção para estimar a energia incidente e os requisitos de vestuário de proteção e distâncias de trabalho.

4 Resultados e Discussões

Na Figura 7 são mostrados os sinais de correntes de curtos-circuitos monofásico e trifásico, aplicados nos testes laboratoriais. O ângulo da corrente no momento de fechamento da falta, para o curto-circuito monofásico, é de 124° e o valor da corrente de período subtransitório é de 36,770 A.

Os valores de correntes nominais no primário e secundário do transformador são 132 A e 2220 A, respectivamente, os TC's (Transformadores de Corrente) foram modelados de forma ideal, cujos valores para o IED A é de 600-5 A e para o IED B é 1000-5A.

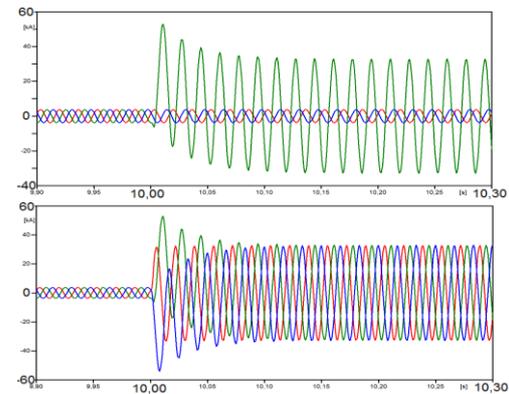


Figura 7. Correntes de curtos-circuitos monofásico (superior) e trifásico (inferior).

A seguir são apresentados os resultados e discussões acerca dos ensaios realizados para cada tipo de esquema de seletividade analisado.

4.1 Seletividade Cronológica

Na seletividade por tempo, a função *ANSI 50* do IED B foi ajustada com 8000 A, já o IED A foi ajustado com 480 A e 300 ms com uma curva de tempo definido (ver Figura 8).

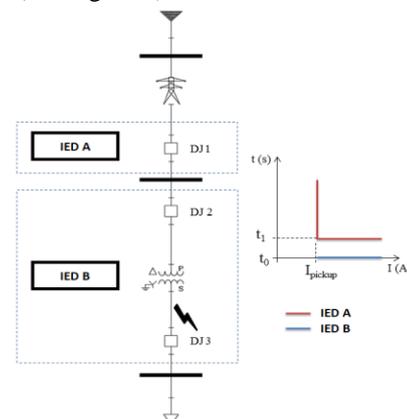


Figura 8. Seletividade Cronológica.

Na Figura 9, pode-se observar que o DJ2 atuaria (*IN101*) após 79,2 ms da detecção da falta.

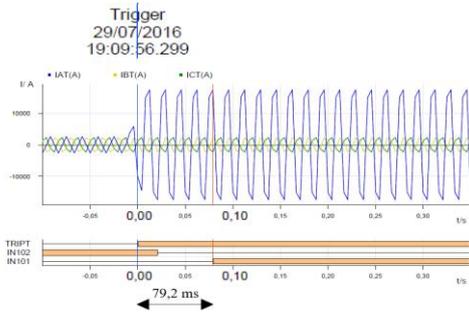


Figura 9. Oscilografia do IED B para seletividade cronológica.

Na condição de falha do DJ2, o IED A atuaria eliminando a falta após 397 ms como mostra a Figura 10.

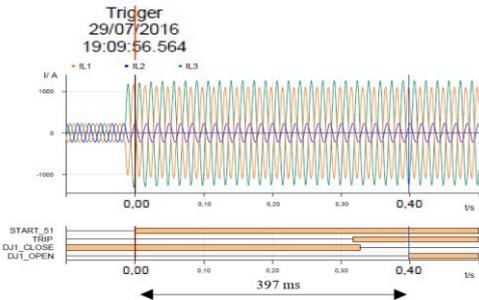


Figura 10. Oscilografia do IED A para seletividade cronológica.

4.2 Seletividade Lógica via cabo

Na seletividade lógica via cabo, a função ANSI 50 do IED B foi ajustada com 8000 A, já o IED A foi ajustado com 480 A e 100 ms. Para envio e recepção do sinal de seletividade lógica, foi configurada a saída digital OUT103 do IED B e a entrada digital 16-17 do módulo X324 do IED A. Em caso de falha do DJ2, o sinal 50BF é enviado pela saída digital OUT105 do IED B para o IED A onde a entrada 12-13 do módulo X324 recebe este sinal. A Figura 11 apresenta as configurações descritas.

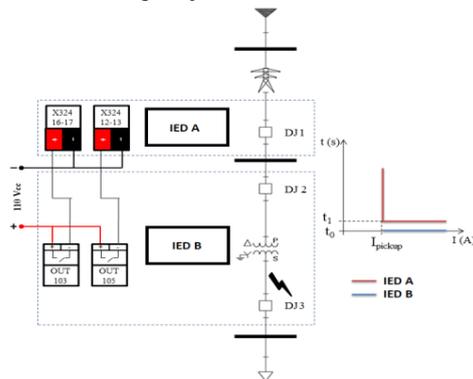


Figura 11. Seletividade lógica via cabo.

