

Proteção adaptativa em redes de distribuição de energia elétrica utilizando relés digitais e controladores lógicos programáveis

Waldery P. de Souza Jr.
Henrique Molina Barradas
Fábio Berthequini Leão

*Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica,
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Ilha Solteira
Av. Professor José Carlos Rossi, 1370 – Campus III, Ilha Solteira, SP, Brasil,
(e-mail: walderyjr@yahoo.com.br, fabio.berthequini@unesp.br, henrique1226@hotmail.com)*

Abstract: This work proposes a methodology for implementing adaptive protection in commercial digital relays considering the insertion of Distributed Generation (DG) in the Electricity Distribution Systems (EDS). The methodology is based on the use of a Programmable Logic Controller (PLC) to process the data and send the pickup values adapted to actuate the phase time overcurrent function (51) of the digital relays. Adaptive protection is implemented on a bench and tests are performed using the IEEE 13-bar system whose simulations are performed using the DigSilent® software. The results show the efficiency and robustness of the proposed adaptive protection since the methodology was able to maintain the coordination and selectivity of the protection system even with the massive insertion of DG.

Resumo: Neste trabalho é proposta uma metodologia para implementação da proteção adaptativa em relés digitais comerciais considerando a inserção de Geração Distribuída (GD) nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). A metodologia é baseada no emprego de um Controlador Lógico Programável (CLP) para processamento dos dados e envio dos valores de *pickup* adaptados para atuação da função de sobrecorrente temporizada de fase (51) dos relés digitais. A proteção adaptativa é implementada em bancada e os testes são realizados utilizando o sistema de 13 barras do IEEE cujas simulações são realizadas empregando o software DigSilent®. Os resultados mostram a eficiência e robustez da proteção adaptativa proposta visto que a metodologia foi capaz de manter a coordenação e a seletividade do sistema de proteção mesmo com a inserção massiva de GD.

Keywords: Adaptive Protection; Distributed Generation; Digital Protection Relays; Programmable Logical Controller; Distribution Network

Palavras-Chaves: Proteção Adaptativa; Geração Distribuída; Relés de Proteção Digitais; Controlador Lógico Programável; Rede de Distribuição

1. INTRODUÇÃO

Um sistema de proteção deve ser capaz de detectar condições anormais de operação do sistema elétrico de potência e iniciar uma ação de desconexão da porção defeituosa tão rapidamente quanto possível. A atuação de um sistema de proteção deve ser automática, rápida e de modo a restringir ao mínimo a porção do sistema a ser desligada ao retirar de operação a parte afetada pela falta. A rapidez de resposta é um elemento essencial em um sistema de proteção, e tempos da ordem de alguns poucos milissegundos são normalmente requeridos.

Em geral, a proteção não evita danos aos equipamentos, ela opera após a ocorrência de algum tipo de distúrbio que já pode ter provocado algum dano. As suas funções, portanto, são: limitar os danos, minimizar o perigo às pessoas, reduzir o estresse em outros equipamentos, e, acima de tudo, manter a integridade e estabilidade do restante do sistema elétrico, facilitando o seu restabelecimento (Sato 2005).

A proteção de sistemas elétricos é uma das áreas mais complexas no âmbito dos sistemas elétricos de potência (SEP) (Ferreira et al. 2012). Caso há GDs conectadas ao SDEE aumenta-se o grau de complexidade devido ao fluxo de potência bidirecional e desta forma há maior necessidade de o sistema elétrico ter comportamento dinâmico para se tornar mais eficiente e confiável.

A GD, de acordo com seu tamanho e quantidade inserida no SDEE, pode causar diversos impactos, sendo os principais: aumento imprevisto dos níveis de curto-circuito, perdas de coordenação e seletividade do sistema de proteção e redução do alcance da função de sobrecorrente temporizada.

Na presença de GD, a magnitude da corrente de falta medida pelos dispositivos de proteção alocados em série na rede pode ser diferente para cada dispositivo dependendo da localização da GD (Brahma; Girgis 2003). No caso de um aumento da corrente o dispositivo de proteção pode ser sensibilizado e atuar em um tempo reduzido prejudicando a coordenação e seletividade. Por outro lado, no caso da diminuição da

corrente, pode ocorrer a redução do alcance da proteção de sobrecorrente, principalmente de dispositivos alocados na subestação.

