

ANDRÉ DO AMARAL PENTEADO BISCARO

**Coordenação de relés de distância e sobrecorrente para sistemas de
transmissão através de algoritmo genético especializado**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira.

Supervisor: Prof. Dr. José Roberto
Sanches Mantovani

Ilha Solteira

2025

RELATÓRIO DE ESTÁGIO DE PÓS-DOCTORADO

Estagiário: André do Amaral Penteado Biscaro

Supervisor: José Roberto Sanches Mantovani

Título: Coordenação de Relés de Distância e Sobrecorrente para Sistemas de Transmissão Através de Algoritmo Genético Especializado

Resumo

Neste relatório apresentam-se as atividades desenvolvidas durante a pesquisa de pós-doutorado intitulada *Coordenação de Relés de Distância e Sobrecorrente para Sistemas de Transmissão Através de Algoritmo Genético Especializado*, conduzidas pelo professor Dr. André do Amaral Penteado Biscaro, sob a supervisão do Professor Dr. José Roberto Sanches Mantovani na Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, Brasil. O período coberto por este relatório é de 02/02/2024 a 31/01/2025. Como parte do trabalho o pesquisador escreveu um artigo para a revista internacional IEEE ACCESS (<https://ieeaccess.ieee.org/>), de fator de impacto 3,4, e outro em coautoria com outros pesquisadores do grupo, para uma conferência nacional, apresentado no Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2024 (<https://cba2024.vidaestudantil.com/>), que seguem em anexo. Um artigo para a conferência internacional denominada Induscon 2025 (<https://induscon.org/>) está sendo finalizado e será submetido até o dia 30/04/2025 (*submissions deadline*).

Introdução

A coordenação e seletividades de relés de proteção são uma técnica essencial para garantir a segurança e a confiabilidade dos sistemas de transmissão de energia elétrica. Relés de distância e sobrecorrente são dispositivos críticos que detectam e isolam faltas, minimizando interrupções e danos aos equipamentos, seres humanos e animais. No entanto, a configuração e a coordenação desses relés podem ser desafiadoras devido à complexidade topológica dos sistemas de transmissão. A proteção digital de sistemas elétricos de potência surgiu nas décadas de 60 e 70, quando pesquisadores desenvolveram algoritmos numéricos para relés de distância para proteção de linhas de transmissão. Esta técnica está consolidada atualmente, mas continua sendo uma área de pesquisa ativa, tendo em vista o desenvolvimento dos sistemas de *hardware*, *software* e técnicas de inteligência artificial que permitem que novas funções de proteção possam ser implementadas com grandes velocidades de processamento.

Os algoritmos genéticos, inspirados nos processos de seleção natural e evolução biológica, têm se mostrado ferramentas poderosas para resolver problemas de otimização complexos. Aplicar um algoritmo genético (AG) especializado na coordenação e seletividade de relés de distância e sobrecorrente permite uma abordagem sistemática e eficiente para ajustar os parâmetros das funções de proteção, garantindo uma resposta rápida e precisa às faltas. Além disso, a integração da lógica *fuzzy* em algoritmos genéticos, resultando em um algoritmo genético *fuzzificado*, oferece uma função adicional de flexibilidade e precisão. A lógica *fuzzy* é utilizada para ajustar dinamicamente os parâmetros da função de adaptação (função objetivo), permitindo que o algoritmo responda de maneira mais eficaz às variações e incertezas inerentes aos sistemas de transmissão. Essa abordagem híbrida melhora a capacidade de ajustes do sistema de proteção em condições operacionais complexas e variáveis em função de alterações topológicas e de carregamento, resultando em uma coordenação de relés mais robusta e adaptativa.

Neste trabalho de pesquisa explora-se a aplicação de algoritmos genéticos e lógica *fuzzy* na coordenação de relés, destacando os benefícios em termos de precisão, eficiência e adaptabilidade em comparação aos métodos tradicionais. O objetivo é melhorar a proteção dos sistemas de transmissão, contribuindo para a estabilidade e a resiliência da rede elétrica através do desenvolvimento de uma metodologia para os ajustes das proteções direcionais de distância e de sobrecorrentes em sistemas de transmissão. A metodologia foi validada usando um sistema de transmissão típico da literatura.

Objetivos

Proposta uma metodologia para ajustes, coordenação e seletividade de relés direcionais e de sobrecorrentes, aplicados na proteção de sistemas de transmissão com múltiplas fontes de tensão. Desenvolvimento de um algoritmo genético especializado que utiliza lógica *fuzzy* foi para fazer os ajustes das curvas tempo-corrente que melhor se ajustam a cada posição dos relés no sistema sem que a coordenação seja afetada, ou seja, busca-se o menor tempo de operação (velocidade) do relés de proteção sem que eles saiam de sincronismo com os demais dispositivos de proteção do sistema, para condições operacionais sob contingências.

Materiais e Métodos

De forma geral, e atendendo às características do tema proposto para a execução deste projeto de pesquisa, foi adotada a seguinte metodologia:

1. Análise das características físicas e operacionais dos sistemas de transmissão para desenvolvimento de modelos matemáticos e simulações através do software ATP. A princípio o *software* ATP foi utilizado para simular o sistema elétrico em condições normais e sob diferentes cenários de contingência (N-1);

- Contingências tipo curto-circuito, diferentes níveis de carregamentos e sobrecargas, são condições operacionais reais dos sistemas elétricos de potência. A abordagem utilizada no projeto foi de usar o ATP como ambiente de simulação para a obtenção das correntes de curto-circuito que circulam pelo sistema. As rotinas necessárias para simular as operações dos relés numéricos, análise de cenários e algoritmo genético para efetuar a coordenação e seletividade dos relés foram desenvolvidas em linguagem *Python*. Desta forma, apenas as amostras de correntes do sistema sujeitos a diferentes tipos de faltas foram obtidas através do ATP.

2. Desenvolvimento de um algoritmo genético dedicado para simular esquema de proteção de sobrecorrentes de sistemas de subtransmissão com diferentes características físicas e operacionais;

- Implementação de um AG para ajustar dinamicamente os parâmetros dos relés de proteção, levando em consideração uma função de adaptação que avalie o desempenho do sistema de proteção e ajuste os parâmetros conforme necessário, para otimizar a coordenação e seletividades dos relés de distância e sobrecorrente..

3. Desenvolvimento de um algoritmo genético especializado que utilize lógica Fuzzy para efetuar os ajustes visando à seletividade e coordenação das diferentes zonas de proteção dos relés de proteção;

- A Implementação da lógica *fuzzy* na estrutura de um AG envolve algumas etapas principais, tais como: a) definir as variáveis *fuzzy*; b) criação das funções de pertinência; c) desenvolvimento das regras *fuzzy*; d) fuzzificação; e) inferência *fuzzy*; f) defuzzificação; g) integração com o AG; e, h) avaliação e otimização..

4. Executaram-se testes exaustivos em um sistema teste da literatura.

Resultados do Projeto de Pesquisa

Os resultados da pesquisa de pós-doutorado conduzida pelo estagiário Dr. André do Amaral Penteado Bísaro são apresentadas a seguir. O pesquisador participou da elaboração de um artigo apresentado em conferência nacional, bancas examinadoras de tese de doutorado, exame geral de qualificação de doutorado e de trabalhos de conclusão de curso. Os estudos realizados, relacionados ao comportamento físico dos sistemas de transmissão, determinação de parâmetros e modelagem de diferentes tipos de arranjos físicos de sistemas malhados através do software ATP possibilitaram implementar algoritmos para o processamento digital de sinais que podem ser amostrados através do software ATP para os relés de distância e de sobrecorrentes.

Como resultado final desse projeto de pesquisa um artigo para a revista científica internacional IEEE ACCESS foi elaborado e submetido para avaliação, estando ainda em análise até o presente momento.

Publicações

Os seguintes artigos foram publicados ou estão em fase de elaboração.

Congresso Nacional

- [1] Marcelo G. Sebastião, André A. P. Bísaro, Renzo A. V. Peralta, Lucas Do C. Yamaguti, José R. S. Mantovani. “Otimização de Planos de Tarefas de Manutenção em Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica” in Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2024).

Na referência [1] apresenta-se uma proposta para programação otimizada de tarefas de manutenções em redes de distribuição de energia elétrica utilizando uma formulação multiobjetivo, binária e linear. Nesta proposta contempla-se um horizonte de planejamento de um ano sendo o modelo matemático resolvido usando uma técnica de otimização clássica pseudo-dinâmica. O objetivo da técnica é obter uma proposta de planos de manutenção otimizada com limitação de recursos financeiro, melhorando a confiabilidade do sistema ao longo do período de análise.

Congresso Internacional

- [2] André A. P. Bísaro, José R. S. Mantovani. “Algoritmo Genético Multiobjetivo Aplicado ao Problema de Coordenação Ótima de Relés de Distância e Sobrecorrente em Linhas de Transmissão” In IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2025).

Na referência [2] apresenta-se uma metodologia baseada em algoritmos evolutivos para a solução do problema de coordenação ótima de relés de distância e direcionais de sobrecorrente. A otimização do problema é feita através de um algoritmo genético codificado para encontrar os melhores valores para a corrente de ajuste, fator multiplicador de ajuste de tempo, tipo de relé utilizado, tempo de atuação da segunda zona dos relés de distância e tempo de operação de zona reversa. Um sistema de 8 barras foi utilizado para demonstrar a eficiência e flexibilidade da metodologia proposta.

Revista Internacional

[3] André A. P. Bísaro, José R. S. Mantovani. “A novel fuzzy-logic-based genetic algorithm for optimal coordination of protective relays in electric power transmission systems” (IEEE ACCESS 2025).

Na referência [3] propõe-se um novo algoritmo genético *fuzzy* para coordenação ótima de relés de proteção em sistemas de transmissão de energia elétrica. Uma nova função de adaptação (fitness) foi desenvolvida, assim como as regras *fuzzy* aplicadas ao novo modelo matemático proposto, que apresentou ótimos resultados quando experimentado em um sistema teste de pequeno porte típico da literatura.

Discussão

A implementação do algoritmo genético fuzzificado para efetuar a seletividade e coordenação de relés de distância e sobrecorrente apresentou vários desafios, dos quais podem-se elencar alguns aspectos:

- Complexidade Computacional: AGs e sistemas *fuzzy*, por si só, são computacionalmente custosos. A combinação dos dois tipos de técnicas pode aumentar significativamente a complexidade computacional, exigindo maior capacidade de processamento e tempo de execução para sistemas de grande porte;

- Definição de Funções de Pertinência: A criação de funções de pertinência precisas para as variáveis *fuzzy* é fundamental para obter êxito na solução dos problemas do mundo real. Definições inadequadas podem levar a resultados imprecisos ou ineficazes. Isso requer um profundo entendimento do sistema de transmissão e das características das faltas.

- Formulação de regras fuzzy: Estabelecer um conjunto de regras fuzzy eficazes pode ser desafiador, especialmente em sistemas complexos com muitas variáveis de entrada. As regras devem ser abrangentes o suficiente para cobrir todas as possíveis condições operacionais, mas não tão numerosas a ponto de dificultar a inferência.

- Integração e Ajuste de Parâmetros: Integrar a lógica *fuzzy* com o AG requer um ajuste cuidadoso dos parâmetros da função de adaptação. Encontrar o equilíbrio certo entre a influência da lógica *fuzzy* e a evolução genética é uma tarefa desafiadora.

- Interpretação dos Resultados: A interpretação dos resultados fornecidos por um sistema fuzzy-genético pode ser menos intuitiva do que para os métodos tradicionais. Essa análise pode exigir treinamento adicional para os engenheiros de proteção e operadores do sistema.

Esses desafios destacam a complexidade envolvida na otimização de sistemas de coordenação e seletividade de relés, mas também apontam para as oportunidades de inovação e melhoria contínua. Apesar desses desafios, a combinação de algoritmos genéticos e lógica *fuzzy* oferece uma abordagem flexível para a coordenação de relés, potencialmente resultando em sistemas de proteção mais robustos e adaptativos.

O estudo das características e propriedades do sistema de proteção de distância e sobrecorrentes, para a configuração de relés numéricos, foram fundamentais para a solução do problema de otimização combinatória, com ênfase para o algoritmo genético *fuzzy* desenvolvido, capaz de efetuar os ajustes e seletividade dos relés de sobrecorrentes e integrar a proteção de distância com a proteção de sobrecorrente para sistemas de transmissão. Os testes realizados em um sistema típico da literatura comprovaram a robustez e a eficácia da nova proposta e do novo modelo matemático desenvolvido neste projeto de pesquisa. Portanto, o cronograma de atividades proposto no projeto de pós-graduação foi cumprido satisfatoriamente.

Comentários do Supervisor

As atividades de pesquisas realizadas pelo bolsista no desenvolvimento de seu projeto de pós-doutorado, envolvendo o tema **Coordenação de Relés de Distância e Sobrecorrente para Sistemas de Transmissão Através de Algoritmo Genético Especializado**, são apresentadas clara e objetivamente nesse documento. As descrições e enumeração dos artigos publicados ou em fase de revisão estão apresentadas de forma sucinta, e em anexo encontram-se também estes artigos em que se pode verificar detalhadamente o desenvolvimento da pesquisa. O bolsista participou de atividades de avaliação e colaboração em projetos de pesquisa de alunos e docentes do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica FEIS/Unesp e outras atividades relacionadas, todas descritas neste documento. É importante salientar que o estagiário está trabalhando em uma nova linha de pesquisa baseada na aplicação de uma nova metodologia que se utilizam as meta-heurísticas, algoritmo genético e lógica *fuzzy* para resolver o problema de coordenação e seletividade da proteção de sobrecorrente juntamente com a proteção de distância para sistemas malhados de geração e transmissão. Um artigo para a revista científica internacional IEEE ACCESS referente a esta pesquisa foi elaborado e submetido para avaliação, mas o período de 01 ano é relativamente curto para a conclusão de pesquisas inéditas como esta. No geral, considera-se o trabalho do bolsista de muito boa qualidade técnica, científica e acadêmica. Como supervisor **aprovo** o documento apresentado.

Participações em Bancas

Doutorado

1. Jonatas B. Leite, Mario A. J. Alzate, André A. P. Biscaro, Mahdi P. Kasmaei, Luis F. N. Lourenço. “*Electricity Grid Resilience to Disruptions: Assessments and Mitigations*”. Participação em banca de defesa de doutorado do aluno ALI REZA KHEIRKHAH. Doutorado em Engenharia Elétrica, 2024 – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Trabalho de graduação

2. Jonatas B. Leite, André A. P. Biscaro. “Determinação das Melhores Curvas de Controle Volt/Var para Inversores Inteligentes Usando Algoritmo Evolucionário”. Participação em banca de trabalho de graduação do aluno GEOVANE SASS CECCATO. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, 2024 – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
3. Jonatas B. Leite, André A. P. Biscaro. “Comunicação Serial entre um Computador e um Dispositivo Eletrônico Inteligente Comercial, como o SEL 451A”. Participação em banca de trabalho de graduação do aluno RONALDO ROMANO JUNIOR. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, 2024 – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
4. Suely C. A. Mantovani, André A. P. Biscaro, Júlio C. E. de Souza. “Desenvolvimento de uma Miniestação Meteorológica Integrada a um Dispositivo Móvel”. Participação em banca de trabalho de graduação do aluno ADIVALDO ALVES CORREA JUNIOR. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, 2024 – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Qualificação de Doutorado

5. José R. S. Mantovani, André A. P. Biscaro, Feltrin, A.P. “ Operação Ótima de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica de Grande Porte”. Participação em banca de qualificação de doutorado do aluno JAIROEL GONZALO YUMBLA ROMERO. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024 – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Estudos Especiais

6. José R. S. Mantovani, André A. P. Biscaro, Lucas C Yamaguti. “Planejamento de Curto Prazo de Redes de Distribuição com Geração Distribuída”. Participação em banca de seminário referente a disciplina de Estudos Especiais do aluno ROMMEL ANGEL HUAYAS INGA. Estudos Especiais I em Engenharia Elétrica, 2024 – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Avaliações Ad Hoc

7. André A. P. Biscaro. Parecerista ad hoc dos trabalhos submetidos para avaliação no edital 03/2024 – Edital PIBExt de Incentivo e Bolsas de Extensão promovido pela Pró-Reitoria de Extensão da UFPE, no período de 06 de agosto de 2024 a 21 de agosto de 2024, com uma carga horária total de 12 (doze) hora(s) equivalente a análise de 3 (três) trabalhos.
8. André A. P. Biscaro. Consultor Ad Hoc na avaliação de 01 (um) Projeto de Pesquisa do Edital 013/2024 - PROGRAMA DE APOIO À PESQUISA E INOVAÇÃO - PAPI - CHAMADA DE PROPOSTAS DE PROJETOS DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATOGROSSO, na data de 13 de Novembro de 2024.
9. André A. P. Biscaro. Avaliador da 21ª Semana Nacional de Ciência e tecnologia, evento promovido pela SECITECI, realizado entre os dias 22 e 24 de outubro, no Centro de Eventos do Pantanal, em Cuiabá.

Anexos

- Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2024;
(https://www.sba.org.br/cba2024/papers/paper_3762.pdf)
- Artigo INDUSCON 2025;
- Artigo IEEE ACCESS 2025;
- Participações em Bancas.