Após realização dos ensaios, verificou-se que a falta foi eliminada pela ação do IED B após 79,2 ms. Conforme Figura 12, ao detectar a falta, ocorre o start da função de proteção (50TP1) e é enviado o sinal de seletividade lógica (OUT103) para bloqueio da atuação do IED a montante. Desta forma a falta é extinta após o envio do sinal de trip (TRIP) e abertura do DJ2.

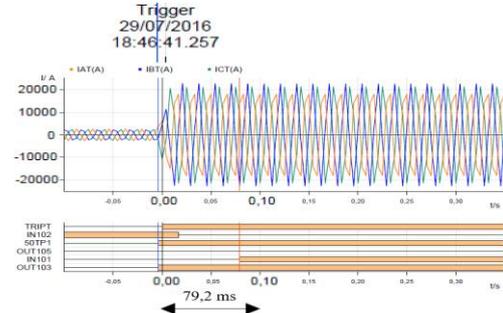


Figura 12. Oscilografia do IED B para seletividade lógica via cabo.

Na Figura 14 observa-se a atuação do IED A para a ocorrência de falha do DJ2 (50BF). Nesta condição este IED recebe o sinal de seletividade lógica (SEL_LOGIC). Com a não abertura do DJ2 (DJ2_CLOSE), é recebido o sinal de 50BF (50BF) e o trip (TRIP) é enviado pelo IED A comandando a abertura do DJ1.

O IED A recebe o sinal de seletividade lógica (SEL_LOGIC) e mantém a função de sobrecorrente bloqueada enquanto esta estiver habilitada, evitando a atuação indevida, como pode ser visto na Figura 13.

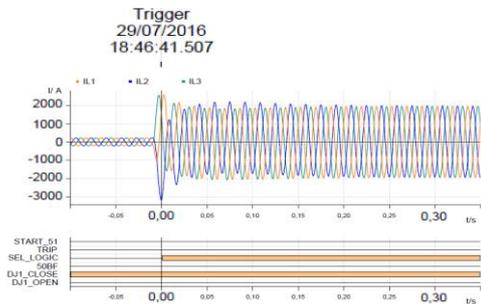


Figura 13. Oscilografia do IED A para seletividade lógica via cabo.

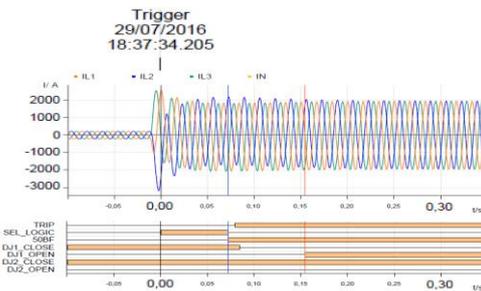


Figura 14. Oscilografia do IED A para seletividade lógica via cabo com 50BF.

Para esta condição, de falha no disjuntor 50BF, utilizou-se a mala de testes para medir o tempo total de extinção da falta (DJ1_OPEN) que foi de 172,4 ms (Figura 15).

Avaliações do tempo: CURTO_TRIFASICO				
Nome	Condição do Estado			Tatual
	Início	Parar		
1 TRIP ABB	Início falta	Disparo A		98,60 ms
2 SEL_LOGIC	Início falta	Disparo C		28,90 ms
3 50 BF	Início falta	Disparo D		99,00 ms
4 DJ1_OPEN	Início falta	Disparo E		172,4 ms

Figura 15. Tempos de atuação medidos pela mala de testes OMICRON.

4.3 Seletividade Lógica via GOOSE

Na seletividade lógica via mensagens *GOOSE*, a função de sobrecorrente do *IED B* foi ajustada com 8000 A e 0 ms e o *IED A* foi ajustado com 480 A e 10 ms. Foram configurados pacotes de mensagens para envio e recepção dos sinais de seletividade lógica, 50BF e status do DJ2 (Figura 16).

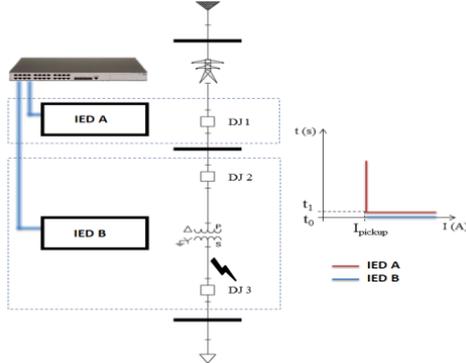


Figura 16. Seletividade Lógica via *GOOSE*.