A redução da corrente tende a ser maior na subestação visto que neste ponto são considerados os efeitos da injeção de corrente de todas as GDs do sistema (Fig. 1). De fato, a redução do alcance ocorre devido a corrente medida pelo relé na subestação ser menor para a mesma falta (tipo e ponto na rede) com a inserção da GD e assim o efeito na proteção de sobrecorrente é aumentar o tempo de atuação que é como se o ponto de falta fosse mais distante em relação a subestação (equivalente ao aumento da impedância de Thévenin). A redução do alcance do relé na presença de GD depende do percentual de injeção de GD, sua distância da subestação e da resistência de falta (Baran; El-Markabi 2004).

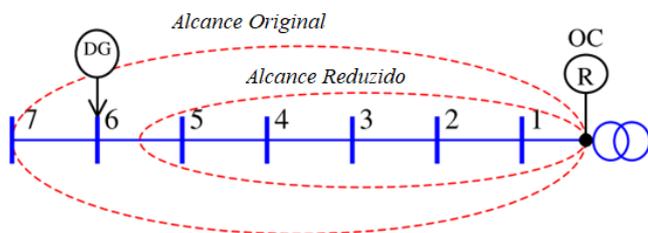


Fig. 1: Comparação do alcance do relé antes e depois da GD. (Baran; El-Markabi 2004)

Dentre as soluções propostas na literatura, a proteção adaptativa tem se mostrado de grande potencial para aplicação em SDEE juntamente com o avanço dos relés de proteção digitais microprocessados que estão evoluindo e apresentando cada vez mais recursos, permitindo uma proteção mais dinâmica e flexível (GE Multilin 2018), podendo ser utilizadas as informações via protocolos de comunicação tais como: IEC61850, Goraj (2010), Modbus RTU/TCP, DNP 3.0, Mohagheghi et al. (2009) entre outras, sendo esta rede construída através de fibras óticas e rádio.

Brahma e Girgis (2003) concluem que o aumento da GD será significativo nos sistemas de distribuição do futuro, e que com uma alta penetração da GD, a coordenação entre fusíveis, e entre fusíveis e religadores no sistema de distribuição pode ser perdida. Em seu trabalho, mostra-se um esquema adaptativo que oferece uma proposta prática para a solução destes problemas independentemente da dimensão, número e localização da GD no sistema de distribuição. É proposto um algoritmo que verifica as medições das correntes, o tipo e localização da falta, entre outros parâmetros, para assim não perder a coordenação e seletividade do sistema.

No trabalho de Silveira et al. (2011), é demonstrado um sistema com seleção automática dos grupos de ajustes, onde é implementado um esquema de acordo com os *status* dos disjuntores dos transformadores, dando uma maior flexibilidade para a graduação do sistema de proteção e reduzindo as atuações indevidas das proteções decorrentes de erros na seleção manual dos grupos de ajustes.

No trabalho de Silva (2014), foi implementado um sistema de proteção adaptativa para manter a coordenação e seletividade, onde através de uma programação em Matlab verifica-se a corrente monitorada pelo relé, *status* de disjuntores, inserção de GDs e ajustes dos relés de proteção. O sistema de proteção adaptativa é habilitado quando a topologia do sistema de

energia elétrica é alterada ou há mudança nos valores de corrente passante no relé, assim o método faz os devidos cálculos para as proteções de sobrecorrente temporizada (51) e instantânea (50) e envia os novos ajustes ao relé. O sistema de proteção adaptativa proposto faz a mudança de grupo de ajustes ou envia novos ajustes ao relé, sendo utilizada a comunicação via Telnet entre o sistema e o relé de proteção. De acordo com Silva (2014), todos os testes realizados garantiram a coordenação e seletividade entre todos os relés. Paludo (2010) apresenta uma proposta de proteção adaptativa com alteração do grupo de ajustes onde é utilizado o protocolo de comunicação IEC61850. O trabalho propõe um sistema de proteção adaptativa em uma indústria com uma central de cogeração composta por 3 turbogeradores. Foi utilizado uma lógica implementada no próprio relé, onde se define quantos geradores estão na barra, se 1, 2 ou 3. A partir do resultado desta lógica, o relé faz a seleção do grupo de ajustes, onde cada grupo de ajustes tem valores diferentes de *pickup* das funções de sobrecorrentes temporizada (51) e instantânea (50), mantendo a coordenação e seletividade do sistema elétrico industrial em questão.

