

Proteção Adaptativa de Sobrecorrente em Sistemas de Distribuição Baseado em Algoritmos Genéticos

Francisco das C. Souza Júnior*, Huilman S. Sanca†, Benemar A. de Souza‡, Flávio B. Costa§

Resumo—O cenário do setor elétrico mundial vem sofrendo relevantes modificação após a chegada e efetivação das técnicas das *Smart Grids*. A possibilidade de comunicação e de obtenção de dados em diversos locais da rede, aliada a inclusão marcante da geração distribuída ao longo da rede traz a necessidade de que também as técnicas de planejamento do sistema elétrico acompanhem tais mudanças. Um dos setores vai afetados pelo novo modo de operação imposto pelas *Smart Grids* é o sistema de proteção, em especial para o caso dos sistemas de distribuição. Neste trabalho uma técnica adaptativa de manutenção da coordenação e seletividade dos dispositivos de sobrecorrente temporizado que compõem uma rede de distribuição é apresentada, tendo suas soluções obtidas por meio do uso da técnica de inteligência artificial dos algoritmos genéticos.

Palavras-chaves—Proteção adaptativa, sistema de distribuição, algoritmo genético, proteção de sobrecorrente.

I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) passa por diversas revoluções em quase todas as suas áreas. A chegada definitiva, ao que tudo indica, das redes inteligentes ou *Smart Grids* visa tornar a operação do SEP mais automatizada possível, uma vez que estarão disponíveis dispositivos sensores espalhados nos mais diversos locais da rede [1].

Outra grande mudança proporcionada pelas *Smart Grids* é a possibilidade de que os consumidores, agentes passivos do sistemas no esquema tradicional, possam participar do sistema também como agentes ativos, gerando a sua própria energia. No Brasil, por meio de incentivos fiscais e programas do governo federal fontes renováveis de energia vêm sendo usadas para este fim como: energia eólica, solar, biomassa, baseada principalmente no uso do bagaço da cana-de-açúcar [2].

Uma das áreas mais afetadas com as modificações sofridas pela rede é o sistema de proteção uma vez que para cada modificação, um determinado conjunto de ajustes deve ser utilizado para garantir o melhor desempenho do mesmo [3].

Nos sistemas de distribuição, a proteção de sobrecorrente é a principal função de proteção, seja ela desempenhada por meio de elos fusíveis ou relés [4]. A determinação dos ajustes de um sistema de proteção baseado em dispositivos de sobrecorrente é bastante complexa e, ainda hoje realizada de maneira arcaica na maioria das empresas do setor [5]. Juntando-se esses

dois fatos à atual situação do SEP onde as mudanças nas redes elétricas são cada vez mais frequentes, vislumbra-se a necessidade de um sistema automático (adaptativo) para determinação dos ajustes de tais dispositivos.

Em [6], uma ferramenta matemática capaz de manter a coordenação da proteção dos dispositivos frente às modificações topológicas ou operacionais é proposta. Essa técnica, chamada de proteção adaptativa, apresenta-se bastante promissora para o atual cenário do sistema de potência.

Diversas técnicas vêm sendo propostas para a implementação de um sistema de proteção adaptativa. Em [7], uma técnica baseada em programação linear é usada para manutenção da coordenação em relés de sobrecorrente em uma rede de distribuição. Já [8], [9] utilizam de uma rede com arquitetura distribuída que através de relações matemáticas calcula os ajustes das unidades instantâneas dos relés de sobrecorrente em uma rede com presença de geração distribuída (GD). Também através de relações matemáticas [10], [11] realizam a coordenação entre relés de distância numa rede de transmissão. Uma técnica também bastante utilizada é a dos grupos de ajustes [12]. Essa técnica exige que todas os possíveis cenários de operação do sistema sejam analisados previamente e, para cada um desses cenários, os ajustes sejam calculados e agrupados em grupos de ajustes. Assim, o sistema de proteção adaptativa deve identificar cada um desses cenários e associá-los ao grupo de ajustes adequado. Entretanto, nos relés atuais a permuta entre um grupo de ajustes e outro é lenta e pode chegar a um minuto [13].