O tempo de extinção da falta pela atuação do *IED B* foi de 79,2ms (Figura 17). Ao detectar a falta, ocorre o *start* da função de proteção (*50TP1*) e é enviado o sinal de seletividade lógica via *GOOSE* (*OUT103*) para bloqueio da atuação do *IED* a montante. Deste modo a falta é eliminada após o envio do sinal de *trip* (*TRIP*) e abertura do DJ2.

Na oscilografia do *IED A* (Figura 18) observa-se a recepção do sinal de seletividade lógica (*SEL_LOG_GOOSE*) e do status do DJ2 (*DJ2_CL_GOOSE* e *DJ2_OP_GOOSE*) via mensagem *GOOSE*.

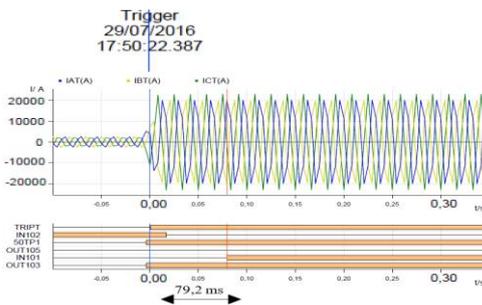


Figura 17. Oscilografia do *IED B* para seletividade lógica via *GOOSE*.

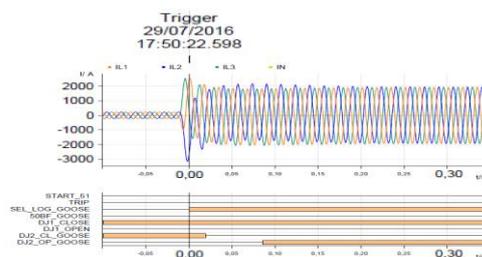


Figura 18. Oscilografia do *IED A* para seletividade lógica via *GOOSE*.

A Figura 19 apresenta a atuação do *IED A* ao receber o sinal de 50BF (*50BF_GOOSE*), quando é simulada a falha do DJ2. Pode-se observar que este *IED* recebe o sinal de seletividade lógica via *GOOSE*

(*SEL_LOG_GOOSE*). Com a não abertura do DJ2 (*DJ2_CL_GOOSE*), é recebido o sinal de 50BF (*50BF_GOOSE*) e o *trip* (*TRIP*) é enviado pelo *IED A* comandando a abertura do DJ1.

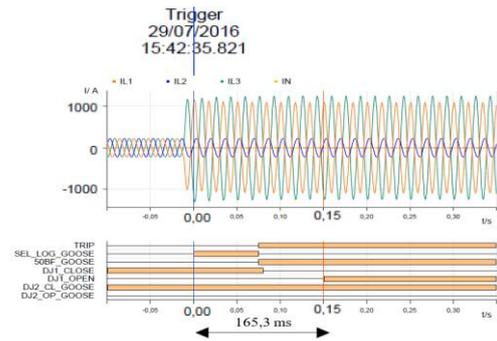


Figura 19. Oscilografia do *IED A* para seletividade lógica via *GOOSE* com 50BF.

Nesta condição o tempo total de extinção da falta (*DJ1_OPEN*) é de 165,3 ms conforme medição da mala de testes na Figura 20.

Avaliações do tempo: Curto_monofasico				
	Nome	Condição do Estado		
		Início	Parar	Tatual
1	TRIP ABB	Início falta	Disparo A	91,70 ms
2	SEL_LOGIC	Início falta	Disparo C	16,40 ms
3	50 BF	Início falta	Disparo D	91,60 ms
4	DJ1_OPEN	Início falta	Disparo E	165,3 ms

Figura 20. Tempos de atuação medidos pela mala de testes *OMICRON*.

4.4 Estudo de energia incidente

Conhecidos os tempos de atuação das proteções obtidos nos ensaios laboratoriais, realizou-se a modelagem do sistema em um *software* comercial para obtenção das correntes de curto-circuito e posterior cálculo da energia incidente utilizando-se o módulo *Arc Flash Evaluation*. Os resultados para cada um dos tipos de seletividade são apresentados a seguir. A Tabela 4 mostra a tensão nominal, a máxima corrente de falta e a corrente do arco elétrico para cada barra do sistema.

Tabela 4. Tensão, corrente de falta e arco nas barras.

Barra	BUS-A	BUS-B	BUS-C
Tensão da Barra (kV)	230	230	13,80
Corrente de Falta (kA)	8,75	7,28	15,64
Corrente do Arco (kA)	8,75	7,28	15,06

O tempo de extinção da falta, a distância de alcance do arco elétrico, a energia incidente e a categoria da vestimenta de proteção necessária são apresentados nas tabelas a seguir.