Samadi e Chabanloo (2020) utiliza algoritmo para fazer a proteção adaptativa baseada em mudança de grupos de ajustes, em seu trabalho é utilizado o sistema de 30 barras do IEEE com inserção de GD. No algoritmo utilizado, são necessárias diversas informações, tais como: configuração da rede, número de relés e número de grupos de ajustes disponíveis em cada relé. Uma das eficiências deste trabalho é a coordenação dos diversos relés de sobrecorrente na rede com a inserção de GD.

Neste trabalho é proposto o ajuste dos valores de *pickup* da função de sobrecorrente temporizada de fase (51) baseado no monitoramento das correntes nos relés. Para tanto é desenvolvido um algoritmo que é programado em CLP capaz de realizar os cálculos necessários e enviar os novos ajustes para os respectivos relés de proteção. Atualmente os relés microprocessados são capazes de fornecer inúmeras funções, aplicações e lógicas programáveis, mas são limitados para certos tipos de lógicas, onde o CLP pode monitorar e enviar dados de escrita para diversos relés, deixando desta forma, o sistema de distribuição de energia elétrica mais confiável e flexível. O sistema de proteção adaptativa foi implementado em bancada utilizando relés de proteção digitais e CLP, de acordo com o sistema de 13 barras do IEEE simulado via software DigSilent®, validando assim, os resultados.

2. PROTEÇÃO ADAPTATIVA

Na Fig. 2 é ilustrado o diagrama de blocos da proteção adaptativa proposta. Após inicializado, o CLP, primeiramente, faz a leitura das correntes trifásicas (Ia, Ib e Ic) de todos os relés do sistema, logo, ele busca a informação nos relés se a proteção adaptativa está habilitada, sendo esta, uma entrada virtual do relé, podendo ser habilitada e desabilitada no painel do próprio relé ou remotamente. Caso não esteja habilitada, o *pickup* da função de sobrecorrente temporizada de fase (51) se manterá conforme seus valores sem a inserção de GD.

Com a proteção adaptativa habilitada, em cada relé no sistema o CLP verifica se as correntes trifásicas Ia, Ib e Ic são maiores que 0 e menores que I_{max}. Caso estejam fora deste intervalo, os respectivos *pickups* se manterão conforme ajustes originais,

isto é, se não há corrente passando pelos relés ou as correntes de carga ultrapassem os valores originais (antes da inserção de GDs).

Com os valores dentro do intervalo pré-definido para cada relé respectivamente, o CLP faz os cálculos e verifica qual a maior corrente entre as fases A, B e C. Verificada a maior corrente, o CLP adota este valor e faz a multiplicação por um valor KP conforme Fig. 2, sendo este valor definido pelo estudo de proteção (CPFL Energia 2016), e aguarda um tempo Δt sem uma variação da corrente em $\pm \Delta\%$. Se houver uma variação da corrente monitorada pelo relé maior do que $\Delta\%$, o CLP volta a verificar o intervalo das correntes e adota a nova corrente e a multiplica por KP. Se não houver uma variação maior do que $\pm \Delta\%$ durante Δt após o cálculo dos novos valores de *pickups* conforme (1), estes são enviados aos relés. A variação $\Delta\%$ garante que pequenas correntes transitórias não alterem o *pickup* de sobrecorrente temporizada de fase, e o tempo Δt assegura que não é uma sobrecarga e sim um aumento de carga. Em casos de sobrecarga, o valor de *pickup* não se altera até que o relé atue. A ideia é que os ajustes das correntes de *pickup* dos relés sejam feitos de forma dinâmica baseado na variação da corrente que deve ser alterada conforme a inserção da GD. Os ajustes são realizados de forma que os tempos de atuação dos relés sejam os mesmos definidos pelo projeto da proteção antes da inserção da GD garantindo que o sistema de proteção estabelecido se mantenha coordenado e seletivo mesmo com a inserção dos geradores. Observa-se que os cálculos são feitos de acordo com os valores das correntes de carga *online* do sistema, uma vez que a coordenação e seletividade foram previamente estabelecidas pelo projeto da proteção sem inserção da GD. O tempo que o CLP mantém até validar o valor para envio ao relé de Δt segundos proposto neste trabalho pode ser ajustado de acordo com a aplicação, assim como a variação dos valores das correntes que foi proposto $\pm \Delta\%$, ou seja, dependendo da situação de cada relé no sistema elétrico, estas variáveis podem ser reajustadas.