Otimização de Planos de Tarefas de Manutenção em Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica

Marcelo G. Sebastião^{a,b}, André A. P. Biscaro^{a,b}, Renzo A. Vargas Peralta^{a,c}, Lucas do C. Yamaguti^a, José R. S. Mantovani^a

^a-Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista - UNESP-Ilha Solteira-SP- Brasil
(e-mail: lucas.yamaguti@unesp.br, mant@dee.feis.unesp.br)

^b-FACET- Curso Engenharia Elétrica -Universidade do Estado do Mato Grosso-UNEMAT- Sinop-MT, Brasil
(e-mail: marcelo.gouveia@unemat.br, andre.biscaro@unemat.br).

^c-Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
(e-mail: renzovargas@usp.br)

Abstract: This paper presents a proposal for optimizing maintenance task scheduling in electric power distribution networks using a multi-objective, binary, linear formulation. The proposal encompasses a one-year planning horizon and is solved using a pseudo-dynamic classical optimization technique. The objective of the technique is to obtain proposals for optimized maintenance plans within financial resource constraints, thereby improving system reliability over the analysis period. The presented results are consistent, providing a set of non-dominated solutions that reflect the expected behavior of optimized maintenance plans according to the constraints and available resource allocation.

Resumo: Nesse trabalho apresenta-se uma proposta para programação otimizada de tarefas de manutenções em redes de distribuição de energia elétrica utilizando uma formulação multiobjetivo, binária e linear. Nesta proposta contempla-se um horizonte de planejamento de um ano sendo o modelo matemático resolvido usando uma técnica de otimização clássica pseudo-dinâmica. O objetivo da técnica é obter uma proposta de planos de manutenção otimizada com limitação de recursos financeiro, melhorando a confiabilidade do sistema ao longo do período de análise. Os resultados apresentados são consistentes, fornecendo um conjunto de soluções não dominadas, que refletem o comportamento esperado de planos de manutenções otimizados de acordo com as restrições e aplicação de recursos disponíveis.

Keywords: Maintenance Program, electrical energy distribution, reliability, failure rate, linear programming.

Palavras-chaves: Programa de Manutenção, distribuição de energia elétrica, confiabilidade, taxa de falhas, programação linear.

NOMENCLATURA		w	: Índice da seção a montante da seção s;
C(t)	Confiabilidade em função do tempo;	α	: Taxa de atualização da confiabilidade do equipamento;
e	Base de logaritmos neperianos ($e=2,728$);	lamb	: Peso associado aos intervalos de linearização.
λ	Taxa de falhas (Qtde de falhas/Qtde de horas de Operação).	1. INTRODUÇÃO	
X(t,e)	Variável de decisão binária que se for igual a 1 define a manutenção do equipamento e no instante t;	A energia elétrica é um insumo essencial para a sociedade que exige e necessita de padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade de fornecimento. O conceito de qualidade, contudo, tem definição ampla e abstrata, dependendo do produto entregue aos consumidores, segundo (Campos, Vicente Falconi, 1992) “um produto ou serviço de qualidade é aquele que atende perfeitamente, de forma confiável, acessível, segura e no tempo certo às necessidades do cliente”. No caso da energia elétrica a qualidade está relacionada a várias fatores como a taxa de interrupção do fornecimento, tempo de duração de interrupção, níveis de tensão, frequência adequada, distorções harmônicas, entre outros (Brown Richard E., 2009). Dessa forma, as agências reguladoras estabelecem indicadores de qualidade referentes à continuidade do fornecimento (ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021), impondo às empresas prestadoras do serviço metas que garantam um padrão mínimo de qualidade, entre eles destacam-se indicadores de continuidade DEC, FEC, DIC, FIC, DMIC e DICRI. O não cumprimento destas metas impõe penalizações às empresas. No caso dos indicadores individuais DIC, FIC, DMIC as suas violações imputam penalizações na forma de multas compulsoriamente pagas diretamente aos consumidores (ANEEL- Agência Nacional de Energia	
δ_0	Ponderação convexa dos pesos da FO;		
C(e)	Custo de manutenção do equipamento e;		
RO _t	Limite de recursos financeiros disponibilizados para serem investidos no mês t;		
E	Conjunto de todos os equipamentos e componentes instalados no sistema;		
HP	Horizonte de planejamento;		
S	Conjunto de seções;		
Ps	Conjunto das potências aparentes instaladas nas seções (kVA);		
N _{lin}	Cardinalidade do conjunto número máximo de pontos da linearização;		
W	Conjunto de seções a montante da seção s;		
e	Índice dos equipamentos instalados na rede;		
t	Índice de tempo, mês, pertencente ao conjunto HP;		
s	Elemento pertencente ao conjunto de seções, S;		

Elétrica, 2021). O montante destas multas exigem ações das empresas distribuidoras para mitigá-las, uma vez que impacta diretamente nos seus lucros e investimentos.

As empresas distribuidoras utilizam várias estratégias para mitigar a quantidade e a duração das faltas nas redes aéreas de distribuição. Dentre essas estratégias, destacam-se a instalação de dispositivos de automação, monitoramento, reforços na estrutura física e modelos de operação de rede que garantam redundância e planos de manutenção robustos. Entretanto, tais estratégias demandam grandes esforços das áreas de planejamento operacional, construção, operação e manutenção, com o grande desafio de aliar as necessidades técnicas a orçamentos cada vez mais escassos.

A engenharia de manutenção tem entre seus objetivos principais, aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, garantir a sua segurança e de seres humanos e animais que interagem com o sistema; avaliar a necessidade de substituição do equipamento (fim da vida útil); elaborar planos de manutenção e inspeções compatíveis com a operação e custos; fazer análise de falhas etc.

A manutenção preventiva é uma das estratégias para melhorar a qualidade dos índices de confiabilidade nas redes aéreas de distribuição. Na literatura especializada encontram-se várias propostas de modelos e técnicas de solução sobre este problema. Em (Trentini et al., 2021) apresenta-se uma revisão de vários trabalhos publicados sobre este tema desde 1944.

Em (Piasson et al., 2016) é apresentada uma metodologia baseada em um modelo multiobjetivo resolvido por meio de um algoritmo genético multi-objetivos (NSGA-II) para otimizar o processo de elaboração de um plano de manutenção (PM) centrado na confiabilidade (MCC). Neste trabalho na função objetivo utilizada modelam-se a minimização dos custos de manutenção e a inconfiabilidade da rede (considerada o complemento da confiabilidade), considerando com restrição os limites dos indicadores de confiabilidade DIC e FIC de cada grupo de consumidores, tempo de disponibilidade das equipes de manutenção e limites de tarefas de manutenção por equipamento, entre outras. O modelo é validado em um sistema elétrico real composto por 3 alimentadores divididos em 71 seções composto por 733 equipamentos.

Em (Afzali et al., 2019) o método proposto para determinar tarefas de manutenção utiliza um índice de confiabilidade com importância ponderada, (WI, do inglês weighted importance), que considera os alimentadores e os componentes mais críticos da rede de acordo com a eficiência econômica, aumento de confiabilidade e redução do número de consumidores interrompidos. Neste trabalho a manutenção é executada apenas em alimentadores e componentes mais críticos e para validar a metodologia é utilizado um sistema composto por dez alimentadores.

Em (Misari et al., 2020) é proposta uma formulação matemática genérica, considerando as incertezas nos tempos de restauração visando alocar, de forma otimizada, os recursos estinados à manutenção, e reduzir os custos da energia não suprida e de manutenção. O problema é resolvido através da

meta-heurística busca tabu multiobjetivo. Apresentam-se resultados obtidos através da implementação computacional da metodologia em um sistema teste da literatura composto de 13 seções e 154 equipamentos.

Em (Mirsaeedi et al., 2023) propõe-se um modelo de otimização de programação linear inteira mista, para implementação de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), que leva em consideração as incertezas envolvidas no tempo de restauração. No modelo de função objetivo minimizam-se os custos de manutenção de forma geral, incluindo o custo total da energia não suprida, custo total da interrupção, custo do material e serviços de manutenção. Para validação da metodologia foi utilizado uma rede convencional de teste apresentada em (Billinton and Allan, 1996).

(Ravaghi Ardabili et al., 2021) apresenta uma proposta de implementação com uma abordagem probabilística de manutenção centrada na confiabilidade, onde o nível da confiabilidade dos componentes é avaliado por um modelo de Markov de três estados, propondo a substituição da manutenção corretiva por manutenção preventiva determinando uma escala de precedência na aplicação dos recursos financeiros aplicados na manutenção dos equipamentos integrantes da rede.

(Alvarado et al., 2023), propõe uma estrutura integrada, considerando confiabilidade e recursos financeiros, para determinação de planos de manutenção ótimos, usando um modelo de otimização estocástico baseado em simulações, aplicado a um sistema de energia de uma instalação industrial de grande porte. Esta estrutura atua em dois estágios, no primeiro estágio denominado ‘otimizador’ são desenvolvidos planos de manutenção e inspeção que no segundo estágio denominado ‘simulador’ executa testes usando simulações sequenciais de Monte Carlo.

(Alvarez-Alvarado et al., 2022), apresenta uma revisão detalhada em relação à confiabilidade e manutenção em sistemas de energia nos últimos 20 anos, detalhando as estratégias de manutenção de maior relevância empregadas pelas empresas de energia elétrica, apresenta exemplos dos principais padrões internacionais usados e quais as tendências futuras na área de engenharia de manutenção.

Neste trabalho propõe-se um modelo matemático de programação linear inteira mista para o problema de planejamento de tarefas de manutenção de redes aéreas de distribuição, minimizando os custos relativos às tarefas de manutenção e à inconfiabilidade da rede. O modelo proposto é experimentado em um sistema de distribuição da literatura de 13 seções e 159 equipamentos resolvido através do solver comercial CPLEX-22.1.1.0. O restante do artigo é organizado da seguinte forma: na Seção 2 definem-se a metodologia e a base conceitual para o desenvolvimento do modelo, na Seção 3 apresentam-se o modelo matemático proposto, na Seção 4 apresentam-se os resultados e discussões dos testes realizados com a implementação computacional da metodologia proposta e na Seção 5 destacam-se as conclusões observadas ao final este estudo, juntamente com a apresentação de trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

O termo confiabilidade em distribuição de energia elétrica é, normalmente, usado para definir padrões de qualidade referentes à continuidade do serviço de fornecimento da energia entregue aos consumidores. Este termo é também utilizado na área de manutenção e está diretamente relacionado às taxas de falhas que os equipamentos estão sujeitos. Ou seja, neste trabalho, a confiabilidade é sinônimo de taxas de falhas dos equipamentos ou da rede.

A confiabilidade é a probabilidade de um equipamento, dispositivo ou um sistema desempenhar suas funções satisfatoriamente sob determinadas condições de uso durante um período preestabelecido. Para determinação do comportamento da confiabilidade de equipamentos e sistemas, várias distribuições de probabilidades são usadas para estimar as taxas de falhas, como a distribuição exponencial, Weibull, Gama, log-normal e Poisson. Nesse trabalho utiliza-se a distribuição exponencial, pois leva-se em consideração que a taxa de falhas inicial(λ) é constante. Dessa forma a confiabilidade é definida como uma função exponencial dependente somente de (λ) conforme a Eq.(1) .

$$C(t) = e^{-\lambda.t} \quad (1)$$

A confiabilidade pode ser interpretada como a probabilidade do equipamento falhar durante um período predeterminado (Fogliatto e Ribeiro, 2011). Para a análise de desempenho da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica os indicadores de continuidade são relacionados com as taxas de falhas, tais como, tempo médio entre falhas (MTBT-Mean time between failures), tempo médio até a falhas (MTTF-Mean time to failure) e função de vida residual média.

A taxa de falha é usada em vários trabalhos com características determinísticas (Ganguly et al., 2013). A precisão destes dados se torna prejudicada em função da falta de condições eficazes de acompanhamento e monitoramento das faltas que os componentes que compõem uma rede de distribuição estão sujeitos.

Na Tabela 1 são apresentados valores típicos de taxas de falhas dos equipamentos elétricos,(Horton et al., 1991).

Tabela 1. Fonte- (Horton e Goldeberg, 1990)

Equipamento	Taxa de Falha (Falha/Ano)
Chave de Proteção-CHP	0,01440
Chave de Manobra-CHM	0,00078
Regulador de Tensão-RT	0,00061
Transformador-TR	0,00061
Banco de Capacitor-BC	0,08500
Linhas de Distribuição-LD	0,0198 ^a
^a Por milha de condutor	

Para que um equipamento tenha seu funcionamento normal e suas funções mantidas, um plano de manutenção eficaz faz-se necessário. Nessa perspectiva, várias técnicas e teorias são descritas na literatura envolvendo a área de engenharia de

manutenção. Conforme descrito por (Kardec e Nascif, 2009) pode-se dividir as tarefas de manutenções conforme ilustrado na Fig 1.

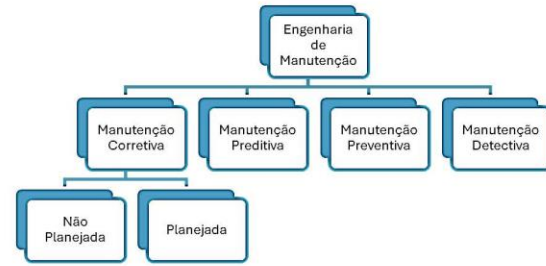


Fig 1- Classificação das tarefas de manutenção Fonte (Kardec e Nascif, 2009), adaptado pelo autor.

As manutenções corretivas, podem ser entendidas como as ações que visam devolver ao equipamento danificado ao estado de operação inicial ou pré-falha. A MCC é utilizada desde a década de 1960. É uma técnica que utiliza planos de manutenções diretamente relacionados com a redução das taxas de falhas dos equipamentos. O processo de desenvolvimento da MCC envolve a identificação de ações que, quando executadas, devem reduzir a probabilidade de um equipamento apresentar falhas, a um custo de manutenção adequado e contemple o retorno de investimento previsto do ativo.

Dessa forma, o planejamento de planos de manutenção vem sendo amplamente objeto de estudos na área de otimização matemática, que pode ser modelado como problemas com uma ou várias funções objetivo. No estado da arte apresentado em (Trentini et al., 2021) verifica-se a predominância de implementações de modelos multi-objetivo, uma vez que o tomador de decisões deve contemplar a exigência de melhorar os índices de confiabilidades com recursos financeiros limitados para manutenção. Nesta linha de classificação, dentre as técnicas de soluções de problemas de otimização, o uso das metas-heurísticas e heurísticas apresentam ligeira predominância nos trabalhos encontrados na literatura e as técnicas de otimização clássica completam o universo de técnicas de soluções determinísticas para o problema, conforme apresentado na Fig. 2.



Fig. 2- Fonte (Trentini et al., 2021), adaptado pelo autor.

3. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto para o planejamento de tarefas de manutenção possui características multi-objetivo, binário, pseudo-dinâmico, não linear e restrito. As funções objetivo que devem ser minimizadas são a $f_1(X)$, modelada através de (2), que representa os custos de manutenção dos equipamentos, e $f_2(X)$, modelada por (3), que representa o índice da inconfiabilidade ponderada obtido pelo plano de manutenção gerado a cada período do horizonte de planejamento, $t \in HP$. Na função da inconfiabilidade ponderada considera-se a confiabilidade da seção, $C_s(t)$, dado por (5), $s \in S$, no instante t , $t \in HP$, assim como a confiabilidade das seções a montante que compõem o caminho da seção sob análise até a subestação, a ponderação é calculada em função da potência aparente da carga instalada na seção $s \in S$ e todas as cargas do sistema.

O parâmetro δ_0 representa o termo da ponderação convexa dos pesos das componentes da função objetivo (FO), variando de 0 a 1, proporcionando ao tomador de decisão estabelecer o grau de impacto de $f_1(X)$ ou de $f_2(X)$.