A detecção dos instantes onde ocorrem as modificações que devem ser seguidas pelas rotinas de cálculo dos ajustes dos dispositivos de proteção pode ser realizada de diversas formas. Em [12], o *status* de disjuntores e chaves seccionadoras é utilizado como entrada para a determinação dos novos ajustes. Já em [14], rotinas baseadas na estimação de fasores são utilizadas para detecção de mudanças nas redes.

Neste trabalho será apresentado um sistema de proteção adaptativa composto por três partes e que utiliza a técnica dos algoritmos genéticos (AG) para a determinação dos ajustes das unidades temporizadas dos relés de sobrecorrente de redes radiais. Essas três partes são chamadas de Centro de Controle da Operação, Centro de Controle da Subestação e pelos próprios relés digitais. A técnica é analisada utilizando o sistema do IEEE 13 barras [15]. A detecção das modificações no sistema é realizada utilizando o *status* dos dispositivos seccionadores da rede.

II. SISTEMA DE PROTEÇÃO ADAPTATIVA

Quanto à sua arquitetura os sistemas de proteção adaptativa podem ser divididos em: sistema concentrado ou sistema com

*Francisco das C. Souza Júnior é professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), campus Caicó e aluno de doutorado em engenharia elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) (e-mail: francisco.souza@ifrn.edu.br)

†Huilman S. Sanca é aluno de doutorado em engenharia elétrica da UFCG (e-mail: huilman.sanca@ee.ufcg.edu.br)

‡Benemar A. de Souza é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG (e-mail: benemar@dee.ufcg.edu.br)

§Flávio B. Costa é professor da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (e-mail: flaviocosta@ect.ufrn.edu.br).

arquitetura distribuída.

Na literatura técnica autores vêm utilizando uma arquitetura concentrada para a implementação das técnicas de proteção adaptativa [10], [12], [16], [17]. A principal característica desses trabalhos é a necessidade de utilização de um dispositivo de alto poder de processamento, capaz de implementar além das funções normais de proteção, as funções da proteção adaptativa.

Por outro lado, os sistemas de proteção adaptativas com arquitetura distribuída têm a vantagem de não precisarem de dispositivos com grande poder de processamento. É o caso de [8], [10], [11], [14].

O sistema proposto em [14] é composto por três centros:

- Centro de Controle da Operação (CCO) - Camada responsável pelo monitoramento e identificação de mudanças na rede. Essas mudanças podem ser tanto topológicas quanto operacionais;
- Centro de Controle da Subestação (CCS) - Responsável pelo cálculo dos novos parâmetros das unidades instantâneas dos dispositivos de sobrecorrente. Esse centro recebe entrada do CCO e ao determinar os novos ajustes estes são enviados aos IED por meio de um canal de comunicação;
- *Intelligent Electronic Device* (IED) - Desempenham as funções tradicionais de qualquer relé permitindo a troca dos ajustes durante a execução normal de monitoramento.

Para determinação dos ajustes dos relés de sobrecorrente instantâneos, [14] utiliza um conjunto de relações matemática baseados em [18] que estimam o alcance da unidade.

A arquitetura do sistema proposto neste trabalho é semelhante à de [14] diferenciando-se, basicamente na segunda camada da rede, o CCS. Neste caso, os ajustes das unidades temporizadas dos relés de sobrecorrente serão determinados utilizando-se a técnica dos AG. Para tanto, o sistema de proteção adaptativa deverá conhecer previamente os valores das correntes de curto-circuito trifásicos e bifásicos nos diversos pontos de instalação de relés na rede.

A Fig. 1 mostra a arquitetura básica do sistema de proteção adaptativa proposta.