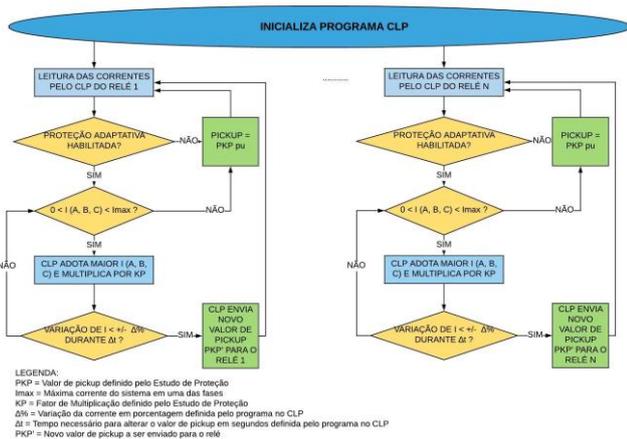


Fig. 2: Fluxograma da Proteção Adaptativa.

A leitura das correntes realizadas pelo CLP é feita de forma *online*, e quando há variações de valores conforme critérios adotados, o CLP envia os novos ajustes para os relés. O tempo de processamento desde a leitura das correntes até o envio dos novos ajustes é menor que $\frac{1}{2}$ ciclo (GE 2017).

$$I_{novo\ pickup} = \frac{\text{Maior } I(A,B,C) \cdot KP}{I_{nomprimTC}} \quad (1)$$

Sendo: $I_{novo\ pickup}$ (PKP') o novo valor da corrente de *pickup* da função 51 a ser enviado ao relé; Maior I (A, B, C) a maior corrente de carga entre as fases; KP um fator de crescimento da carga para o horizonte de estudo (CPFL Energia 2016) e $I_{nomprimTC}$ é o valor da corrente nominal primária do Transformador de Corrente (TC).

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da proteção adaptativa proposta, sendo empregados dois relés de proteção nas barras 632 e 671 do sistema de 13 barras do IEEE, mostrado na Fig. 3, simulado no *software* DigSilent® Power Factory 2018, sendo utilizado para demonstrar a alteração do valor de *pickup* das funções de sobrecorrentes temporizada (51) de fase conforme a inserção de GD no sistema. No *software* DigSilent® é empregado o método completo para o cálculo de curto-circuito.

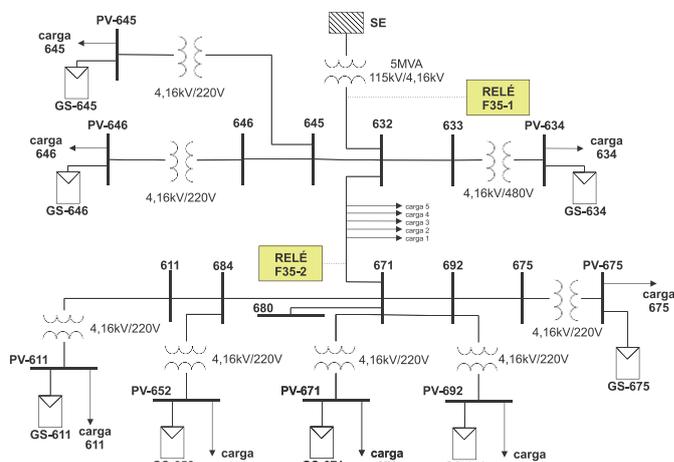


Fig. 3: Sistema 13 barras IEEE.