O modelo está sujeito a uma restrição de recursos financeiros a cada período $t \in HP$, que restringe o orçamento disponibilizado para todo horizonte de planejamento HP, (4). Desta forma o modelo matemático do problema de planejamento de manutenção preventiva em sistemas aéreos de distribuição é formulado como:

$$\text{Min } f(X) = \langle f_1(X) | f_2(X) \rangle$$

Onde:

$$f_1(x) = \left(\sum_{t=1}^{HP} \sum_{e=1}^E C(e)(X(t, e)) \right) \cdot \delta_0 \quad (2)$$

$$f_2(x) = \left(\sum_{t=1}^{HP} \left[\frac{\sum_{s=1}^S (1 - C_s(t)) P_s}{\sum_{s=1}^S P_s} \right] \right) \cdot (1 - \delta_0) \quad (3)$$

Sujeito à:

$$\sum_{t=1}^{HP} \sum_{e=1}^E C(e)(X(t, e)) \leq RO_t \quad (4)$$

$$C_s(t) = e^{-\lambda_{(s,t+1)}} \cdot C_{(w,s-1)}, \forall s \in S, \forall (t+1) \in HP, w \in W \quad (5)$$

$$\lambda_{(s,t+1)} = \sum_{e=1}^E \lambda_{(e,t+1)}, \forall s \in S, \forall (t+1) \in HP \quad (6)$$

$$\lambda_{(e,t+1)} = \lambda_{(e,t)} \cdot \alpha, \forall e \in E, \forall t \in HP \quad (7)$$

Devido às características não lineares apresentadas na distribuição exponencial da confiabilidade (5), este modelo é linearizado usando a técnica da linearização por partes usando a formulação lambda (lambda) (Williams HP, 2013), conforme (8), (9) e (10). Essa linearização faz com que o modelo

linearizado apresente uma imprecisão em relação ao modelo não linear, mas possa ser resolvido através de técnica de programação linear inteira mista (PLIM).

$$e^{-\lambda_{(s,t+1)}} = \sum_{k=1}^{N_{lin}} \left(e^{-\left(\lambda_{smin} + (k-1) \cdot \left(\frac{\lambda_{smax} - \lambda_{smin}}{N_{lin} - 1} \right) \right) * \text{lambda}_{(s,k)}} \right), \quad (8)$$

$$\forall s \in S, \forall (t+1) \in HP$$

$$\lambda_{(s,t+1)} = \sum_{k=1}^{N_{lin}} \left(\left(\lambda_{smin} + (k-1) \cdot \left(\frac{\lambda_{smax} - \lambda_{smin}}{N_{lin} - 1} \right) \right) * \text{lambda}_{(s,k)} \right), \forall s \in S, \forall (t+1) \in HP \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{lin}} \lambda_{s_k} = 1, \quad \forall s \in S \quad (10)$$

A Equação (7) indica a atualização da taxa de falha para os equipamentos da rede a cada período. Inicialmente utilizam-se as taxas de falhas, conforme Tabela 1, apresentado por (Horton et al., 1991). Caso seja atribuída uma tarefa de manutenção a qualquer um dos equipamentos a taxa de falha é atualizada por um fator de atualização de $\alpha=0,01$, pois considera-se que o equipamento que sofreu manutenção volte a operar em condições próximas à ideal, enquanto as taxas de falhas dos equipamentos que não passaram por manutenções são atualizadas com o fator de $\alpha=1,04$, pois considera-se que não havendo manutenção até este período a tendência que ele esteja mais susceptível às falhas. Assim a cada período, as taxas de falhas de todos os componentes que compõem a seção são atualizadas, e a soma destas falhas apresenta em (6). A confiabilidade a cada período é atualizada em todas as seções de acordo com (5).

4. RESULTADOS

O modelo matemático proposto é implementado em linguagem AMPL sendo utilizado para sua solução o solver CPLEX (Versão-22.1.1.0). Os testes foram realizados em um alimentador encontrado na literatura, (Misari et al., 2020) composto por 11 chaves de proteção, 2 chaves de manobras, 2 reguladores de tensão, 61 transformadores, 1 banco de capacitores e 82 unidades de linha de distribuição. O alimentador teste foi agrupado em 13 seções, que são delimitadas por chaves de manobras ou chaves de proteção; a distribuição dos equipamentos e a topologia da rede são apresentadas na Fig 3.

Nos testes para validação do modelo algumas simplificações foram adotadas. Desta forma, na taxa de falha em linhas de distribuição não se levou em consideração uma possível extensão real do trecho delimitado entre as barras, conforme considerado por (Piasson et al., 2016), o banco de capacitores e os reguladores de tensão foram considerados como equipamentos ligados em série, considerando que possíveis

falhas provoquem interrupção na rede e o período de planejamento adotado é de 12 meses.

Nos recursos financeiros disponíveis para implementação dos planos de manutenções, consideram-se orçamentos para atendimento mínimo, médio e máximo das tarefas de manutenções, referenciados como PM-1, PM-2 e PM-3, em que são disponibilizados 10%, 50% e 100% do orçamento previsto, respectivamente, para execução das tarefas de manutenção nos equipamentos instalados na rede.

Para avaliação dos resultados utilizaram-se duas condições de testes, sendo que na primeira o valor do parâmetro δ_0 que representa a ponderação convexa dos pesos da função objetivo, foi mantido fixo em 0,1, ou seja, caracterizando a otimização onde a confiabilidade é priorizada em detrimento dos recursos financeiros. Na segunda condição, mantém-se o nível máximo de recursos financeiros, no caso PM-3 (100% recursos), sendo alterado o valor de δ_0 de 0 até 1, em intervalos de 0,1. Esse plano de manutenção foi simulado por fornecer a melhor utilização de recursos disponibilizados.

4.1 Condição 1

Na Tabela 2 é apresentada a relação de recursos disponibilizados (Rec/Disp.) e recursos utilizados (Rec/Utiliz.) pelos PM's e se observa que, mesmo havendo disponibilidade de recursos financeiros suficientes para atendimento de tarefas de manutenção que atendam a manutenção de 10%, 50% e 100% dos equipamentos, os planos de manutenção contemplam o uso dos recursos otimizados alocando tarefas de manutenção de forma que

sejam priorizadas as seções com maior potência aparente instalada contribuindo para a

melhoria da confiabilidade do fornecimento de energia da rede.

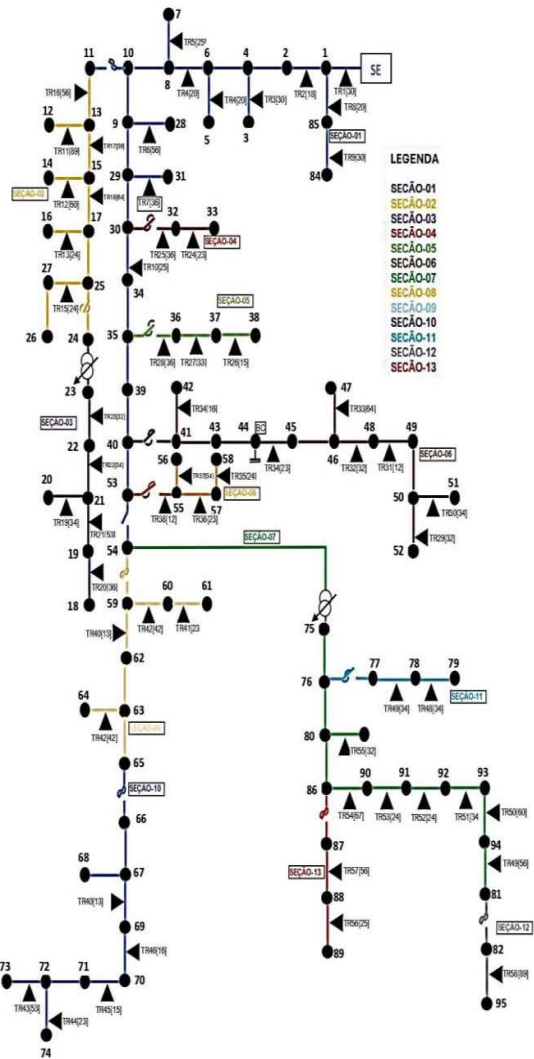


Fig 3 -Topologia do sistema teste apresentado por (Misari et al., 2020), adaptado pelo autor.

Tabela 2-Distribuição de recursos PM's e Seções/Potência.

Seções	P(kVA)/Sec.	PM(US\$)		
		1	2	3
1	290	20100,0	20200,0	40200,0
2	440	100,0	10200,0	42200,0
3	189	100,0	5200,0	5200,0
4	59	100,0	1100,0	1200,0
5	74	100,0	2200,0	2200,0
6	349	900,0	12000,0	44000,0
7	327	2100,0	13100,0	41100,0
8	113	100,0	3200,0	3200,0
9	92	100,0	6200,0	6200,0
10	120	100,0	9200,0	9200,0
11	68	100,0	2200,0	2200,0
12	89	100,0	1200,0	1200,0
13	81	100,0	2200,0	2200,0
TT-Rec/Utiliz.		24100	88200	200300
TT-Rec/Disp.		33410	167050	334100
% -Utilização		72,13%	52,80%	59,95%

Na Tabela 3 apresentam-se as tarefas de manutenções distribuídas por tipos de equipamentos e suas respectivas seções, destacando-se que a priorização para chaves de proteção se justifica por estas apresentarem taxas de falhas mais altas e custos de manutenção menores.

Tabela 3- Tarefas de manutenção por equipamentos e seções.

Seções	CHP PM			CHM PM			RT PM			TR PM			BC PM			LD PM			Total PM		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1				1	2	2										20	20	40	21	22	42
2	1	2	2							8						10	10		1	12	20
3	1	2	2													5	5		1	7	7
4	1	1	2													1	1		1	2	3
5	1	2	2													2	2		1	4	4
6	1	2	2							8			1	1	1	11	11	2	14	22	
7				1	1	1		1	1							2	10	10	3	12	19
8	1	2	2							7						3	3		1	5	5
9	1	2	2													6	6		1	8	8
10	1	2	2													9	9		1	11	11
11	1	2	2													2	2		1	4	4
12	1	2	2													1	1		1	3	3
13	1	2	2													2	2		1	4	4
TOTAL	11	21	22	2	3	3	0	1	1	0	0	23	1	1	1	22	82	102	36	108	152

CHP-Chave de proteção, CHM-Chave de manobra, RT- Regulador de tensão, TR-Transformador, BC- Banco de capacitor, LD-Linha de distribuição

No gráfico da Fig. 4, apresenta-se o conjunto de soluções não dominadas, evidenciando que o montante de recursos disponibilizados ao longo do período produz redução na inconfiabilidade ponderada $f_2(X)$ e verifica-se que o PM-3 apresenta a melhor evolução. No gráfico da Fig. 5, verifica-se a distribuição de recursos financeiros ao longo do HP.

Na Fig. 6 apresenta-se a relação da inconfiabilidade ponderada $f_2(X)$ no período de planejamento, em que se evidencia sua redução, considerando os três níveis de manutenções propostos.

No gráfico da Fig. 7, complementarmente, tem-se a confiabilidade do alimentador mês-a-mês para os planos de

manutenções fornecidos pela implementação computacional do modelo proposto.

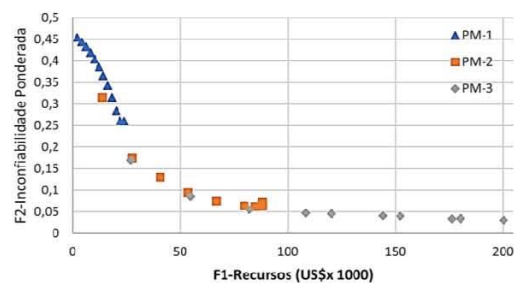


Fig. 4 - Fronteira de Pareto

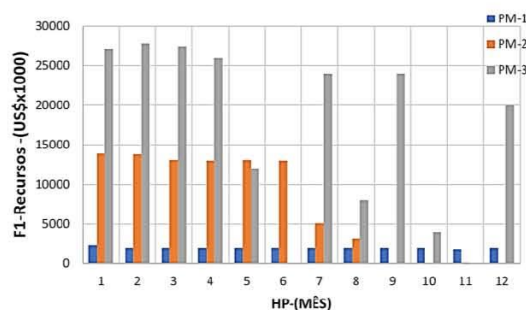


Fig. 5 - Relação recursos financeiros vs. horizonte de planejamento.

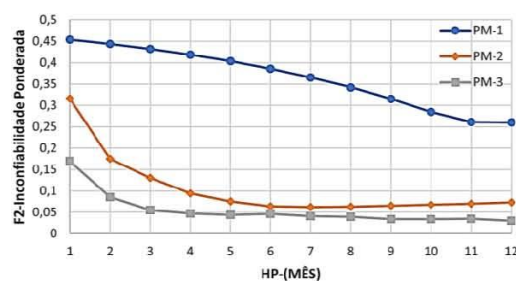


Fig. 6 - Inconfiabilidade ponderada vs. horizonte de planejamento.

Nas condições de testes para obter esses resultados foi adotado um valor de N_{lim} de 50 para os intervalos de linearização. Mantiveram-se as condições de testes e o intervalo de linearização foi alterado para 100 pontos e posteriormente para 1000 pontos, obtendo-se um erro médio de 0,064% e 0,078% respectivamente, no valor da inconfiabilidade, comparado com o resultado obtido para 50 intervalos.

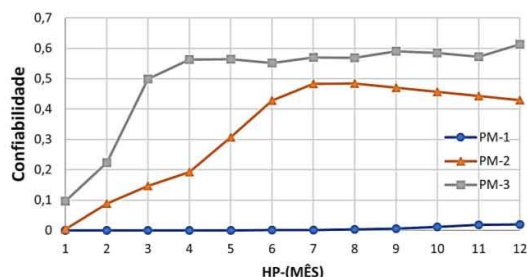


Fig. 7 - Confiabilidade do Sistema vs. horizonte de planejamento.

4.1 Condição 2

Nessa condição de teste efetua-se a alteração da ponderação convexa dos pesos da função objetivo, δ_0 , de 0 até 1, com intervalos 0,1 conforme mostrado na Fig. 8. Para evidenciar o impacto da seleção de δ_0 consideram-se os recursos da condição PM-3 que apresenta os melhores resultados para a inconfiabilidade ponderada.

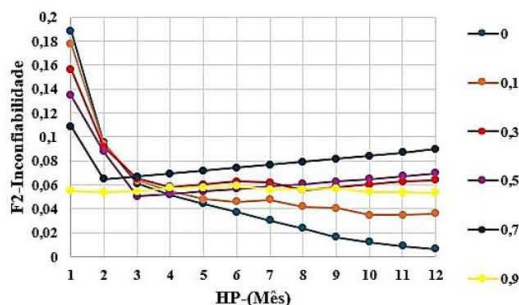


Fig. 8 - Inconfiabilidade ponderada vs horizonte de planejamento, variando δ_0 .

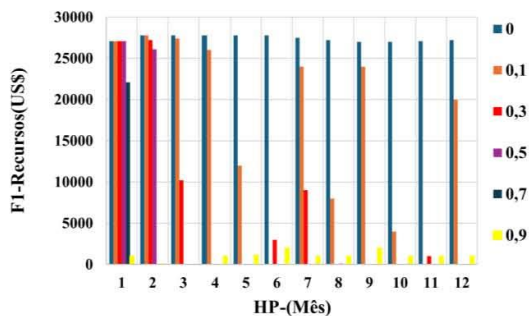


Fig. 9 - Relação recursos financeiros vs. horizonte de planejamento, variando δ_0 .

Na Fig. 9 apresenta-se a aplicação dos recursos financeiros ao longo do horizonte de planejamento, verificando-se que quanto maior for o valor de δ_0 a utilização de recursos é reduzida. Dessa forma fica evidente a relação entre a função $f_1(X)$ e $f_2(X)$, através da escolha de δ_0 , ficando a cargo do tomador de decisão a escolha da melhor solução conforme

restrições orçamentárias ou melhoria da confiabilidade do sistema de acordo com as diretrizes da empresa distribuidora.

Na Fig. 10 evidencia-se melhor essa relação, considerando o PM-3 e a parametrização de $\delta_0=0,1$ e de forma similar, na Fig. 11 é apresentado o resultado para $\delta_0=0,9$.

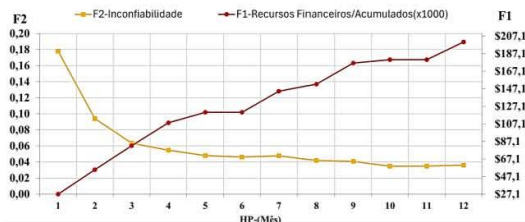


Fig. 10 - Relação-Inconfiabilidade Ponderada vs. Recursos financeiros ao longo do horizonte de planejamento: $\delta_0=0,1$.

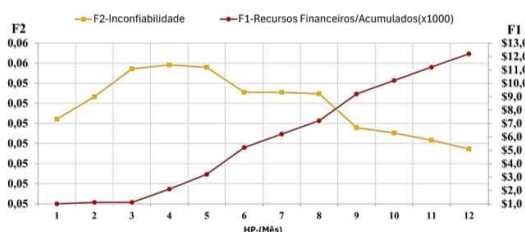


Fig. 11 - Relação-Inconfiabilidade Ponderada vs. Recursos financeiros ao longo do horizonte de planejamento: $\delta_0=0,9$.

5. CONCLUSÕES

O modelo de programação linear inteiro misto proposto apresentou resultados consistentes, garantindo uma solução ótima, fornecendo um conjunto de tarefas de manutenção ao longo do período de planejamento estabelecido, garantindo a melhor alocação dos recursos financeiros disponíveis e a melhoria da confiabilidade do sistema ao final do período.

Nos resultados obtidos verifica-se que houve a priorização de tarefas de manutenção nas seções com maiores cargas instaladas e nos equipamentos com maior impacto em relação à confiabilidade da seção, com menor custo de manutenção individual, consequentemente, proporcionando melhoria da confiabilidade de todo o sistema.

Considerando os resultados obtidos e as necessidades práticas das empresas distribuidoras, outras restrições deverão ser incorporadas ao modelo, tais como as que representam os indicadores de continuidade como DIC, FIC, DMIC, limitação recursos humanos (equipes), materiais e transportes disponíveis para manutenção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior – CAPES Código de financiamento 0001, CNPq Processo 304726/2020-6, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo #2023/17658-0 e à Pró-reitoria de Pesquisa da Unesp, Edital PROPe-PROPG 04/2022 pelo apoio financeiro. Os autores da Unemat agradecem à instituição pelo afastamento integral de suas atividades na unidade de origem.