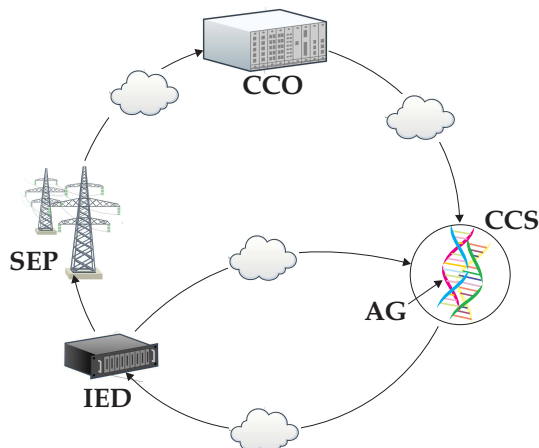


Fig. 1. Arquitetura do Sistema de Proteção Adaptativa.

III. ALGORITMOS GENÉTICOS E PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Algoritmos genéticos são variantes da família das meta-heurísticas que baseiam-se na teoria evolucionária de Charles Darwin e usam uma estratégia de busca paralela e aleatória, voltada para valorização dos indivíduos mais bem adaptados às condições do problema. Em linhas gerais, os AG codificam suas possíveis soluções em itens conhecidos como indivíduos, formados por cromossomos que representam as características de seus portadores. Através de operadores genéticos, esses indivíduos são avaliados por meio de uma função de aptidão, ou função objetivo do problema e, agrupados em uma população [19].

A escolha dos indivíduos mais bem adaptados fica a cargo de uma sub-rotina que possui o conhecimento especializado a cerca do problema ao qual se propõe. Após classificados, os indivíduos são selecionados e, a partir desses, novos indivíduos poderão ser criados. O conjunto da atuação de todos os operadores genético sobre uma mesma população, é chamado de geração. Um número de gerações, previamente estipulado é o critério de parada usual do algoritmo, mas não o único: o número gerações consecutivas nas quais o mesmo indivíduo foi escolhido como o mais adaptado é outro critério de parada.

Para que um AG dê bons resultados, duas etapas têm importância fundamental. A escolha do tipo de codificação dos indivíduos e a escolha de uma função objetivo eficaz [20]. A codificação dos cromossomos pode ser realizada em qualquer base numérica, dando ênfase aquela que seja mais apropriada ao problema em questão. Já a função objetivo não possui regras gerais para sua formulação pelo fato de ser a responsável pelo conhecimento especialista a cerca do problema a ser resolvido.

A. Algoritmo de Coordenação da Proteção

A determinação dos ajustes da unidade temporizada de sobrecorrente de uma rede deve ser feita de modo a garantir que o sistema de proteção atenda aos critérios da confiabilidade, economia, velocidade e seletividade. Para tanto, os seguintes parâmetros devem ser determinados: tipo de curva do dispositivo de proteção, *Time Dial Setting* (TDS) e a corrente de *pick-up*. O conjunto dessas variáveis define o tempo de atuação do dispositivo de proteção é dado por:

$$t = \frac{k_1 \times TDS}{\left(\frac{I_F}{RTC \times I_{pick-up}} \right)^{k_2} - 1}, \quad (1)$$

sendo k_1 e k_2 as constantes que dependem do tipo de curva do relé [21].

A coordenação da proteção é obtida utilizando o critério do intervalo da coordenação. Seja o sistema fictício mostrado na Fig. 2 para o relé instalado na barra b , o seu tempo de atuação deve ser tal que a seguinte equação seja atendida.

$$t_B \geq t_C + CTI, \quad (2)$$

sendo CTI o tempo de intervalo de coordenação, geralmente assume valores entre 0,2 e 0,5 s.

Nos sistemas de distribuição, geralmente a característica da unidirecionalidade da corrente é válida, uma vez que as redes

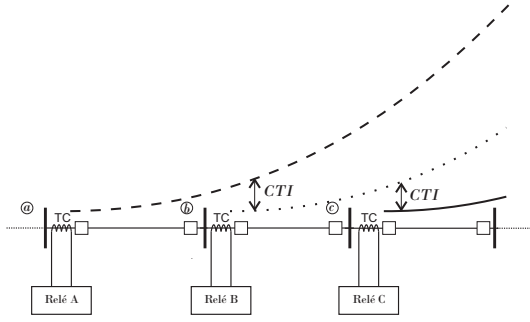


Fig. 2. Sistema elétrico de distribuição fictício.

são radiais e não possuem geração distribuída ao longo da rede. Assim sendo, não há a necessidade da determinação da direção da corrente de falta. Logo, apenas o transformador de corrente pode ser utilizado não havendo a necessidade da polarização do relé.