As GDs são compostas por sistemas fotovoltaicos com fator de potência unitário e com os respectivos nomes-barras de conexão, fases em que estão conectadas e potências: GS-675, ABC, (843 kW), GS-611, C, (170 kW), GS-634, ABC, (400 kW), GS-645, ABC, (170 kW), GS-646, C (115 kW), GS-652, ABC, (128 kW), GS-671, ABC, (1055 kW) e GS-692, A, (170 kW).

Foram utilizados dois relés de proteção de alimentadores, GE Multilin, modelo UR F35. Sendo o primeiro chamado de F35-1 para a proteção do alimentador na barra 632, e o segundo chamado de F35-2 para a barra 671. Os relés foram alocados nas barras do sistema de modo a estabelecer as zonas de proteção principal e de retaguarda conforme os critérios das proteções de sobrecorrente estabelecidos pela norma CPFL Energia (2016). Foi utilizado o *software* GE Multilin Energista UR Setup para parametrização dos relés UR F35, e o Energista Viewpoint Monitoring para monitoramento dos relés em tempo real. Foram adotados os valores de $\Delta t = 5$ s e $\Delta\% = 3\%$.

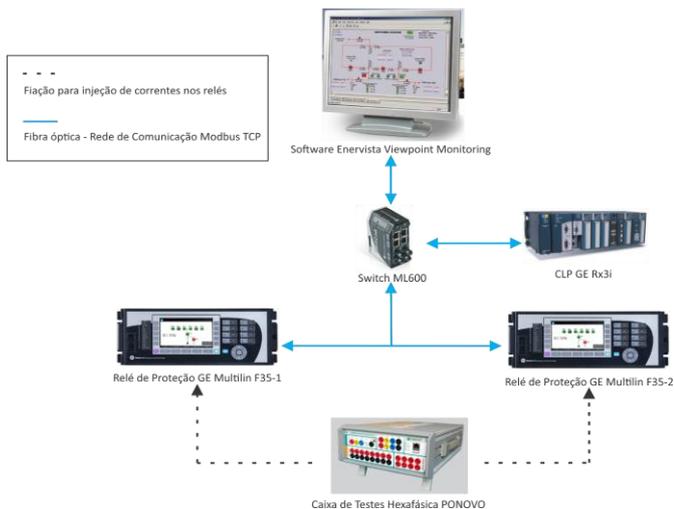


Fig. 4: Arquitetura do esquema desenvolvido em bancada para validar a proteção adaptativa proposta.

Utilizou-se também uma caixa de testes hexafásica PONOVO para injeção de corrente nos relés UR F35. Além de um CLP GE IP Rx3i para leitura das correntes dos relés, cálculos e posterior escrita; e um switch ML600 com portas de fibra óptica ST 100 Mbps e RJ45 100 Mbps para conectar os relés de proteção, CLP e softwares. Na Fig. 4 são ilustradas as interligações dos equipamentos para validar o sistema de proteção adaptativa proposto.

Na Fig. 5 é ilustrada a bancada de testes com todos os equipamentos.



Fig. 5: Bancada de Testes.

Foram realizados testes com o método proposto considerando a inserção de GDs de 0% a 100% em relação a carga do sistema.

Os valores das correntes em regime permanente das fases A, B e C em amperes (A) nos ramos das barras 632 e 671 são apresentados na Tabela 1 enquanto os valores das correntes de curto-circuito fase-fase com $R_f=0$ ohm são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Resultado do Fluxo de Carga com inserção de GD.