REFERÊNCIAS

- Afzali, P., Keynia, F., Rashidinejad, M., 2019. A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders. *Energy* 171, 701–709. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.040>
- Alvarado, D., Moreno, R., Orchard, M.E., Kirschen, D.S., 2023. Cost-Benefit Analysis of Maintenance Plans: Case Study of the Power System of a Large Industrial Facility. *IEEE Transactions on Power Systems* 38, 2046–2057. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3185376>
- Alvarez-Alvarado, M.S., Donaldson, D.L., Recalde, A.A., Noriega, H.H., Khan, Z.A., Velasquez, W., Rodriguez-Gallegos, C.D., 2022. Power System Reliability and Maintenance Evolution: A Critical Review and Future Perspectives. *IEEE Access* 10, 51922–51950. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172697>
- ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021. Módulo 8-Qualidade da Energia Elétrica Revisão Motivo da Revisão Instrumento de aprovação pela ANEEL Data de vigência.
- Billinton, Roy., Allan, R.N. (Ronald N., 1996. Reliability evaluation of power systems. Plenum Press.
- Brown Richard E., 2009. Electric Power Distribution Reliability, Second. ed.
- Campos Vicente Falconi, 1992. TQC: Controle da Qualidade Total(No estilo Japones). Book Pag 2.
- Fogliatto, F.S., Ribeiro, J.L.D., 2011. Confiabilidade e manutenção industrial.
- Ganguly, S., Sahoo, N.C., Das, D., 2013. Recent advances on power distribution system planning: A state-of-the-art survey. *Energy Systems*. <https://doi.org/10.1007/s12667-012-0073-x>
- Horton, W.F., Goldberg, S., Backman, V., 1991. The failure rates of underground distribution system components, in: Proceedings of the Annual North American Power Symposium. Publ by IEEE, pp. 306–316. <https://doi.org/10.1109/naps.1990.151385>
- Kardec, A., Nascif, J., 2009. Manutenção Função Estratégica. Book 3 Ed., 1–329.
- Mirsaeedi, H., Hassankashi, A., Sajjadi, M., Siano, P., 2023. A Mixed-Integer Linear Programming Approach to Maintenance Budgeting in Electrical Distribution Networks Considering Repair Time Uncertainty, in: 2023 International Conference on Future Energy Solutions, FES 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/FES57669.2023.10182631>
- Misari, A.R., Leite, J.B., Piasson, D., Mantovani, J.R.S., 2020. Reliability-Centered Maintenance Task Planning for Overhead Electric Power Distribution Networks. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 31, 1278–1287. <https://doi.org/10.1007/s40313-020-00606-8>
- Piasson, D., Biscaro, A.A.P., Leão, F.B., Mantovani, R.S., 2016. A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multiobjective genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.040>
- Ravaghi Ardabili, H.A., Haghifam, M.R., Abedi, S.M., 2021. A probabilistic reliability-centred maintenance approach for electrical distribution networks. *IET Generation, Transmission and Distribution* 15, 1070–1080. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12081>
- Trentini, C., de Oliveira Guedes, W., de Oliveira, L.W., Dias, B.H., Ferreira, V.H., 2021. Maintenance Planning of Electric Distribution Systems—A Review. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 32, 186–202. <https://doi.org/10.1007/s40313-020-00663-z>
- Williams HP, 2013. Model Building in Mathematical Programming, 5ª Edition, Wiley. ed.

**ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO APLICADO AO
PROBLEMA DE COORDENAÇÃO ÓTIMA DE RELÉS DE DISTÂNCIA E
SOBRECORRENTE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

André do Amaral Penteado Biscaro

Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Av. dos Ingás, 3001 – Jd. Imperial, Sinop – MT, 78555-000
andre.biscaro@unemat.br

José Roberto Sanches Mantovani

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Av. Prof. José Carlos Rossi, 1370, Ilha Solteira – SP, 13585-000
mant@dee.feis.unesp.br

RESUMO

O problema de coordenação de relés de distância e sobrecorrente em linhas de transmissão é uma tarefa desafiadora que exige equilíbrio entre proteção eficiente e seletividade adequada. Consiste basicamente em determinar a sequência de operações dos relés de proteção para cada localização possível da falta, de modo que a seção sob falta seja isolada com segurança e sem atrasos excessivos. Neste trabalho foi proposta uma nova função objetivo para o problema, que leva em consideração a coordenação de relés de distância e direcionais de sobrecorrente. A otimização do problema é feita através de um algoritmo genético codificado para encontrar os melhores valores para a corrente de ajuste, fator multiplicador de ajuste de tempo, tipo de relé utilizado, tempo de atuação da segunda zona dos relés de distância e tempo de operação de zona reversa. Um sistema de 8 barras foi utilizado para demonstrar a eficiência e flexibilidade da aplicação proposta.

PALAVRAS CHAVE. Algoritmo Genético. Coordenação e Seletividade. Relés de Proteção.

Tópicos: Metaheurísticas

ABSTRACT

The problem of coordinating distance and overcurrent relays in transmission lines is a challenging task that requires a balance between efficient protection and adequate selectivity. It consists of determining the sequence of operations of the protection relays for each possible fault location, so that the faulted section is isolated safely and without excessive delays. In this work, a new objective function was proposed for the problem, which takes into account the coordination of distance and directional overcurrent relays. The optimization of the problem is done through a coded genetic algorithm to find the best values for the adjustment current, time multiplier setting, type of relay, actuation time of the second zone of the distance relays and operating time of reverse zone. An 8-bar system was used to demonstrate the efficiency and flexibility of the proposed application.

KEYWORDS. Genetic Algorithm. Coordination and Selectivity. Protection Relays.

Paper topics: Metaheuristics

1. Introdução

A proteção de sistemas de transmissão de energia elétrica é um problema complexo que requer grande atenção devido a sua complexidade e impacto na confiabilidade do sistema elétrico. Os sistemas de proteção dessas linhas devem responder de forma rápida e seletiva para falhas que ocorram no sistema. Os relés de distância (DR) e direcionais de sobrecorrente (DOCR) desempenham um papel crucial nessa proteção, garantindo um fornecimento de energia seguro e confiável. Neste trabalho, o esquema de proteção é composto por DOCRs e DRs que normalmente são utilizados como proteção de retaguarda (R) e proteção principal (P), respectivamente.

O problema de coordenação de relés de distância e sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica pode ser definido como um problema de otimização complexa cujo principal propósito é minimizar o tempo de atuação desses relés, de forma seletiva e coordenada, respeitando algumas regras e restrições de operação. O processo de coordenação entre DR e DOCR pode ser dividido em duas partes. A primeira está relacionada ao processo de cálculo das diferentes zonas de atuação das funções de distância dos relés, enquanto a segunda é utilizada para obter o tempo de execução e os ajustes dos parâmetros dos DOCR de maneira ideal. [Meira et al. 2023]

A coordenação de relés de proteção apresenta vários subproblemas bastante complexos, dentre os quais se destacam: (1) os ajustes dos tempos de operação, para atuarem rapidamente e protegerem o sistema elétrico contra falhas; (2) a seletividade dos relés, que envolve o ajuste das curvas de tempo-corrente, na qual o relé mais próximo da falha deve atuar primeiro, evitando disparos desnecessários; (3) a coordenação entre diferentes tipos de relés com características distintas, visto que os sistemas de proteção podem incluir relés de sobrecorrente, distância, diferencial e outros; (4) as condições dinâmicas do sistema elétrico, que incluem variações de carga, condições climáticas e diferentes configurações do sistema e que afetam a coordenação dos relés; (5) o modelo do sistema, visto que erros na modelagem matemática podem levar a ajustes inadequados; (6) protocolos e redes de comunicação confiáveis, para que os relés em diferentes localidades possam se comunicar ou serem acessados para coordenarem suas ações. [Anderson, 1999]

2. O Problema da Coordenação de Relés de Distância e Sobrecorrente

O objetivo da coordenação otimizada de relés é obter uma sequência de ajustes que resultem em tempos mínimos de operação, satisfazendo as restrições de seletividade. Na coordenação combinada de relés de distância e direcionais de sobrecorrente, os tempos de operação da segunda zona dos relés de distância (T_{Z2}) são normalmente temporizados para satisfazer as restrições de seletividade. No problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente (DOCR), o objetivo é determinar o fator multiplicador de ajuste de tempo (TMS) e a corrente de ajuste (I_{aj}) de cada relé, para que o tempo total de operação desses relés seja minimizado adequadamente. Para uma coordenação ideal estes parâmetros devem cumprir todas as restrições no menor tempo de operação. Além do TMS e I_{aj} , o método de otimização, a função objetivo (FO), o tipo de rede, e as características não lineares de cada tipo de relé são aspectos importantes e devem ser considerados para uma coordenação otimizada. [Hussaina et al. 2013]

Depois de especificadas as configurações das zonas de distância dos relés (DR), a tarefa de coordenação é executada com base nas faltas que ocorrem em pontos críticos do sistema. Neste trabalho foram considerados quatro pontos críticos para análise e adotada a seguinte notação: 1) DOCR/DOCR para representar a coordenação entre relés direcionais de sobrecorrente; 2) DR/DOCR para representar a coordenação entre relés de distância e direcionais de sobrecorrente; 3) DOCR/DR para representar a coordenação entre relés direcionais de sobrecorrente e de distância.

2.1. Coordenação DOCR/DOCR

Na Figura 1 apresentam-se os quatro pontos críticos para análise das correntes de curto-circuito que serão utilizadas para a coordenação dos relés de proteção. O DOCR(A) na Barra 1 deve fornecer proteção de retaguarda (R) para o DOCR(C) na Barra 2. Assim, quando ocorrem faltas no ponto F1 (falta na extremidade próxima de C) e no ponto F4 (falta na extremidade mais distante de C), as restrições são apresentadas nas equações (1) e (2):

$$Top_A^{RET}(F1) - Top_C^{PRI}(F1) \geq CTI \quad (1)$$

$$Top_A^{RET}(F4) - Top_C^{PRI}(F4) \geq CTI \quad (2)$$

Onde Top_A^{RET} e Top_C^{PRI} são os tempos de operação dos DOCRs de retaguarda e principal, respectivamente, nos pontos críticos F1 e F4. CTI é o intervalo de tempo de coordenação mínimo entre o relé principal (DOCR) e o relé de retaguarda (DOCR).

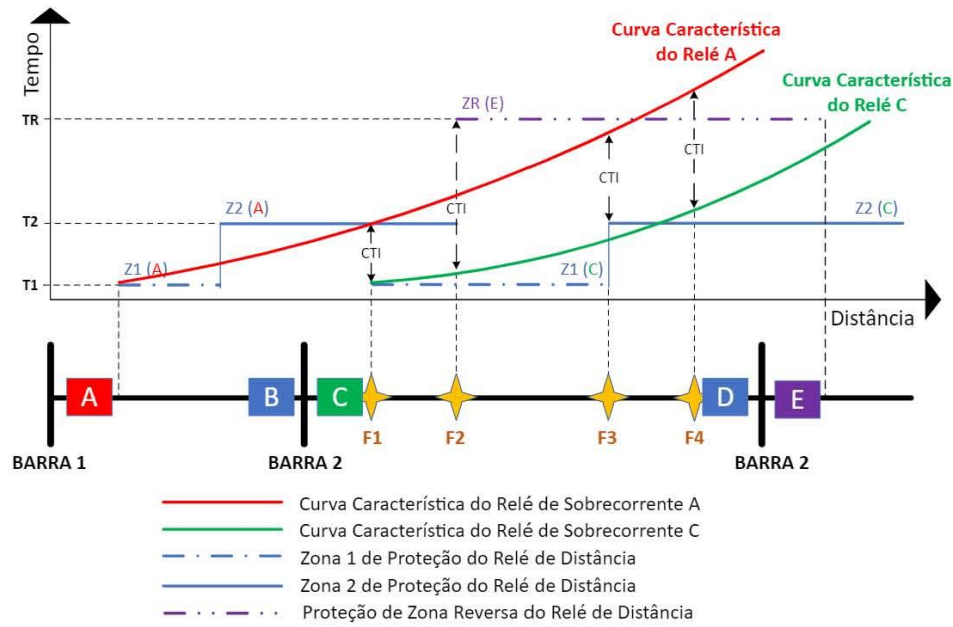


Figura 1: Coordenação para os relés de proteção de distância e direcionais de sobrecorrente.

A Zona 1 de proteção dos relés de distância (Z1) tem atuação quase que instantânea (20 ms) e é ajustada para cobrir 80% do comprimento da linha protegida. A Zona 2 de proteção dos relés de distância (Z2) é configurada para cobrir 100% da linha protegida mais 20% da linha adjacente e deve atuar de forma temporizada entre 300 e 600 ms. Já a proteção de zona reversa dos relés de distância (ZR) deve atuar também de forma temporizada entre 700 ms e 1,4s.

2.2. Coordenação DR/DOCR

O DOCR(A) na Barra 1 deve fornecer proteção de retaguarda para o DR(C) na Barra 2. Assim, quando as faltas ocorrerem no ponto F3 (final da segunda zona do relé de distância A), a restrição a ser cumprida é representada pela equação (3):

$$Top_A^{RET}(F3) - T_{Z2,C}^{PRI}(F3) \geq CTI \quad (3)$$

Onde Top_A^{RET} é o tempo de operação do DOCR de retaguarda, $T_{Z2,C}^{PRI}$ é o tempo da zona 2 do DR no ponto crítico F3. CTI é o intervalo de tempo de coordenação entre o relé principal (DR) e o relé de retaguarda (DOCR).

2.3. Coordenação DOCR/DR

O DR(E) na barra 3 deve fornecer proteção de retaguarda para o DOCR(C) na barra 2. Assim, quando ocorrerem faltas no ponto F2 (que é o final da segunda zona do DOCR(A) e início da zona 2 reversa do DR(E)), a restrição a ser cumprida será a representada pela equação (4):

$$T_{ZR,E}^{RET}(F2) - Top_C^{PRI}(F2) \geq CTI \quad (4)$$

Onde Top_C^{PRI} é o tempo de operação do DOCR principal. $T_{ZR,E}^{RET}$ é o tempo de operação do DR de retaguarda da zona reversa, no ponto crítico F2. CTI é o intervalo de tempo de coordenação entre os relés principal (DR) e o de retaguarda (DOCR).

2.4. Definição dos Pares de Relés de Proteção Principal (P) e Retaguarda (R)

Considerando as diferentes zonas de proteção e atuação dos relés, deve-se definir os pares de relés que irão atuar como proteção principal (P) ou de retaguarda (R). Os relés direcionais de sobrecorrente (DOCR) e os relés de distância (DR) instalados em cada extremidade das linhas (R1, ..., R14) desempenham simultaneamente as funções de proteção principal e de retaguarda.

[Kawahara et al. 1997] e [Marcolino et al. 2015] utilizam uma base de regras heurísticas para encontrarem os pares de relés P/R através da criação de matrizes relacionais. No entanto, existe uma forma mais simples, rápida e intuitiva de identificação dos pares P/R, definida em uma das regras apresentadas a seguir:

- 1) Na Figura 2, o relé R2, instalado na Barra 1, é a proteção principal da linha L2. Os dispositivos de proteção de retaguarda do relé R2 serão todos aqueles relés instalados nas barras opostas das linhas que partem da Barra 1, exceto o relé referente à própria linha L2, ou seja, R1 e R7;
- 2) Considerando a Figura 2, o relé R1 instalado na Barra 2 será a proteção de retaguarda de todos os relés instalados na Barra 1, exceto o relé que protege a própria linha L1, ou seja, R1 é retaguarda de R2 e R14.

Todos os pares de proteção P/R apresentados na Tabela 1 foram obtidos percorrendo o sistema de transmissão apresentado na Figura 2, adaptado de [Rajput, 2016], utilizando a primeira forma de identificação.

Tabela 1 – Pares de proteção P/R do sistema da Figura 2.

Proteção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Principal (P)	R1	R2	R2	R3	R4	R5	R6	R6	R7	R7
Retaguarda (R)	R6	R1	R7	R2	R3	R4	R5	R14	R5	R13

Proteção	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Principal (P)	R8	R8	R9	R10	R11	R12	R12	R13	R14	R14
Retaguarda (R)	R7	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R8	R1	R9

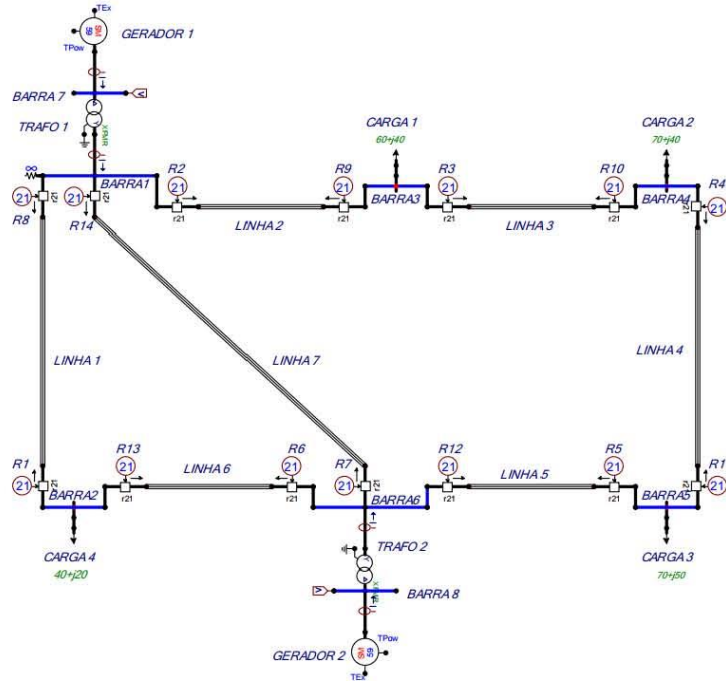


Figura 2: Sistema teste de 8 barras simulado no ATP.