Para um sistema radial, o fluxograma completo de execução do estudo de coordenação é mostrado na Fig. 3.

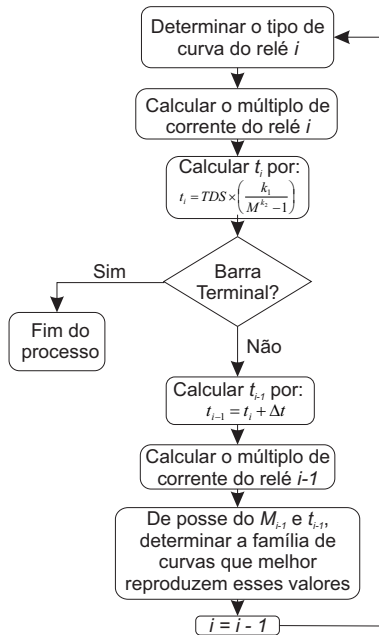


Fig. 3. Fluxograma de execução do estudo de coordenação para relés de sobrecorrente em um sistema radial.

B. Formulação do Problema de Proteção Utilizando AG

Problemas de otimização, como é o caso da determinação dos ajustes dos relés em um sistema elétrico, devem seguir etapas bem definidas, que ajudarão na obtenção do exito do processo [20].

No caso dos AG, a primeira etapa diz respeito à codificação dos indivíduos. Neste trabalho, o foco estará na determinação do tipo de curva e TDS de cada relé que forma o esquema de proteção. Assim sendo, os indivíduos (pretensas soluções do caso) serão formados por apenas um cromossomo formado por duas partes cada, a primeira relativa ao tipo de curva do relé e a segunda ao TDS. A Fig. 4 contém a formulação básica dos indivíduos do AG.

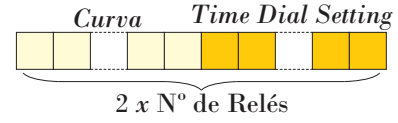


Fig. 4. Esquema de codificação dos indivíduos.

De acordo com [21], existe três tipos de curvas para utilização com relés de sobrecorrente, são elas: moderadamente inversa, muito inversa e extremamente inversa. Logo, a primeira parte dos cromossomos do AG, terão codificação decimal variando entre 1 e 3, respectivamente.

Já para o TDS, os relés digitais possuem uma variada gama de valores. Os dispositivos eletromecânicos possuíam em sua maioria dez valores distintos para o TDS, representando a variação no TDS de 0,1 a 1. Entretanto, como o sistema utilizado para teste possui dimensões muito reduzidas, optou-se por utilizar uma variação maior para o TDS, uma vez que com apenas dez níveis para este parâmetro, a coordenação entre os dispositivos poderia tornar-se impraticável. Assim, o AG irá determinar um valor inteiro entre 1 e 100 para o TDS.

Como mencionado anteriormente os indivíduos de cada população são trabalhados e modificados utilizando funções que assemelham-se às encontradas na natureza, como é o caso do cruzamento, mutação e adaptação. O cruzamento e a mutação, fazem parte do algoritmo genético canônico e por isso não serão apresentados detalhes neste trabalho [19].

A adaptação, por outro lado, visa selecionar os indivíduos que melhor se adequam ao problema. No caso da coordenação da proteção de dispositivos de sobrecorrente, além de garantir a seletividade do sistema, este ainda deve garantir que o tempo de atuação seja o menor possível. Logo, neste trabalho será utilizado o critério o tempo total de atuação para avaliação dos indivíduos.