% GD	632			671		
	A	B	C	A	B	C
0	488,16	421,17	539,3	436,9679	286,7874	428,9882
10	445,82	383,12	482,74	399,5887	257,576	386,1233
20	404,98	346,72	427,71	363,4652	229,8725	344,1221
30	365,82	312,25	374,38	328,7061	203,991	302,9358
40	328,62	280,15	323,06	295,5013	180,4245	262,5428
50	293,84	251,09	274,36	264,1562	159,9148	222,9624
60	262,15	225,97	229,4	235,143	143,5036	184,2865
70	234,5	206,02	190,28	209,1688	132,4652	146,7593
80	212,24	192,61	160,69	187,2466	127,9678	111,0068
90	196,92	186,96	145,98	170,7024	130,4969	78,80316
100	190,03	189,62	150,09	160,9827	139,5182	55,76914

Tabela 2. Valores das correntes de curto-circuito fase-fase em ampères (A) conforme inserção de GD.

% GD	A-B		B-C		C-A	
	632	671	632	671	632	671
0	7374,27	3265,72	7445,90	2987,33	7395,47	3079,96
10	7378,37	3270,97	7445,44	2986,75	7404,19	3089,99
20	7382,06	3275,86	7444,63	2985,99	7412,52	3099,67
30	7385,35	3280,41	7443,48	2985,07	7420,47	3109,00
40	7388,25	3284,64	7441,99	2983,97	7428,06	3118,02
50	7390,78	3288,56	7440,20	2982,71	7435,31	3126,76
60	7392,95	3292,18	7438,11	2981,29	7442,23	3135,22
70	7394,78	3295,52	7435,72	2979,73	7448,83	3143,44
80	7396,26	3298,59	7433,04	2978,01	7455,13	3151,41
90	7397,41	3301,40	7430,08	2976,15	7461,13	3159,16
100	7398,23	3303,95	7426,84	2974,15	7466,84	3166,70

Com os resultados do fluxo de carga da Tabela 1, conforme o fluxograma da proteção adaptativa da Fig. 2, foram calculados os valores de *pickup* de acordo com a maior corrente entre as fases e multiplicada pelo valor de $KP = 1,20$ (1), apresentados na Tabela 3.

Os valores em destaque são os maiores valores de corrente entre as fases A, B e C, sendo estes os valores que o CLP adotou para fazer o cálculo do novo ajuste da proteção de sobrecorrente temporizada de fase.

Após calculados todos os valores em simulações via *software* DigSilent® e testes de bancada, foram realizados os testes com uma caixa de testes hexafásica, com injeção de seis correntes, sendo três para a barra 632 e três para a barra 671. Os valores da Tabela 1 foram recalculados para valores secundários conforme sua relação de transformação sendo 600:5 para a barra 632 e 500:5 para a barra 671 e apresentados na Tabela 4, no qual foram injetados os respectivos valores com a mala de testes. Utilizou-se o módulo de sequência de estados do *software* da mala de testes, sendo cada estado com a respectiva porcentagem de GD inserida no SDEE, cada estado teve a duração de 3 minutos na simulação.

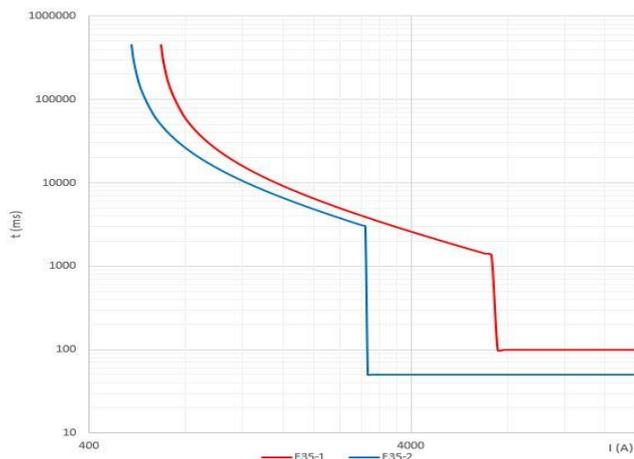


Fig. 8: Coordenograma Relés Barras 632 (F35-1) e 671 (F35-2) com 70% de GD com a proteção adaptativa desabilitada.

Na Tabela 5 são apresentados os tempos de atuação de cada relé com a proteção adaptativa habilitada e desabilitada, respectivamente, de acordo com a inserção de GD. Nota-se que com a proteção adaptativa desabilitada quanto maior a inserção de GD, mais lenta torna-se a proteção de sobrecorrente temporizada de fase.