2.5. Formulação do Problema

Vários algoritmos baseados em metaheurísticas para coordenação otimizada de relés tem sido proposto na literatura e estudados durante anos [El-kordy et al. 2021], assim como muitas FOs foram propostas com o intuito de minimizar o número de erros de coordenação devido à operação dinâmica dos sistemas.

A formulação matemática do problema de coordenação ótima de relés proposta neste trabalho para minimizar o tempo de operação dos relés de sobrecorrente e coordenar a atuação dos relés DRs e DOCRs é expressa pela equação (5).

$$FO = \sum_{r=1}^{nr} Top_r + \alpha \sum_{p=1}^{np} |\Delta T_{Top,p} - |\Delta T_{Top,p}|| + \beta \sum_{p=1}^{np} |\Delta T_{Z2,p} - |\Delta T_{Z2,p}|| + \gamma \sum_{p=1}^{np} |\Delta T_{ZR,p} - |\Delta T_{ZR,p}|| \quad (5)$$

Sendo:

$$Top_r = \frac{a \cdot TMS_r}{\left(\left(\frac{I_{CC,r}}{I_{aj,r}} \right)^n - 1 \right)} \quad r = 1, 2, \dots, nr \quad (6)$$

$$\Delta T_{Top,p} = Top_p^{RET} - Top_p^{PRI} - CTI_p^{PRI} \quad p = 1, 2, \dots, np \quad (7)$$

$$\Delta T_{Z2,p} = Top_p^{RET} - T_{Z2,p}^{PRI} - CTI_p^{PRI} \quad p = 1, 2, \dots, np \quad (8)$$

$$\Delta T_{ZR,p} = T_{ZR,p}^{RET} - Top_p^{PRI} - CTI_p^{PRI} \quad p = 1, 2, \dots, np \quad (9)$$

Sujeito a:

$$I_{aj,r}^{min} < I_{aj,r} < I_{aj,r}^{max} \quad (10)$$

$$TMS_r^{min} < TMS_r < TMS_r^{max} \quad (11)$$

$$1 < Tipo_r < 4 \quad (12)$$

$$T_{Z2,r}^{min} < T_{Z2,r} < T_{Z2,r}^{max} \quad (13)$$

$$T_{ZR,r}^{min} < T_{ZR,r} < T_{ZR,r}^{max} \quad (14)$$

O primeiro termo da equação (5) representa o tempo de operação dos relés direcionais de sobrecorrente (Top_r), onde nr representa o número total de relés. Esse tempo é calculado através da equação (6), que utiliza o fator multiplicador de ajuste de tempo (TMS) e a corrente de ajuste (I_{aj}) de cada relé. $I_{CC,r}$ é a corrente de curto-circuito sensibilizada pelo relé r e os termos a e n são definidos de acordo com os 4 tipos de relés apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos DOCR segundo a Norma IEC-60255

Tipo de relé	Nº	a	n
Extremamente Inverso	1	80	2
Muito Inverso	2	13,5	1
Inverso Padrão	3	0,14	0,02
Tempo Definido	4	120	1

Fonte: [Areva, 2011]

Os parâmetros α , β , e γ são fatores de penalidade utilizados para ponderar a influência dos três termos da FO. O parâmetro α está relacionado com a coordenação do tempo de operação dos relés direcionais de sobrecorrente. O parâmetro β está relacionado com a coordenação entre a segunda zona dos relés de distância principais e a função de sobrecorrente dos relés de retaguarda. Já o parâmetro γ está relacionado com o tempo de operação dos relés de distância de retaguarda da zona reversa e o tempo de operação dos relés direcionais de sobrecorrente principais.

O segundo termo da FO representa as restrições de coordenação entre os tempos de operação dos relés direcionais de sobrecorrente (DOCR) principais, Top_p^{PRI} , e os tempos de operação dos relés direcionais de sobrecorrente (DOCR) de retaguarda, Top_p^{RET} , onde np é o número de pares (P/R) de relés. Se a diferença dos tempos de operação entre os relés ($\Delta T_{Top,p}$) calculada através da equação (7) resultar em um valor negativo, a restrição de coordenação está sendo violada e a FO será penalizada. CTI é o intervalo de tempo de coordenação entre os relés principais (DOCR) e os de retaguarda (DOCR).

O terceiro termo da FO representa as restrições de coordenação entre os tempos da segunda zona dos relés de distância (DR) principais, $T_{Z2,p}^{PRI}$, e os tempos de operação dos relés direcionais de sobrecorrente (DOCR) de retaguarda, Top_p^{RET} , onde np é o número de pares (P/R) de relés. Se a diferença dos tempos de operação entre os relés ($\Delta T_{Z2,p}$), calculada através da equação (8), resultar em um valor negativo, a restrição de coordenação está sendo violada e a FO será penalizada. CTI é o intervalo de tempo de coordenação entre os relés principais (DR) e os relés de retaguarda (DOCR).

O quarto termo da FO representa as restrições de coordenação entre os tempos de operação dos relés de distância de retaguarda da zona reversa ($T_{ZR,p}^{REV}$) e os tempos de operação dos relés direcionais de sobrecorrente principais (Top_p^{PRI}), onde np é o número de pares (P/R) de relés. Se a diferença dos tempos de operação entre os relés ($\Delta T_{ZR,p}$) calculada através da equação (9) resultar em um valor negativo, a restrição de coordenação está sendo violada e a FO será

penalizada. CTI é o intervalo de tempo de coordenação entre os relés principais (DOCR) e os de retaguarda (DR).

A corrente de ajuste dos relés ($I_{aj,r}$) pode variar entre a corrente máxima de carga ($I_{aj,r}^{min}$) e a corrente mínima de curto-circuito da linha protegida, considerando os 4 pontos críticos ($I_{aj,r}^{max}$). O fator multiplicador de ajuste de tempo (TMS) varia entre 0,05 (TMS_r^{min}) e 1 (TMS_r^{max}). O tipo de relé ($Tipo_r$) pode variar de acordo com os 4 tipos de relés apresentados na Tabela 2.

Os outros dois parâmetros, $T_{Z2,r}$ e $T_{ZR,r}$, representam os tempos de resposta das zonas dos relés de distância (DR). Esses dois parâmetros são considerados contínuos e variam de acordo com a faixa apresentada em [Damchi et al., 2016] [Abboud et al., 2019]. Como a primeira zona $T_{Z1,r}$ é considerada instantânea (20 ms), o AG considera, para efeito de coordenação, a segunda zona ($T_{Z2,r}$) e a zona reversa ($T_{ZR,r}$) do DR. Os valores considerados são $T_{Z2,r}^{min}$ 300 ms, $T_{Z2,r}^{max}$ 600 ms, $T_{ZR,r}^{min}$ 700 ms e $T_{ZR,r}^{max}$ 1,4 s.

3. Algoritmo Genético Aplicado ao Problema

O Algoritmo Genético (AG) é uma técnica de solução evolucionária muito utilizada em problemas complexos de otimização, sendo um algoritmo baseado nos mecanismos de seleção natural e da genética. O AG emprega uma estratégia de busca paralela e estruturada, mas aleatória, que é voltada em direção ao esforço pela busca de pontos de minimização ou maximização. Utiliza regras de transição probabilística, trabalhando com uma população e não com apenas um único ponto, onde uma nova população de descendentes é criada a partir de uma geração de pais mais adaptados. O AG consiste basicamente em seis etapas: inicialização, cruzamento, mutação, avaliação da FO, seleção e validação dos critérios de parada. Na Figura 3 apresenta-se o pseudocódigo do AG aplicado ao problema e cada uma das etapas é descrita a seguir:

```

1  #Pseudocódigo: Algoritmo Genético
2  vars população, num_gerações, mutation_rate, crossover_rate, elitism_rate
3  Gera_população_inicial(população) # Gera população inicial
4  for geração in num_gerações:
5      for indivíduo in população:
6          Calcula_FO(indivíduo) # Calcula a FO de cada indivíduo
7          Amazena o melhor indivíduo e melhor FO
8      nova_população = [] # Inicia nova população
9      Aplicar_Elitismo(elitism_rate) # Conserva uma parte da população
10     nova_população <- população_de_elite
11     for _ in (população * (1 - elitism_rate)):
12         pai, mãe = seleciona_parentes(população, FO) # Seleção dos pais
13         filho1, filho2 = crossover(pai, mãe, crossover_rate) # Cruzamento
14         filho1 = mutação(filho1, mutation_rate) # Mutação do Filho 1
15         filho2 = mutação(filho2, mutation_rate) # Mutação do Filho 2
16         if FO(filho1) < FO(filho2): # Seleção por Torneio
17             nova_população.adiciona(filho1)
18         else:
19             nova_população.adiciona(filho2)
20     população = nova_população # Atualização da população
21 Imprime_resultados

```

Figura 3: Pseudocódigo do AG aplicado ao problema.

3.1. Inicialização – Codificação e População Inicial

A estrutura do cromossomo utilizado neste trabalho é apresentada na Figura 4. A população inicial é gerada de forma controlada aleatoriamente, para que não viole as restrições apresentadas nas equações (10) a (14). Neste trabalho foi utilizada uma população de 100 indivíduos.

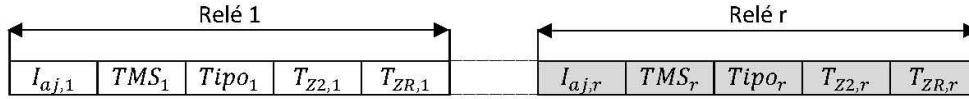


Figura 4: Codificação dos indivíduos.

3.2. Avaliação da FO

A nova função objetivo proposta neste trabalho para a coordenação otimizada dos relés de direcionais de sobrecorrente e relés de distância é definida conforme a Equação (5).

3.3. Cruzamento

O cruzamento (*crossover*) realiza a troca de informações genéticas entre dois indivíduos selecionados, visando formar novos indivíduos para a próxima geração [Sheppard, 2016]. O processo de cruzamento utilizado é um processo de ponto único, ou seja, parte do material genético de um indivíduo é trocado pela parte correspondente de outro indivíduo do mesmo par selecionado, de acordo com uma taxa de cruzamento pré-estabelecida (*crossover_rate*). Neste trabalho foi utilizada uma taxa de cruzamento de 50%.

3.4. Mutação

No processo de mutação, mudanças aleatórias de baixa probabilidade são realizadas nos genes dos indivíduos, proporcionando uma diversificação na população e aumentando as chances de fuga de locais ótimos [Goldberg, 1989]. O processo de mutação é realizado de acordo com a taxa de mutação (*mutation_rate*). Esta taxa assume valores normalmente muito pequenos, entre 1% e 5%. Neste trabalho foi utilizada uma taxa de mutação de 2%.

3.5. Seleção - Elitismo

O processo de seleção utilizado é denominado torneio, que consiste na comparação das funções objetivos de 2 indivíduos e resulta na seleção do indivíduo com melhor grau de adaptação (melhor FO), que passa a fazer parte da nova população enquanto o outro é eliminado do processo.

A fim de manter uma parte dos melhores indivíduos em cada nova geração, utilizou-se uma taxa de elitismo (*elitism_rate*), que mantém os indivíduos originais, sem sofrerem nenhuma alteração. Neste trabalho foi utilizada uma taxa de elitismo de 10%.

3.6. Finalização – Critério de Parada

O critério de parada geralmente é dado pelo número de gerações ou pela qualidade das soluções. Neste trabalho, o número máximo de 500 gerações foi utilizado como critério de parada.

4. Resultados e Discussões

Os testes foram realizados em um computador com processador intel® i7 3.2 GHz com 16 GB de memória RAM. O sistema teste de 8 barras utilizado neste trabalho possui 2 geradores de 150MVA, 7 linhas de transmissão, e 28 relés (14 de DR e 14 de DOCR) posicionados conforme apresentados na Figura 2. Os dados do sistema, como potência ativa e reativa das cargas, resistência e reatância das linhas de transmissão, dos transformadores e dos geradores foram retirados de [Sadeh et al. 2011]. Para simular o sistema e calcular suas condições de carga e curto-circuito foi utilizado o software ATP® e o AG foi implementado utilizando a linguagem de programação Python. Os resultados das simulações realizadas no ATP® são utilizados pelo AG como parâmetros de entrada.

Os parâmetros α , β e γ da FO foram calibrados através de testes exaustivos, obtendo-se o melhor ajuste ($\alpha = 10$, $\beta = 5$, e $\gamma = 15$) que corresponde aos valores finais usados neste trabalho para otimizar a coordenação de relés DR e DOCR. Outros parâmetros de calibração do AG são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Calibração do AG

Parâmetro	Valor
Número de Gerações	500
Tamanho da População	100
Taxa de Mutação	2%
Taxa de Recombinação	50%
Taxa de Elitismo	10%

Na Tabela 4 apresentam-se os parâmetros gerados pelo AG para a coordenação dos relés DR e DOCR. Os valores referentes às correntes de ajuste (I_{aj}) respeitam os limites impostos pela restrição apresentada na equação (10), representando corretamente as características de carga da rede. Os valores encontrados para os fatores multiplicadores de ajuste de tempo (TMS) são pequenos e estão respeitando a faixa de ajuste estabelecida pela equação (11), entre 0,05 e 1, o que indica uma atuação rápida desses relés. Os tipos de relés mais indicados pelo AG foram os do tipo 1 e 2, que correspondem ao tipo extremamente inverso e muito inverso, respectivamente.

Em relação aos valores encontrados para a inclusão e coordenação combinada de relés de distância e direcionais de sobrecorrente, os tempos de operação da segunda zona dos relés de distância (T_{Z2}) satisfazem as restrições de seletividade representadas pela equação (13). Da mesma maneira os valores encontrados para T_{ZR} satisfazem as restrições de seletividade representadas pela equação (14).

Tabela 4 – Parâmetros gerados pelo AG

Relé No.	DOCR				DR	
	I_{aj}	TMS	Tipo	Top (s)	T_{Z2} (s)	T_{ZR} (s)
1	2124,3022	0,0511	1	0,2387	0,5877	1,2750
2	1039,6515	0,6730	2	0,4507	0,3903	1,3366
3	487,5494	0,7378	2	0,6000	0,3535	0,9714
4	937,8535	0,1403	1	0,3768	0,5180	1,2893
5	1143,7883	0,0938	2	0,3036	0,3893	1,1635
6	1239,9802	0,3899	1	0,1177	0,3210	1,1864
7	1306,0597	0,2801	2	0,2678	0,3690	1,2191
8	1651,8577	0,6822	1	0,3683	0,5619	1,0858
9	1109,1366	0,0944	2	0,3667	0,3417	1,3748
10	898,5382	0,2030	1	0,4527	0,3495	0,9493
11	1157,8692	0,2776	1	0,4019	0,4268	1,1669
12	1384,6134	0,4781	2	0,4342	0,5928	1,1256
13	1632,7115	0,1839	2	0,4044	0,3581	0,8574
14	367,8391	0,1363	4	0,3126	0,5722	1,3955
Valor da FO		Médias	0,36401		0,43799	1,17119
	5,0959					

Na Tabela 5, ΔT_{Top} representa a diferença de tempo de atuação entre os relés direcionais de sobrecorrente principais, Top_p^{PRI} , e os relés direcionais de sobrecorrente de retaguarda Top_p^{PRI} , sendo todos positivos, o que indica a correta coordenação dos pares (P/R) e a ausência de violação das restrições de coordenação para estes pares de relés.

ΔT_{Z2} representa a diferença de tempo de atuação entre os tempos da segunda zona dos relés de distância (DR) principais, $T_{Z2,p}^{PRI}$, e os tempos de operação dos relés direcionais de sobrecorrente (DOCR) de retaguarda, Top_p^{RET} , sendo todos positivos, o que indica a correta coordenação dos pares (P/R) e a ausência de violação das restrições de coordenação para estes pares de relés.