A equação de (3) será utilizada para avaliação dos indivíduos.

$$f = T_1 + \sum_{j=1}^{n-1} [(T_{j+1} - T_j) - CTI]^2 + \sum_{j=1}^{n-1} [(t_{j+1} - t_j) - CTI]^2, \quad (3)$$

sendo n o número de relés da rede, T_j o tempo de atuação do relé j para um curto-circuito trifásico na sua barra, T_{j+1} o tempo de atuação do relé $j+1$ para um curto-circuito trifásico na sua barra j , t_j o tempo de atuação do relé j para um curto-circuito bifásico na sua barra e t_{j+1} o tempo de atuação do relé $j+1$ para um curto-circuito bifásico na sua barra j .

Após a avaliação da aptidão de todos os indivíduos, os mais bem adaptados ao problema são selecionados utilizando o método do torneio [20]. Durante a elaboração do trabalho optou-se pelo uso da técnica do elitismo por proporcionar um incremento na velocidade de obtenção dos ótimos globais, uma vez que as gerações futuras terão uma memória contendo pelo menos um indivíduo bem avaliado na geração anterior.

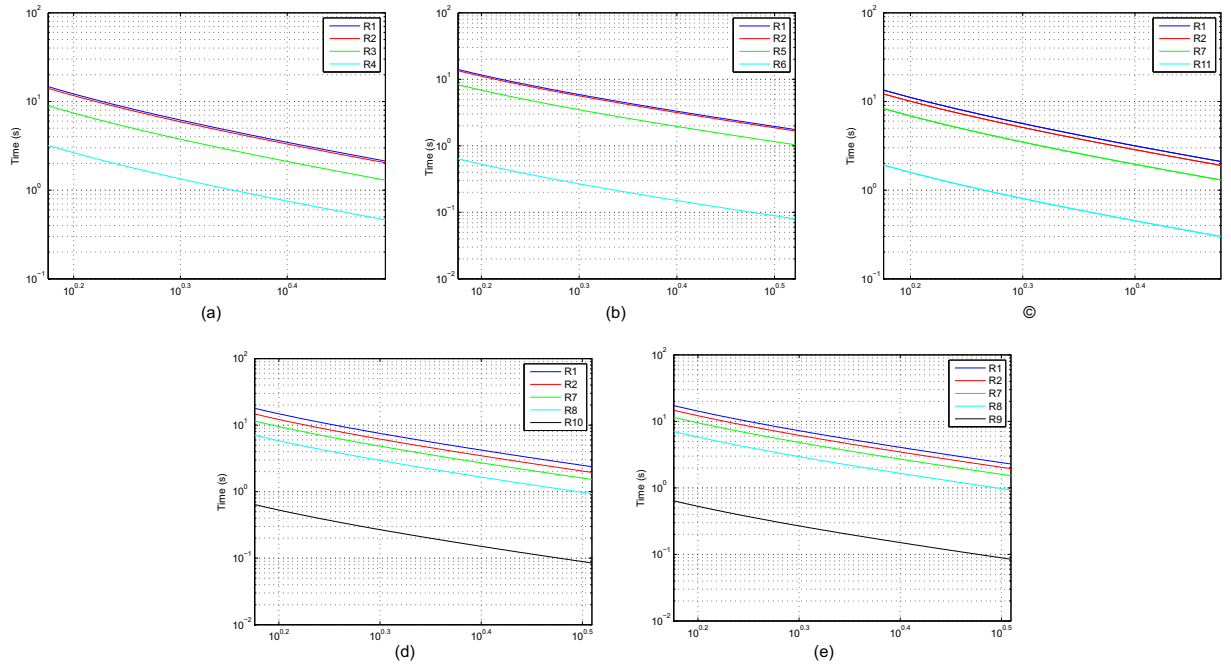


Fig. 6. Resultados do sistema de proteção adaptativa para o caso em que o sistema encontra-se em operação com todas as linhas conectadas à rede.