Para seletividade cronológica, em que se obteve um tempo médio de extinção de falta de 400 ms para um caso crítico em que atua a proteção de retaguarda, o resultado dos estudos de energia incidente são apresentados na Tabela 5. A energia incidente no ponto de falta, que corresponde à barra C de 13,8 kV, tem valor de 10 cal/cm², sendo assim, para o traba-

lhador desempenhar suas atividades neste ponto do sistema, é necessário uma vestimenta de proteção de categoria 3. Nas outras barras observa-se um o aviso “Atenção!” visto que não há EPI’s para o nível de energia incidente calculado.

Tabela 5. Estudos de energia incidente para seletividade cronológica.

Barra	BUS-A	BUS-B	BUS-C
Tempo para Extinção da Falta (sec.)	0.80	0.60	0.40
Alcance do Arco Elétrico (mm)	26250	20734	8440
Energia Incidente (cal/cm ²)	3939	2458	10.39
Categoria de Proteção Requerida	Atenção!	Atenção!	Categoria 3

Para o esquema de proteção com seletividade lógica via cabo, obteve-se um tempo médio de extinção de falta de 170 ms para o caso crítico em que atua a proteção de retaguarda. Nessas condições a energia incidente no ponto de falta, que corresponde à barra C de 13,8 kV, tem valor de 4,41 cal/cm², conforme mostra a Tabela 6. Para este valor de energia incidente é necessária uma vestimenta de proteção de categoria 2 para realização de trabalho no local.

Tabela 6. Estudos de energia incidente para seletividade lógica via cabo.

Barra	BUS-A	BUS-B	BUS-C
Tempo para Extinção da Falta (sec.)	0.57	0.37	0.17
Alcance do Arco Elétrico (mm)	22158	16282	3503
Energia Incidente (cal/cm ²)	2807	1516	4,41
Categoria de Proteção Requerida	Atenção!	Atenção!	Categoria 2

Para a seletividade lógica via *GOOSE*, obteve-se um tempo médio de extinção de falta de 165 ms para o caso crítico em que atua a proteção de retaguarda. Os resultados dos estudos para estas condições são apresentados na Tabela 7. A energia incidente no ponto de falta, que corresponde à barra C de 13,8 kV, tem valor de 4,29 cal/cm², sendo necessária uma vestimenta de proteção de categoria 2 para realização de trabalho no local.

Tabela 7. Estudos de energia incidente para seletividade lógica via *GOOSE*.

Barra	BUS-A	BUS-B	BUS-C
Tempo para Extinção da Falta (sec.)	0.565	0.365	0.165
Alcance do Arco Elétrico (mm)	22060	16171	3397
Energia Incidente (cal/cm ²)	2782	1495	4,29
Categoria de Proteção Requerida	Atenção!	Atenção!	Categoria 2

5 Conclusão

Os resultados obtidos por meio dos ensaios e estudos realizados neste trabalho demonstram a eficiência do uso da seletividade lógica na redução do tempo de extinção da falta e consequentemente a diminuição da energia incidente no sistema elétrico, reduzindo os danos aos equipamentos e principalmente às pessoas.

Nota-se que a utilização da seletividade lógica possibilitou a redução de 10cal/cm² para 4cal/cm², representando a mudança da classe 3 para classe 2 e redução de 54% no valor da energia incidente.

Mesmo com a proximidade dos valores de energia incidente com a seletividade lógica via cabo e via *GOOSE* (redução de 3%), vale destacar que pode ocorrer a mudança da categoria dos EPI’s caso o valor de energia incidente esteja próximo aos limites das faixas de classificação.

Também pôde-se comprovar a eficiência da comunicação entre dispositivos de diferentes fabricantes, tratada na norma *IEC61850* como interoperabilidade.

Referências Bibliográficas

- IEC 61850 (2003). Communication Networks and Systems in Substation - Part 1: Introduction and Overview.
- IEC 61850 (2004). Communication Networks and Systems in Substation - Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3.
- IEEE Std 1584.1-2013 (2014). IEEE Guide for the Specification of Scope and Deliverable Requirements for an Arc-Flash Hazard Calculation Study in Accordance with IEEE Std 1584(TM).
- Mamede Filho, J (2001). Instalações Elétricas Industriais. LTC, Rio de Janeiro – RJ.
- Mardegan, C. (2012). Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais – Atitude Editorial, São Paulo - SP.
- Mohajeryami, S.; Arefi, M. and Salami, Z (2017). Arc flash analysis: Investigation, simulation and sensitive parameter exploration, In: North American Power Symposium (NAPS), Morgantown, WV, USA.
- Santos, L. F. e Pereira, M. (2007). Uma Abordagem Prática da IEC 61850 para Automação, Proteção e Controle de Subestações. Guarulhos – SP.
- Tarlochan, S., Mitalkumar, K. and Palak, P (2011). Configuration and Performance Testing of IEC 61850 GOOSE. IEEE, London.