Tabela 5 – Lista de pares de relés (P/R) e seus intervalos de coordenação

Principal (P)	Retaguarda (R)	ΔT_{Top} (s)	ΔT_{Z2} (s)	ΔT_{ZR} (s)
2	1	0,7696	3,3287	0,5243
14	1	0,9077	3,1468	0,6624
3	2	0,3307	0,9610	0,4366
4	3	0,3373	0,5595	0,2946
5	4	0,4335	1,3210	0,6857
6	5	1,4945	0,9986	0,7458
7	5	1,3444	0,9506	0,5957
1	6	0,6337	0,8462	0,6477
2	7	0,8016	0,6594	0,4684
8	7	0,8840	0,4877	0,5508
13	8	0,3779	1,1720	0,3815
8	9	1,0004	0,6402	0,7065
14	9	1,0561	0,6300	0,7622
9	10	0,6799	1,2529	0,2826
10	11	0,4169	1,2331	0,4142
11	12	0,4994	0,7598	0,4237
7	13	1,1617	0,7762	0,2896
12	13	0,9953	0,5524	0,1232
6	14	1,0424	0,8733	0,9778
12	14	0,7259	0,6015	0,6613
Restrições de Coordenação		0,0000	0,0000	0,0000

Na Tabela 5, ΔT_{ZR} representa a diferença de tempo de atuação entre os tempos de operação dos relés de distância de retaguarda da zona reversa ($T_{ZR,p}^{REV}$) e os tempos de operação dos relés direcionais de sobrecorrente principais (Top_p^{PRI}), sendo todos positivos também, o que indica a correta coordenação dos pares (P/R) e a ausência de violação das restrições de coordenação para estes pares de relés.

5. Conclusões

Um novo programa de computador para coordenação otimizada de relés de distância e sobrecorrente em linhas de transmissão de energia elétrica foi desenvolvido baseado no algoritmo genético. No método proposto, uma FO especial foi desenvolvida e proposta, mostrando-se capaz de lidar com o problema de má coordenação. O programa de computador foi testado em uma rede do sistema de energia já conhecida, demonstrando que essa nova abordagem pode ser considerada flexível, eficiente e bem-sucedida. Sua flexibilidade se deve ao fato de conseguir lidar com muitas variáveis, tipos de relés e ajustes de tempos. Sua eficiência se deve às modificações da função objetivo que, mesmo usando muitas variáveis de decisão, permitiu ao AG encontrar soluções de ótima qualidade. Também foi possível constatar que a inclusão de relés de sobrecorrentes com diferentes tipos de curvas características viabiliza a avaliação de outras possibilidades de coordenação.

Referências

Abboud, R., Bell, J. e Smyth, B. (2019). Considerations and benefits of using five zones for distance protection. In *72nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. pp.1-11.

Anderson, P. M. (1999) *Power system protection*. McGraw-Hill, New York.

Areva. (2011). *Network Protection & automation guide*. Alstom, Paris.

Damchi, Y., Sadeh, J. e Mashhadi, H. R. (2016). Optimal coordination of distance and overcurrent relays considering a non-standard tripping characteristic for distance relays. In *IET Generation, Transmission & Distribution*. (10):1448 – 1457.

El-kordy, M., El-fergany, A. e Gawad, A. F. A. (2021). Various metaheuristic-based algorithms for optimal relay coordination: review and prospective. *Arch Computat Methods Eng*. 28: 3621–3629.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, Massachusetts.

Hussaina, M. H., Rahima, S. R. A. e Musirinb, I. (2013). Optimal overcurrent relay coordination: a review. *Procedia Engineering*. 53:332–336.

Kawahara, K., Sasaki, H. e Sugihara, H. (1997). An application of rule based system to the coordination of directional overcurrent relays. In *IEEE Power System Protection Conference*, 434:58-61.

Marcolino, M. H., Leite, J. B. e Mantovani, J. R. S. (2015). Optimal coordination of overcurrent Directional and distance relays in meshed networks using genetic algorithm. *IEEE Latin America Trans.*, 13:2975–2982.

Meira, R. N., Pereira, R. L. A. e Brito, N. S. D. (2023). A new method for optimal coordination of overcurrent and distance relays. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 34:858–871.

Rajput, V. N. e Pandya, K. S. (2016). On 8-bus test system for solving challenges in relay coordination. In *6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. p. 1–5. New Delhi. IEEE.

Sadeh, J., Amintojjar, V. e Bashir, M. (2011) Coordination of overcurrent and distance relays using hybrid particle swarm optimization. In *IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, IEEE. Beijing.

Sheppard, C. (2016). *Genetic Algorithms with Python*. CreateSpace, California.

Date of publication xxxx 00, 0000, date of current version xxxx 00, 0000.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2024.Doi Number

A novel fuzzy-logic-based genetic algorithm for optimal coordination of protective relays in electric power transmission systems

ANDRE DO AMARAL PENTEADO BISCARO¹, (Senior Member, IEEE), AND JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI², (Member, IEEE)

¹Faculty of Exact and Technological Sciences, Mato Grosso State University, Sinop 78555, Brazil

²Department of Electrical Engineering, Sao Paulo State University, Ilha Solteira 13385, Brazil

Corresponding author: Andre A. P. Biscaro (andre.biscaro@unemat.br).

ABSTRACT The Coordination of distance and overcurrent relays in transmission lines is a challenging task that requires a balance between efficient protection and adequate selectivity. It consists of determining the sequence of protection relay operations for each possible fault location such that the faulty section is isolated safely and without excessive delays. In this study, a novel fuzzy-logic-based genetic algorithm is proposed for the problem solution, that considers the coordination of protective relays in electric power transmission lines. The fitness function evaluates the performance of relay settings by considering the average operating times, coordination time interval violations, and the total number of violations. The constraints ensure that the relay settings are within acceptable ranges and maintain proper coordination. The optimization process finds the best values for the adjustment current, time multiplier setting, type of relay, actuation time of the second zone of distance relays and operating time of reverse zone. An 8-bus test system was used to demonstrate the efficiency and flexibility of the proposed method.

INDEX TERMS Protective relaying, genetic algorithm, transmission lines, power system protection

NOMENCLATURE

ABBREVIATIONS

DR	Distance relay
DOCR	Directional overcurrent relay
CTI	Coordination time interval
Z1	Protection Zone 1
Z2	Protection Zone 2
RZ	Reverse Zone
GA	Genetic algorithm
FF	Fitness function
FL	Fuzzy logic
FS	Fuzzy system
Fuzzy-GA	Fuzzy-logic-based genetic algorithm

VARIABLES AND CONSTANTS

G_{max}	Maximum number of generations
FG_{max}	Maximum number of fuzzy generations
nr	Number of relays
np	Number of relay pairs

Δt_p	Coordination time between the main relay and the backup relay of pair p ;
$I_{N,r}$	Nominal current sensed by relay r ;
$I_{CC,r}$	Short-circuit current sensed by relay r ;
$I_{aj,r}$	Setting current of relay r ;
TMS_r	Time setting multiplier factor of relay r ;
$T_{r,Z2}$	Operating time of relay r acting in zone 2
$T_{r,RZ}$	Operating time of relay r acting in reversal zone
$Type_r$	Type of relay r
Top_p^{BACK}	Operating time of the backup relay of pair p ;
Top_p^{MAIN}	Operating time of the main relay of pair p ;
CTI_p^{MAIN}	Minimum coordination time interval between the main relay and the backup relay;
ΔT_p	The time difference between the backup and main relay operating times for pair p ;
$\Delta T_{p,Z2}$	The time difference between the backup relay and the second zone of main relay for pair p ;
$\Delta T_{p,RZ}$	The time difference between the backup relay and the reverse zone of the main relay for pair p ;
$h(\Delta T_p)$	function that returns 1 if $\Delta T_p < 0$ and 0 otherwise;

I. INTRODUCTION

The protection of electric power transmission systems is a complex and essential task to ensure the reliability and safety of power supply. Protection relays, such as distance relays (DR) and directional overcurrent relays (DOCR) play a crucial role in detecting and isolating faults, minimizing the impact of interruptions in the electrical system. Proper coordination of these relays is fundamental to ensure that the faulty section is isolated efficiently and selectively, avoiding unnecessary trips and ensuring continuity of service [1].

While traditional methods, such as trial-and-error and linear programming, have been used historically to solve the coordination and selectivity of transmission systems, they often struggle with large and complex networks. Modern heuristic techniques, including neural networks and fuzzy logic, have been discussed for their ability to improve relay coordination accuracy and efficiency. These methods are particularly useful for handling the complexity and non-linearity of the coordination problem [2].

In [3], a comprehensive review of optimization techniques for coordinating DOCRs in power systems is provided. It covers conventional and deterministic methods, metaheuristic algorithms [4], and hybrid approaches. The paper discusses objective functions, constraints, and the development of optimization methods for solving relay coordination problems. The findings highlight advancements in optimization techniques for relay coordination, emphasizing their potential to solve complex problems more efficiently than traditional methods.

In recent years, the application of genetic algorithms (GAs) has proven to be a promising approach for solving complex optimization problems, including the coordination of protection relays. The processes of natural selection and biological evolution have inspired GAs, providing a robust and flexible methodology to find optimal solutions in large and nonlinear search spaces. Recent studies have shown that GAs can significantly improve the efficiency and selectivity of protection systems, reducing relay operation times and ensuring a faster and more accurate response to faults [5].

In addition to genetic algorithms, researchers have successfully applied Fuzzy Logic (FL) to the coordination of protection relays. FL allows dealing with the uncertainty and imprecision of data inherent in electrical systems, providing an adaptive approach to adjusting relay parameters in real-time. By using linguistic variables and Fuzzy inference rules, it is possible to dynamically adjust the setting current (I_{aj}) and operation times of the relays, improving the coordination and selectivity of the protection system. This approach is particularly useful in systems with variable operating conditions, such as the presence of distributed generation and changes in network topology.

Recently, numerous optimization algorithms have been developed for the optimal coordination of overcurrent relays, including the Genetic Algorithm (GA) [6]-[8], Particle Swarm Optimization (PSO) [9]-[11], Differential Evolution (DE) [12], Harmony Search (HS) [13], Seeker Optimization Algorithm (SOA) [14], Artificial Bee Colony (ABC) [15], Firefly Algorithm (FA) [16]-[18], Ant Colony Optimization (ACO) [19], Cuckoo Search Algorithm [20], simulated annealing (SA) algorithm [21], and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) [22].

In [23], various metaheuristic-based methodologies for solving the coordination problem of DOCRs in power systems were reviewed. It aims to provide a comprehensive overview of the different techniques and their effectiveness in achieving optimal relay settings. This study highlights the effectiveness of various metaheuristic algorithms including PSO, GA, DE, HS, and SOA. Specific algorithms such as Honeybee, Firefly, and Cuckoo Search are highlighted for their effectiveness in solving complex coordination problems.

In [24], a new OF for the coordination of DOCR is introduced. This new OF addresses the drawbacks of previous methods, such as high relay operating times and miscoordination issues. The findings highlight the effectiveness of the fuzzy-logic-based GA method in solving the coordination problems of OC relays in interconnected networks. The dynamic adjustment of weighting factors and the inclusion of characteristic curve coefficients as variables contribute to the method's success in reducing relay operating times and minimizing miscoordinations.

In [25], a new operating characteristic (OPC) for distance relays was proposed to reduce the overall operating time of the protection system. The new OPC divides the second zone of the distance relays into two sections, each with different delay times. The first section protects the main line beyond the first zone with a delay time T_{Z2n1} . The second Section protects 50% of the adjacent line with delay time T_{Z2n2} . A new formulation for the coordination of DRs and DOCRs is presented based on this OPC. The proposed method is tested on three IEEE test systems: the 8-bus, 14-bus, and 30-bus systems. This new OPC significantly reduces the operating times of both primary and backup protections, leading to faster and more selective protection.

In [26], a new method for the optimal coordination of overcurrent and distance relays in electrical power systems using GA is presented. The method introduces a new decision variable called reverse zone time (T_{RZ}) for the distance relay, applied as a backup in the conventional distance function. The inclusion of T_{RZ} enhances the protection scheme by providing additional security and reliability. The proposed method was tested on an 8-bus electrical system, demonstrating its efficiency in reducing the operating times of the relays.

In this work a generic mathematical model to solve efficiently the coordination problem of transmission systems using a hybrid methodology that comprises a GA dedicated and logic fuzzy is proposed. A new fitness function (FF) for the coordination of distance and directional overcurrent relays is proposed to optimize the relay setting parameters. Simulations in an 8-bus system validate the proposal, demonstrating its effectiveness and flexibility. The results obtained indicate that the proposed methodology can significantly improve relay coordination, reducing operation times and ensuring the necessary selectivity for the protection of the transmission system. Based on extensive literature research and the authors' expertise, the main contributions of this study are:

- Addressing the simultaneous selectivity and coordination of directional overcurrent relays and distance relays, considering overcurrent relays as backup protection for distance relays.
- Proposing a genetic algorithm combined with fuzzy logic to solve the problem, accounting for topological and operational uncertainties in electric power transmission systems.
- Developing a comprehensive set of fuzzy rules to guide genetic algorithm operators in both generic and realistic operating scenarios of the protection system.

The rest of this paper is organized as follows. In section II, a generic mathematical model is proposed for the coordination problem of distance and overcurrent relays in transmission systems. The solution framework is presented in section III. In section IV, assumptions, technical and economic data, case studies, numerical results and discussions are presented. Concluding remarks are presented in section V. Appendix A presents the Fuzzy inference rules developed to solve the problem.

II. COORDINATION PROBLEM AND OPTIMIZATION

Coordination of protective relays in transmission networks is essential to ensure the safety and reliability of the power system. Distance relays (DR) and directional overcurrent relays (DOCR) are widely used to detect and isolate faults. Proper coordination of these relays is crucial to avoid unnecessary tripping and to ensure that the faulted section is isolated efficiently and selectively. The main challenges in relay coordination in transmission networks include variability of operating conditions and system complexity. Transmission networks are complex and interconnected, requiring precise coordination between different types of relays. Uncertainty in system parameters and operating conditions makes relay coordination difficult. In addition, load and fault conditions can vary significantly, affecting relay coordination.

A. COORDINATION PROBLEM FORMULATION

The goal of optimized relay coordination is to achieve a sequence of settings that minimize operating times while adhering to selectivity constraints. In the combined coordination of distance and directional overcurrent relays,

the operating times of the second zone of the distance relays (T_{z2}) are typically adjusted to meet selectivity requirements. For the directional overcurrent relay (DOCR) coordination problem, the objective is to determine the time setting multiplier (TMS) and the setting current (I_{aj}) for each relay, ensuring that the total operating time is minimized.

Optimal coordination requires these parameters to satisfy all constraints within the shortest possible operating time. Besides TMS and I_{aj} , the optimization method, fitness function, network type, and nonlinear characteristics of each relay type are crucial factors that must be considered for effective coordination. After specifying the distance relay (DR) zone settings, the coordination task is performed based on faults occurring at critical points of system.

This study considers three coordination types for analysis, adopting the following notation: 1) DOCR/DOCR to represent coordination between directional overcurrent relays; 2) DR/DOCR to represent coordination between distance and directional overcurrent relays; 3) DOCR/DR to represent coordination between directional overcurrent and distance relays. Fig. 1 illustrates four critical points for analyzing the short-circuit currents used to coordinate the protection relays. Faults were simulated along the line at 0%, 20%, 80% and 100%, respectively.

Protection Zone 1 (Z1) of distance relays has instantaneous actuation (20 ms) and is adjusted to cover 80% of the protected line length. Protection Zone 2 (Z2) is set to cover 100% of the protected line plus 20% of the adjacent line and must act with a time delay between 300 and 600 ms. Distance relays operating in reverse zone (RZ) must also act with a time delay between 700 ms and 1.4 s.

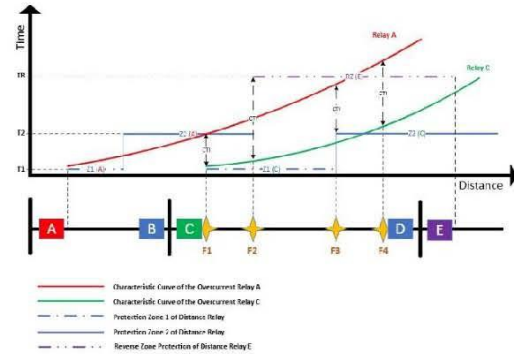


FIGURE 1. Coordination for DRs and DOCRs

1) DOCR/DOCR COORDINATION

The DOCR(A) on Bus 1 must provide backup protection (BACK) for the DOCR(C) on Bus 2 (MAIN). Equation (1) represents the constraint for the DOCR/DOCR coordination problem when faults occur at point F1 (fault close into C).

$$Top_A^{BACK}(F1) - Top_C^{MAIN}(F1) \geq CTI \quad (1)$$

Top_A^{BACK} and Top_C^{MAIN} are the operating times of the backup and main DOCRs, respectively, at critical point F1. CTI is the minimum coordination time interval between the main relay (DOCR) and the backup relay (DOCR).

2) DR/DOCR COORDINATION

The DOCR(A) on Bus 1 must provide backup protection for the DR(C) on Bus 2. Thus, when faults occur at point F3 (end of the second protection zone of distance relay A), the constraint to be met is (2).

$$Top_A^{BACK}(F3) - T_{C,Z2}^{MAIN}(F3) \geq CTI \quad (2)$$

Top_A^{RET} is the backup DOCR operating time, $T_{Z2,C}^{PRI}$ is the DR zone 2 time at critical point F3. CTI is the coordination time interval between the main relay (DR) and the backup relay (DOCR).