Tabela 5. Tempo de atuação dos relés com e sem a proteção adaptativa habilitada.

% GD	Tempo de Atuação (s)			
	F35-1 (Barra 632)		F35-2 (Barra 671)	
	Prot. Adap. Hab.	Prot. Adap. Desab.	Prot. Adap. Hab.	Prot. Adap. Desab.
0	6,75	6,75	6,75	6,75
10	6,75	8,05	6,75	7,75
20	6,75	9,84	6,75	9,07
30	6,75	12,53	6,75	10,76
40	6,75	16,36	6,75	13,13
50	6,75	21,32	6,75	16,69
60	6,75	29,45	6,75	22,08
70	6,75	44,59	6,75	30,68
80	6,75	75,94	6,75	48,21
90	6,75	147,27	6,75	78,75
100	6,75	255,79	6,75	131,25

4. CONCLUSÕES

Com a crescente inserção da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica a proteção adaptativa mostra-se gradativamente necessária para a confiabilidade e flexibilidade da rede. Apesar de existir diversos estudos e trabalhos publicados na literatura com o objetivo de propor sistemas de proteção adaptativa, há muitos poucos trabalhos que efetivamente apresentam uma aplicação prática.

Neste artigo é proposto um esquema de proteção adaptativa baseado no ajuste da corrente de *pickup* da proteção de sobrecorrente temporizada de fase (51) através da corrente do sistema, sem qualquer informação sobre a presença ou não da GD. Na implementação foi empregado um CLP como mestre comandando dois escravos, que são os relés situados em locais diferentes, sendo feita uma comunicação em MODBUS/TCP

deixando assim a proteção totalmente dinâmica. Os resultados mostram que a proteção adaptativa proposta manteve a coordenação e a seletividade do sistema de proteção mesmo com a inserção de GD. O método apresenta-se de grande potencial em relação aos já propostos na literatura pois não depende de qualquer estado de chaves seccionadoras, disjuntores, topologia do sistema ou informações sobre a inserção de geração distribuída.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e processo nº 2015/21972-6 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

REFERÊNCIAS

- Baran, M., & El-Markabi, I (2004), Adaptive over current protection for distribution feeders with distributed generators, *IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo*, volume 2, page numbers 715–719.
- Brahma, S. A., & Girgis, A. A. (2003), Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation, *IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet*, volume 19, page number 2083.
- CPFL Energia - Companhia Paulista de Força e Luz (2016), *Norma Técnica: Proteção de redes aéreas de distribuição*.
- Ferreira, D. D., Seixas, J. M., & Cerqueira, A. S. (2012), Esquema de proteção adaptativa aplicada a proteção instantânea de sobrecorrente, *An. do XIS Congr. Bras. Autom.*, volume. 2007, page numbers 1561–1568.
- GE (2017), *PACSystems* RX3i System Manual*.
- GE Multilin (2018), *F35 Multiple Feeder Protection System - UR Series Instruction Manual*, <<http://www.gegridsolutions.com/app/ViewFiles.aspx?pr od=f35&type=3>>, volume. Rev. 7.7x.
- Goraj, M. (2010), Overview of IEC 61850 and Benefits, volume 57, page numbers 1–40.
- Mohagheghi, S., Stoupis, J., & Wang, Z. (2009), Communication protocols and networks for power systems-current status and future trends, *2009 IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo.*, page numbers 1–23.
- Sato, Fujio (2005), *Noções Básicas de Proteção de Sistemas de Energia Elétrica*, volume.07, Unicamp.
- Silveira, J. G. (2011), *Sistema para Seleção Automática de Grupos de Ajustes em Relés de Proteção*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Paludo, P. R. L. (2010), *Aplicação de um sistema de proteção adaptativa na coordenação de proteção e seletividade em um sistema elétrico industrial com cogeração*, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Samadi, A., Chabanloo, R. M. (2020), Adaptive coordination of overcurrent relays in active distribution networks based on independent change of relays' setting groups, *Electrical Power and Energy Systems*.
- Silva, K. Q. (2014), *Sistema de Proteção Adaptativa*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.