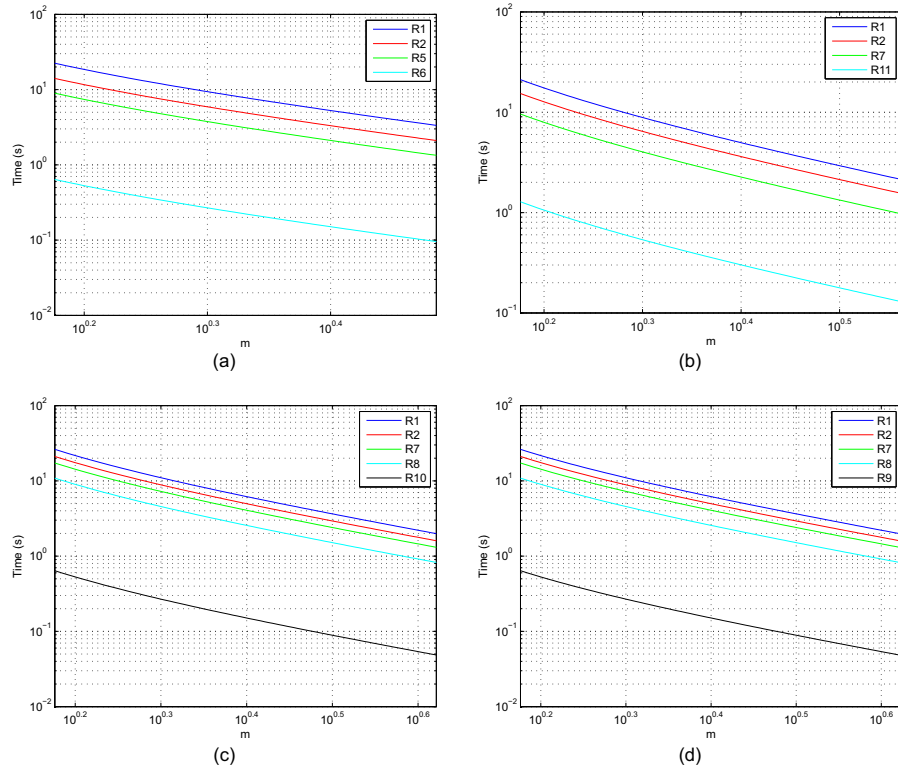


Fig. 7. Ajustes dos dispositivos de sobrecorrente temporizados obtidos pelo sistema adaptativo na saída das linhas 632-645 e 645-646.

TABELA III

DADOS DE ENTRADA PARA O ALGORITMO GENÉTICO APÓS A SAÍDA DE LINHAS 632-645 E 645-646.

Relé	$I_{3\phi}$ (A)	$I_{2\phi}$ (A)	$I_{pick-up}$ (A)	RTC
1	6.069	962	4.0	80
2	5.532	927	5.5	60
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	5.414	918	5.0	60
6	5.346	913	4.5	60
7	5.082	893	4.5	60
8	5.021	889	4.0	60
9	4.961	884	3.5	60
10	4.884	878	3.5	60
11	5.081	893	4.0	60

TABELA IV

AJUSTES DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADO OBTIDOS PELO MÉTODO PROPOSTO APÓS A SAÍDA DAS LINHAS 632-645 E 645-646.

Relé	Curva	TDS	Relé	Curva	TDS
1	3	35	7	3	27
2	3	33	8	3	17
3	-	-	9	3	1
4	-	-	10	3	1
5	3	14	11	3	2
6	3	1			