3) DOCR/DR COORDINATION

DR(E) on bus 3 must provide backup protection for DOCR(C) on bus 2. Thus, when faults occur at point F2 (which is the end of the second zone of DOCR(A) and beginning of reverse zone 2 of DR(E)), the constraint to be met is (3):

$$T_{E,RZ}^{BACK}(F2) - Top_C^{MAIN}(F2) \geq CTI \quad (3)$$

Top_C^{MAIN} is the operating time of the main DOCR. $T_{Z2,E}^{BACK}$ is the operating time of the reverse zone backup DR at critical point F2. CTI is the coordination time interval between the main (DR) and backup (DOCR) relays.

4) NEW FITNESS FUNCTION

The fitness function (4) is designed to minimize the operating times of relays while satisfying the constraints. The fitness function is composed of several terms, each weighted by a coefficient (α). The terms represent different aspects of relay coordination. The problem can be formulated generically as

$$\begin{aligned} FF = & \alpha_1 * \frac{\sum_{r=1}^{nr} Top_r}{nr} + \alpha_2 * \frac{\sum_{p=1}^{np} (|\Delta T_p| - \Delta T_p)}{\max(1, \sum_{p=1}^{np} h(\Delta T_p))} \\ & + \alpha_3 * \frac{\sum_{p=1}^{np} (|\Delta T_{p,Z2}| - \Delta T_{p,Z2})}{\max(1, \sum_{p=1}^{np} h(\Delta T_{p,Z2}))} \\ & + \alpha_4 * \frac{\sum_{p=1}^{np} (|\Delta T_{p,RZ}| - \Delta T_{p,RZ})}{\max(1, \sum_{p=1}^{np} h(\Delta T_{p,RZ}))} + \alpha_5 * \frac{\sum_{p=1}^{np} h(\Delta T_p)}{np} \\ & + \alpha_6 * \frac{\sum_{p=1}^{np} h(\Delta T_{p,Z2})}{np} + \alpha_7 * \frac{\sum_{p=1}^{np} h(\Delta T_{p,RZ})}{np} \end{aligned} \quad (4)$$

Subject to:

$$Top_r = \frac{m * TSM_r}{\left(\left(\frac{I_{CCR}}{I_{aj,r}}\right)^n - 1\right)} \quad r = 1, \dots, nr \quad (5)$$

$$\Delta T_p = Top_p^{BACK} - Top_p^{MAIN} - CTI_p^{MAIN} \quad (6)$$

$$\Delta T_{p,Z2} = Top_p^{BACK} - Top_p^{MAIN} - CTI_p^{MAIN} \quad (7)$$

$$\Delta T_{p,RZ} = Top_p^{BACK} - Top_p^{MAIN} - CTI_p^{MAIN} \quad (8)$$

$$h(\Delta T_p) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta T_p < 0 \\ 0 & \text{if } \Delta T_p \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$1 \leq r \leq nr \quad (10)$$

$$1 \leq p \leq np \quad (11)$$

$$I_{aj,r}^{min} \leq I_{aj,r} \leq I_{aj,r}^{max} \quad (12)$$

$$TSM_r^{min} \leq TSM_r \leq TSM_r^{max} \quad (13)$$

$$T_{r,Z2}^{min} \leq T_{r,Z2} \leq T_{r,Z2}^{max} \quad (14)$$

$$T_{r,RZ}^{min} \leq T_{r,RZ} \leq T_{r,RZ}^{max} \quad (15)$$

$$1 \leq Type_r \leq 4 \quad (16)$$

Equation (5) calculates the operating time of relay r based on the time setting multiplier (TSM), short-circuit current I_{CCR} , and adjustment current $I_{aj,r}$. Equation (6) calculates the time difference for relay pair p between backup and main relay operating times, adjusted by the coordination time interval (CTI). Equations (7) and (8) are like (6), but for the second zone and reverse zone, respectively. The function $h(\Delta T_p)$ in (9) is an indicator function that is 1 if the time difference is negative ($\Delta T_p < 0$) (indicating a violation of coordination constraints) and 0 otherwise.

The IEC 60255 standard specifies several types of relay time-current characteristic curves, which are essential for defining the operating behavior of protection relays. These curves help ensure that relays operate correctly and coordinate with other protection devices in the system.

The constraints ensure that the solutions generated by GA are feasible. They define the allowable ranges for relay settings (e.g., TSM_r , $I_{aj,r}$, $T_{r,Z2}$, $T_{r,RZ}$) and ensure that the coordination between relays is maintained. GA must respect these constraints when generating and evaluating new solutions.

B. POWER NETWORK TOPOLOGY IDENTIFICATION

Considering the different protection zones and relay actuation, the relay pairs that will act as main (M) or backup (B) protection must be defined. This is crucial for setting coordination constraints and ensuring that backup relays operate correctly if the primary relay fails.

The directional overcurrent relays (DOCR) and distance relays (DR) installed at each end of the lines simultaneously perform the main and backup protection functions. [29] uses a heuristic rule base to find the M/B relay pairs by creating relational matrices.

However, there is a simpler, faster and more effective way to identify the M/B pairs, defined in one of the rules presented below:

1) In Fig. 2, relay R2, installed at Bus 1, is the main protection for line L2. The backup protection devices of relay R2 will be all those relays installed on the opposite bars of the lines that start from Bus 1, except the relay related to line L2 itself, that is, R1 and R7.

2) Considering Fig. 2, relay R1 installed on Bus 2 will be the backup protection of all relays installed on Bus 1, except the relay that protects line L1 itself, that is, R1 is the backup protection of R2 and R14.

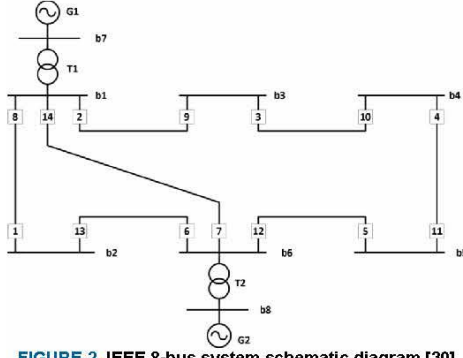


FIGURE 2. IEEE 8-bus system schematic diagram [30]

All M/B protection pairs presented in Table I were obtained from the transmission system presented in [30] using the first form of identification.

TABLE I
Relay Pairs Identification

Pair	Main (M)	Backup (B)	Pair	Main (M)	Backup (B)
1	R1	R6	11	R8	R7
2	R2	R1	12	R8	R9
3	R2	R7	13	R9	R10
4	R3	R2	14	R10	R11
5	R4	R3	15	R11	R12
6	R5	R4	16	R12	R13
7	R6	R5	17	R12	R14
8	R6	R14	18	R13	R8
9	R7	R5	19	R14	R1
10	R7	R13	20	R14	R9

C. POWER FLOW AND FAULT ANALYSIS

The ATP (Alternative Transients Program) software was utilized to simulate power flow and fault analysis for determining the short-circuit currents ($I_{cc,r}$). ATPDraw was employed to create a graphical model of the power system, which involved defining buses, transmission lines, transformers, generators, loads, and other components. Additionally, the electrical parameters for each component, such as impedances, voltage levels, and load characteristics, were input into the model.

A database containing the maximum and minimum values of the short-circuit currents of the main and backup relays was created, containing the fault simulations in all lines of transmission system.

III. OPTIMIZATION PROBLEM SOLUTION

Genetic algorithms (GAs) offer several advantages when solving optimization problems since they can explore a large solution space and are less likely to get trapped in local optima compared to traditional methods. They can handle complex, non-linear, and multi-modal optimization problems, making them suitable for diverse applications.

When applied to the optimal coordination of protective relays, GAs help in optimizing the settings of relays to ensure efficient and reliable protection. They can manage

varying fault levels and bi-directional power, improving the resilience and reliability of protection scheme.

A. DEDICATED GENETIC ALGORITHM

The Genetic Algorithm is an evolutionary solution technique widely used in complex optimization problems. GA is based on the mechanisms of natural selection and genetics [27].

1) INITIALIZATION – INITIAL POPULATION

The initial population is generated in a controlled random manner, so as not to violate the restrictions presented in equations (12) to (16). An initial population of 200 individuals is set in this study. Fig. 3 illustrates the structure of the chromosome used.

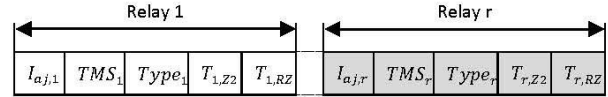


FIGURE 3. Coding of individuals

2) CROSSOVER

Crossover entails the exchange of genetic information between two selected individuals to create new individuals for the next generation. Overall, single-point crossover is a fundamental and effective method for genetic recombination, contributing to the robustness and adaptability of GAs. In this study, a crossover rate of 90% is utilized.

3) MUTATION

The mutation process in GAs introduces random changes to the genes of individuals within a population. This process is crucial for maintaining genetic diversity and preventing premature convergence to suboptimal solutions. During the mutation process, low-probability random changes are introduced to the genes of individuals, fostering diversification within the population and enhancing the likelihood of escaping local optima.

The mutation process is governed by the mutation rate, which typically assumes very small values, ranging from 1% to 5%. The mutation rate determines the probability of mutation occurring in each gene. In this study, a mutation rate of 3% is employed.

4) SELECTION - ELITISM

The selection process in GAs uses the fitness function to choose individuals for reproduction. Individuals with higher fitness scores (better relay coordination) are more likely to be selected. A portion of the best individuals in each new generation is preserved adopting an elitism rate. This rate ensures that a certain percentage of the top-performing individuals are retained without any modifications. In this study, an elitism rate of 20% was utilized.

5) FITNESS FUNCTIONS EVALUATION

Fitness function is designed to evaluate the quality of a solution in the context of optimal coordination of protective relays. It is composed of several terms, each weighted by a coefficient α_i . The goal is to minimize the fitness function, which represents the overall "cost" or "penalty" of a solution. FF (17), like (4), aims to optimize relay coordination by minimizing operating times and ensuring selectivity constraints are met. The constraints ensure that relay settings are within acceptable ranges and that coordination between relays is maintained.

$$FF = \alpha_1 * OF_1 + \alpha_2 * OF_2 + \alpha_3 * OF_3 + \alpha_4 * OF_4 + \alpha_5 * OF_5 + \alpha_6 * OF_6 + \alpha_7 * OF_7 \quad (17)$$

OF_1 represents the average operating time of the relays. Minimizing this term ensures that the relays operate quickly. OF_2 penalizes violations of the coordination time interval (CTI) between primary and backup relays. OF_3 and OF_4 are like OF_2 , but for Zone 2 and Reversal Zone coordination, respectively. OF_5 counts the total number of CTI violations and normalizes it by the number of pairs np . OF_6 and OF_7 are like OF_5 , but for Zone 2 and Reversal Zone coordination, respectively.

The α_i coefficients in the fitness function play a crucial role in balancing the different objectives and constraints of the optimization problem. FF is composed of multiple terms, each representing a different aspect of relay coordination problem. The α_i coefficients are weights assigned to these terms to control their relative importance. By adjusting these coefficients, we can prioritize certain objectives over others:

- α_1 controls the importance of minimizing the average operating time of the relays. A higher α_1 value places more emphasis on reducing the relay operating times.
- α_2 penalizes violations of the CTI between primary and backup relays. A higher α_2 value increases the penalty for CTI violations, ensuring better coordination between relays.
- α_3 penalizes violations in Zone 2 coordination. A higher α_3 value places more emphasis on maintaining proper coordination in Zone 2.
- α_4 penalizes violations in remote zone coordination. A higher α_4 value ensures that reversal zone coordination is given more importance.
- α_5 controls the penalty for the total number of CTI violations. A higher α_5 value increases the penalty for each CTI violation, encouraging solutions with fewer violations.
- α_6 penalizes the total number of Zone 2 violations. A higher α_6 value ensures fewer Zone 2 violations.
- α_7 controls the penalty for the total number of remote zone violations. A higher α_7 value places more emphasis on reducing reversal zone violations.

By adjusting the α_i coefficients, we can fine-tune the fitness function to reflect the specific priorities and

constraints of optimization problem. Fuzzy logic concepts presented in subsection 2 are used to make these adjustments.

6) STOPPING CRITERIA

The stopping criteria ensure that the GA terminates in a reasonable amount of time and provides a satisfactory solution. The stopping criteria are the maximum number of generations (G_{max}) and the maximum number of fuzzy generations (FG_{max}). These criteria help balance the exploration of solution space and computational efficiency of algorithms.

B. FUZZY LOGIC

Fuzzy Systems have demonstrated their value as a crucial tool for modeling complex systems, particularly in scenarios where traditional methods fail due to complexity or imprecision [28]. Fuzzy logic can be integrated with GAs to create hybrid systems that combine the advantages of both techniques, been applied to create a more adaptive fitness function that handles multiple criteria and uncertainties. This allows for a more accurate and robust evaluation of individuals.

Creating an effective fuzzy rule set can be complex and time-consuming. Expert knowledge is required to define rules that adequately capture the behavior of the system. Membership functions need to be carefully designed to correctly represent linguistic variables. Fig. 4 presents the membership function utilized in this study.

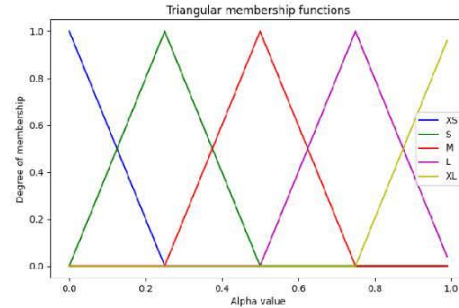


FIGURE 4. Membership function for the alpha values

1) SELF-ADAPTIVE FUZZY RULES

Determining the optimal α_i values using fuzzy logic involves creating a fuzzy inference system (FIS) that can adjust these coefficients based on the specific requirements and constraints of the optimization problem.

Table II (APPENDIX A) presents the fuzzy rules and corresponding parameters for coordination of relays. The parameters OF_1 to OF_7 and α_1 to α_1 are specified for each rule. They are designed to overcome the constraints and reflect the specific priorities of optimization problem.

OF_1 to OF_7 represent different objective functions used in the optimization process. Each objective function evaluates a specific aspect of the relay coordination performance.

α_1 to α_7 are weighting factors assigned to each objective function. They determine the relative importance of each objective function in the overall fitness function.

The fitness function (17) combines multiple objective functions (OF_1 to OF_7) weighted by their respective α_i values to evaluate the overall performance of the relay coordination. The parameters and constraints ensure that the optimization process finds the best settings for relay coordination, maintaining system stability and minimizing operating times.

2) FLOWCHART OF THE ENHANCED FUZZY-LOGIC-BASED GENETIC ALGORITHM

Fig. 5 outlines the proposed genetic algorithm process with fuzzy logic integration. It starts by generating an initial population and setting α coefficients, then iteratively calculates fitness, performs selection, crossover, and mutation, and applies fuzzy rules to update α coefficients. The process continues until the maximum number of generations is reached.

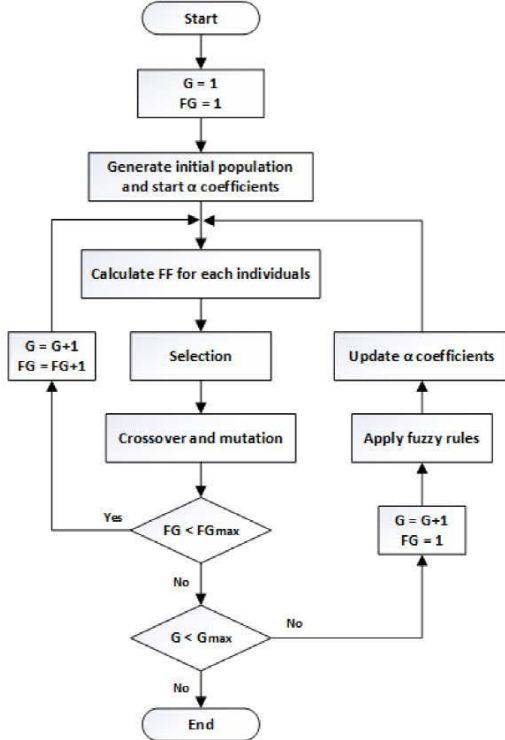


FIGURE 5. Flowchart of proposed FUZZY-GA

The condition $G < G_{max}$ checks if the current generation count (G) has reached the maximum allowed generations (G_{max}). If G is less than G_{max} , the algorithm continues; otherwise, it stops. The condition $FG < FG_{max}$ checks if the current fuzzy generation count (FG) has reached the maximum allowed fuzzy generations (FG_{max}). If FG is less than FG_{max} , the algorithm continues; otherwise, it stops.

IV. TEST SYSTEM AND RESULTS

The proposed method is applied to the IEEE 8-bus test system which comprises two 150 MVA generators, seven transmission lines, and 28 relays (14 directional relays and 14 directional overcurrent relays), as depicted in Fig. 6. System data, such as active and reactive power loads, as well as the resistance and reactance of transmission lines, transformers, and generators were sourced from [30].

Simulations were conducted on a computer equipped with an Intel® i7 processor running at 3.2 GHz and 16 GB of RAM. To analyze the system's performance and determine its load and short-circuit conditions, ATP® software was employed, while the fuzzy-logic-based genetic algorithm (Fuzzy-GA) was implemented using the Python programming language. The short-circuit simulations generated by ATP® served as input data for the GA.