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um sistema de proteção adaptativa baseada no uso dos algoritmos genéticos para obtenção dos ajustes dos dispositivos de sobrecorrente temporizada para sistemas de distribuição sem a presença de geração distribuída. O sistema proposto é formado por três partes: a detecção da topologia da rede, o cálculo dos novos ajustes e os próprios dispositivos de proteção. Essa arquitetura possui a vantagem de poder ser implementada em *hardwares* separados possibilitando a utilização dos processadores comercialmente disponíveis. O cálculo dos novos ajustes dos dispositivos de proteção foi realizado através de um algoritmo genético implementado no software MATLAB®. Para tornar o método proposto aplicável aos sistemas de distribuição reais, rotinas de curto-circuito devem ser implementadas e executadas pelo Centro de Controle da Subestação (CCS) como forma de alimentar os algoritmos genéticos. Os resultados mostram que, apesar das características do sistema, a técnica possui potencial para garantir a coordenação e melhor desempenho dos dispositivos de proteção da rede.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao IFRN, campus Caicó ao departamento de engenharia elétrica da UFCG pela estrutura cedida e à CAPES pelo apoio financeiro na elaboração deste trabalho.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] R. Jafari, M. S. Naderi, G. B. Gharehpetian, and N. Moaddabi, "Compensation of dgs impact on overcurrent protection system of smart micro-grids," in *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*, June 2013, pp. 1–4.
- [2] S. M. S. G. Velázquez, J. R. Moreira, S. A. Santos, and S. T. Coelho, "Electric power generation in isolated communities in the amazon region: A perspective for sustainable development," in *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on*, Sept 2011, pp. 5254–5257.
- [3] A. Girgis and S. Brahma, "Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system," in *Power Engineering, 2001. LESCOPE '01. 2001 Large Engineering Systems Conference on*, 2001, pp. 115–119.
- [4] C. R. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*, 1st ed. Wiley, January 1956.
- [5] F. C. Souza Jr, "A multi-objective genetic algorithm for power protection coordination on mixed system," Master's thesis, Federal University of Campina Grande (UFCG), 2011.
- [6] S. Horowitz, A. Phadke, and J. Thorp, "Adaptive transmission system relaying," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 4, pp. 1436–1445, 1988.
- [7] A. Y. Abdelaziz, H. E. A. Tallat, A. I. Nosseir, and A. A. Hajjar, "An adaptive protection scheme for optimal coordination of overcurrent relays," *Electric Power System Research*, vol. 61, pp. 1–9, Maio 2001.
- [8] Z. Li, W. Tong, F. Li, and S. Feng, "Study on adaptive protection system of power supply and distribution line," in *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, oct. 2006, pp. 1–6.
- [9] F. C. Souza Jr. and B. A. Souza, "Adaptive protection scheme applied at instantaneous overcurrent function," in *XIX Brazilian Congress of Automatic, CBA 2012*, September 2012, pp. 4522–4528.
- [10] C. Jing-Hua, C. Shao-Hua, and Y. Yi-Min, "Study on adaptive protection relay system based on multi-agent," in *Machine Learning and Cybernetics, 2005. Proceedings of 2005 International Conference on*, vol. 1, Agosto 2005, pp. 114–118.
- [11] A. A. Chávez, J. L. Guardado, D. Sebastián, and E. Melgoza, "Distance protection coordination using search methods," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 6, no. 1, pp. 51–58, Março 2008.
- [12] F. Souza Jr. and B. Souza, "Adaptive overcurrent adjustment settings: A case study using rtds," in *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference On*, 2013, pp. 1–5.
- [13] *SEL-411L Protection and Automation System, Protection Manual*, 2014.
- [14] F. Souza Jr, H. Sanca, F. Costa, and B. Souza, "Adaptive instantaneous overcurrent: a case studied in a real brazilian system," in *International Conference on Power Systems Transients, 2015. IPST*, June 2015.
- [15] W. Kersting, "Radial distribution test feeders," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 975–985, Aug 1991.
- [16] L. Yanping, O. Yangbing, L. Dechang, P. Lu, and Z. Lin, "Research on principle of network-based adaptive current protection in distribution network," in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, April 2008, pp. 2388–2391.
- [17] Y. Li, D. Fan, Q. Teng, X. Dong, and X. Yao, "Adaptive protection of short circuits in transmission lines," in *Control and Decision Conference, 2009. CCDC '09. Chinese*, June 2009, pp. 1788–1792.
- [18] P. M. Anderson, *Power System Protection*. Piscataway, NJ - USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- [19] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, A. Arbor, Ed. University of Michigan Press, 1975.
- [20] S. J. F. C. Oliveira, N.L.S and B. A. Souza, "Adaptive overcurrent adjustment settings: A case study using rtds," in *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference On*, 2013, pp. 1–5.
- [21] IEEE, "IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays," IEEE, Tech. Rep., 1996.