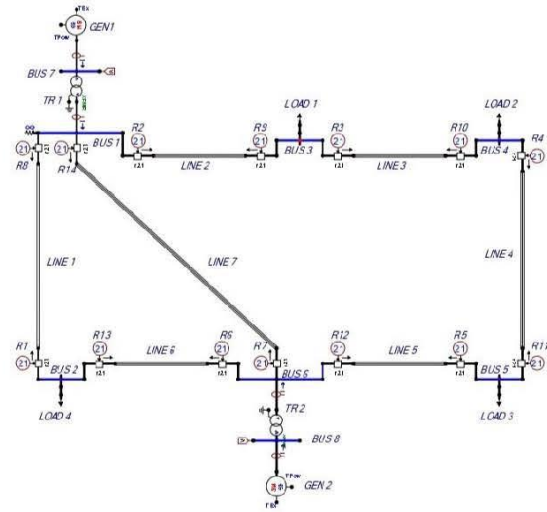


FIGURE 6. IEEE 8-bus system modeled in ATPDraw

A. FUZZY-LOGIC-BASED GA PARAMETRIZATION

The optimal coordination of protective relays is solved using the proposed Fuzzy-GA. The population size is assumed to be 200 individuals, and the number of generations is 500. In every 50 iterations (FG_{max}), the fuzzy-GA applies fuzzy rules and recalculates the values of the α_i coefficients. Table III presents the parametrization values for the fuzzy-logic-based GA proposed.

TABLE III
FUZZY-LOGIC-BASED GA PARAMETERIZATION

G_{max}	500	FG_{max}	50
Population	200	Elitism	20%
Crossover	90%	Mutation	3%
TMS_r^{min}	0.05	TMS_r^{max}	1
$T_{r,Z2}^{min}$	0.3 s	$T_{r,Z2}^{max}$	0.6 s
$T_{r,RZ2}^{min}$	0.7 s	$T_{r,RZ2}^{max}$	1.4 s
CTI	0.3	$I_{bl,r}^{max}$	$1.5 * I_{Nr}$

The weighting factors (α_1 to α_7) determine the relative importance of each objective function (OF_1 to OF_7) in the overall fitness function (17). Table IV presents the coefficients proposed by FUZZY-GA algorithm.

Weighting Factor	Value
α_1	0.25
α_2	0.75
α_3	0.75
α_4	0.20
α_5	0.70
α_6	0.60
α_7	0.50

Table V presents the parameters generated by fuzzy-logic-based GA for the coordination of DRs and DOCRs. The setting current values ($I_{a,i}$) adhere to the limits imposed by the constraint in (12), accurately representing the network's load characteristics. The time multiplier settings (TMS) are small and comply with the adjustment range established by (13), between 0.05 and 1, indicating fast relay actuation. The GA predominantly selected relay types 1 and 2, corresponding to extremely inverse and very inverse types, respectively.

Relay (i)	$I_{a,i}(A)$	TMS	Type	$T_{i,Z2}(s)$	$T_{i,RZ}(s)$
1	401.685	0.459	1	0.367	0.734
2	1,701.540	0.133	1	0.353	1.065
3	840.841	0.175	1	0.349	1.368
4	377.979	0.319	1	0.325	1.077
5	1,126.886	0.053	2	0.305	1.327
6	996.916	0.264	1	0.376	0.846
7	805.509	0.321	1	0.351	1.111
8	2287.397	0.131	1	0.345	1.144
9	1,013.964	0.052	1	0.312	1.145
10	832.427	0.078	1	0.360	0.999
11	768.032	0.255	1	0.445	1.090
12	1,424.133	0.257	1	0.338	0.808
13	1,246.438	0.097	1	0.334	0.772
14	1,406.119	0.098	1	0.311	1.349
FF	0.027	$\sum Top_r$		1.512	

$T_{i,Z2}$ represents the difference in operating time between the times of the second zone of the main DR ($T_{r,Z2}^{MAIN}$) and the operating times of the backup DOCR (Top_r^{BACK}). $T_{i,RZ}$ represents the difference in actuation time between the operating times of the reverse zone backup DR ($T_{r,RZ}^{BACK}$) and the operating times of the main DOCR (Top_r^{MAIN}). All values are positive, indicating correct coordination of the pairs (M/B) and the absence of violations in the coordination restrictions for these relay pairs.

B. PROTECTION DEVICES COORDINATION

The fuzzy-GA was performed several times aiming to properly coordinate the protection devices. Fig. 7 illustrates the convergence of fitness function (FF), OF_1 , OF_2 , and OF_3 for the proposed fuzzy-based GA.

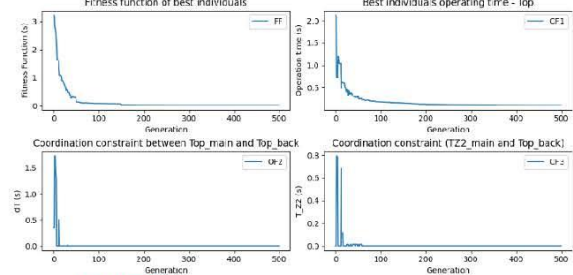


FIGURE 7. Convergence of the proposed Fuzzy-GA

The computational implementation of algorithm quickly converges to an optimized value within a few iterations, demonstrating its efficiency in solving complex optimization problems. The relay operating time is also optimized, as demonstrated in OF_1 , ensuring faster response times in protective relay systems. Additionally, the coordination constraints (OF_2 and OF_3) are respected and maintained at their minimum values, which is crucial for preventing miscoordination and ensuring the reliability and safety of the power system.

Fig. 8 illustrates the convergence of the objective functions OF_4 , OF_5 , OF_6 , and OF_7 , respectively.

Coordination constraints between Top_p^{MAIN} and Top_p^{BACK} are quickly respected (OF_4), ensuring reliable operation of the relay system. This is similar to the coordination constraints between relays operating in three different zones: the Main protection Zone (OF_5), Zone 2 (OF_6), and the Reverse Zone (OF_7). These constraints are crucial for maintaining system stability and preventing miscoordination.

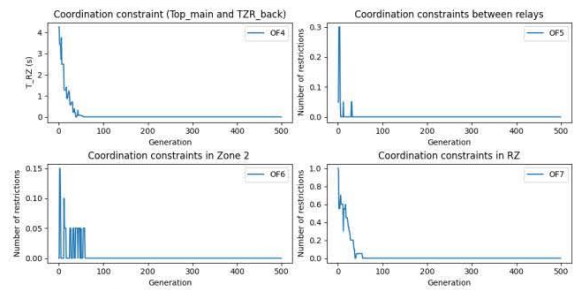


FIGURE 8. Convergence of the objective functions (17)

Fig. 9 illustrates the coordinating curves of the directional overcurrent relays from the hole system. The time difference between the backup relay and the reverse zone of the main relay for all pairs ($\Delta T_{p,RZ}$) are respected.

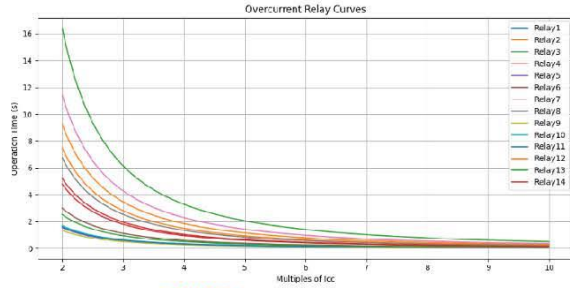


FIGURE 9. DOCR coordination.

V. CONCLUSION

In this paper a novel method based on genetic algorithms has been proposed to perform optimal coordination of protective relays in electric power transmission systems. The proposed method introduces a new fitness function that determines the optimal values of $I_{aj,r}$, TMS_r , $Type_r$, $T_{r,z2}$ and $T_{r,RZ}$ for each relay using a Fuzzy-GA optimization technique. To demonstrate the effectiveness of the proposed method, it was tested on the IEEE 8-bus test system. Regarding the values obtained for the combined coordination of distance and directional overcurrent relays, the operating times for the second zone of the distance relays ($T_{i,z2}$) meet the selectivity constraints outlined in (14). Similarly, the values for $T_{i,RZ}$ satisfy the selectivity constraints specified in (15).

The proposed FF significantly minimizes the operating time of the main relays while maintaining the coordination time between M/B relay pairs. Additionally, the fuzzy-logic-based GA successfully achieved optimized coordination times for the sample network with fewer populations and iterations, making this algorithm faster.

REFERENCES

- [1] P. M. Anderson, *Power System Protection*. New York: Wiley-IEEE Press, 2022, ISBN: 978-1119513148.
- [2] F. Glover, and G. A. Kochenberger, *Handbook of metaheuristics*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2003, ISBN: 1-4020-7263-5.
- [3] T. Foqha, S. Alsad, O. Omari, and S. S. Refaat, "Optimization techniques for directional overcurrent relay coordination: a comprehensive review", *IEEE Access*, v. 12, pp. 1952-2006, 2024, 10.1109/ACCESS.2023.3347393.
- [4] S. Ralhan, R. Goswami, and S. Ray, "Comparative study of optimal overcurrent relay coordination using metaheuristic techniques", *Computational Intelligence in Data Mining*, pp. 333-344, 2018, 10.1007/978-981-10-8055-5_30.
- [5] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. New York: Addison-Wesley, 1989, ISBN: 978-0201157673.
- [6] A. S. Noghabi, J. Sadeh, and H. R. Mashhadi, "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 1857-1863, 2009, 10.1109/TPWRD.2009.2029057.
- [7] F. Razavi, H. A. Abyaneh, M. Al-dabbagh, R. Mohammadi, and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination", *Electric Power System Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 713-720, 2008, 10.1016/j.epr.2007.05.013.
- [8] T. Foqha, M. Khammash, S. Alsadi, O. Omari S. S. Refaat, K. Al-Qawasm, and A. Elrashidi, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Hybrid Firefly-Genetic Algorithm", *Energies*, vol. 16, no. 14, pp. 1-28, 2023, 10.3390/en16145328.
- [9] J. Sadeh, V. Amintojjar, and M. Bashir, "Coordination of overcurrent and distance relays using hybrid particle swarm optimization", *2011 Int. Conf. on Advanced Power System Automation and Protection*, vol. 36, no. 3, pp. 1130-1134, 2011, 10.1109/APAP.2011.6180975.
- [10] A. Rathinam, D. Sattianadan, and K. Vijayakumar, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using particle swarm optimization technique", *International Journal of Computer Applications*, vol. 10, no. 2, pp. 43-47, 2010, 10.5120/1451-1762.
- [11] S. P. Ramli, H. Mokhils, W. R. Wong, M. A. Muhammad, N. N. Mansor, and M. H. Hussain, "Optimal coordination of directional overcurrent relay based on combination of improved particle swarm optimization and linear programming considering multiple characteristics curve", *Turk. Jour. of Electrical Eng. And Computer Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 1765-1780, 2021, 10.3906/elk-2008-23.
- [12] R. Thangaraj, M. Pant, and K. Deep, "Optimal coordination of overcurrent relays using modified differential evolution algorithms", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 23, no. 5, pp. 820-829, 2010, 10.1016/j.engappai.2010.01.024.
- [13] M. Barzegari, S. M. T. Bathaee, and M. Alizadeh, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using harmony search algorithm", in *IEEE 9th Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering*, Prague, Czech Republic, 2010, pp. 321-324.
- [14] T. Amraee, "Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1415-1422, 2012, 10.1109/TPWRD.2012.2190107.
- [15] V. Rashtchi, J. Gholinezhad, and P. Farhang, "Optimal coordination of overcurrent relays using honeybee algorithm", in *IEEE International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems*, Moscow, Russia, pp. 401-405, 2010.
- [16] A. Tjahjono, D. O. Anggriawan, A. K. Faizin, A. Priyadi, M. Pujiantara, T. Taufik, and M. H. Purnomo, "Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2575-2585, 2017, 10.1049/iet-gtd.2016.1563.
- [17] T. Khurshaid, A. Wadood, S. Gholami Farkoush, C. Kim, J. Yu, and S. Rhee, "Improved firefly algorithm for the optimal coordination of directional overcurrent relays", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78503-78514, 2019, 10.1109/ACCESS.2019.2922426.
- [18] S. P. Ramli, H. Mokhils, W. R. Wong, M. A. Muhammad, and N. N. Mansor, "Optimal coordination of directional overcurrent relay based on combination of Firefly Algorithm and Linear Programming", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, 2022, pp. 1-16, 10.1016/j.asej.2022.101777.
- [19] M. Shih, C. C. Salazar, and A. C. Enriquez, "Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimization", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 9, pp. 2040-2049, 2015, 10.1049/iet-gtd.2015.0394.
- [20] G. Darji, M. Patel, V. Rajput, and K. Pandya, "A tuned cuckoo search algorithm for optimal coordination of directional overcurrent relays", in *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*, Bengaluru, India, 2015, pp. 162-167.
- [21] A. A. Kida, A. E. L. Rivas, and L. A. Gallego, "An improved simulated annealing-linear programming hybrid algorithm applied to the optimal coordination of directional overcurrent relays", *Electric Power Systems Research*, vol. 181, 2020, 10.1016/j.epr.2020.106197.
- [22] Z. Moravej, F. Adelnia, and F. Abbasi, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using NSGA-II", *Electric Power System Research*, vol. 119, pp. 228-236, 2015, 10.1016/j.epr.2014.09.010.
- [23] M. El-Kordy, A. El-Fergany, and A. F. A. Gawad, "Various metaheuristic-based algorithms for optimal relay coordination: review and prospective", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 3621-3629, 2021, 10.1007/s11831-021-09560-2.
- [24] D. S. Alkaran, M. R. Vatani, G. B. Gharehpetican, and M. S. Naderi, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Networks by Using Fuzzy-Based GA Method", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3091-3101, 2018, 10.1109/TSG.2016.2626393.
- [25] Y. Damchi, J. Sadeh, and H. R. Mashhadi, "Optimal coordination of distance and overcurrent relays considering a non-standard tripping characteristic for distance relays", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 1448-1457, 2015, 10.1049/iet-gtd.2015.1087.

- [26] R. N. Meira, R. L. A. Pereira, and N. S. D. Brito, "A new method for optimal coordination of overcurrent and distance relays", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 34, pp. 858–871, 2023, 10.1007/s40313-023-01012-6.
- [27] C. Sheppard, *Genetic algorithms with python*, New York: Createspace, 2016, ISBN: 978-1540324009.
- [28] J. Carter, F. Chiclana, A. S. Khuman, and T. Chen, *Fuzzy logic: recent applications and developments*, Switzerland: Springer, 2021, ISBN: 978-3030664732.

- [29] M. H. Marcolino, J. B. Leite and J. R. S. Mantovani, "Optimal coordination of overcurrent directional and distance relays in meshed networks using genetic algorithm", *IEEE Latin America Trans.*, vol. 13, no. 9, pp. 2975–2982, 2015.
- [30] V. N. Rajput, and K. S. Pandya, "On 8-bus test system for solving challenges in relay coordination", in *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 1–5, 2016.

ANDRE A. P. BISCARO (Senior Member, IEEE) was born in Penapolis, Sao Paulo, SP, Brazil in 1980. He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Sao Paulo State University (UNESP), Ilha Solteira, Brazil, in 2005, 2009 and 2014, respectively. He is currently a full Professor with the Faculty of Exact and Technological Sciences, Mato Grosso State University, Sinop, Brazil. His research interests include renewable energies, optimization techniques, smart grids, computational algorithms in power systems, protection and distribution.



JOSE R. S. MANTOVANI (Member, IEEE) received the B.Sc. degree in electrical engineering from São Paulo State University (UNESP), Ilha Solteira, Brazil, in 1981, and the M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Campinas, Campinas, Brazil, in 1987 and 1995, respectively. He is currently a Professor with the Department of Electrical Engineering, UNESP. His research interests include development of methodologies for optimization, planning, and control of electrical power systems, and applications of artificial intelligence in power systems.



APPENDIX A

Table III
Fuzzy Rules

Rule	OF_1	OF_2	OF_3	OF_4	OF_5	OF_6	OF_7	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
1	(XS or S)	(M or L)	-	-	-	-	-	S	L	-	-	-	-	-
2	(XS or S)	(M or L)	(M or L)	-	-	-	-	M	XL	L	-	-	-	-
3	(XS or S)	(M or L)	-	(M or L)	-	-	-	M	XL	-	L	-	-	-
4	(XS or S)	(L or XL)	-	-	(L or XL)	-	-	S	L	-	-	XL	-	-
5	(XS or S)	-	(M or L)	-	-	-	-	S	-	L	-	-	-	-
6	(XS or S)	-	(M or L)	(M or L)	-	-	-	M	-	XL	L	-	-	-
7	(XS or S)	-	(L or XL)	-	-	(L or XL)	-	S	L	-	-	-	XL	-
8	(XS or S)	-	-	(M or L)	-	-	-	S	-	-	L	-	-	-
9	(XS or S)	-	-	(L or XL)	-	-	(L or XL)	S	L	-	-	-	-	XL
10	M	(M or L)	-	-	(M or L)	-	-	M	XL	-	-	L	-	-
11	M	(L or XL)	-	-	-	-	-	L	XL	-	-	-	-	-
12	M	-	(M or L)	-	-	(M or L)	-	M	-	XL	-	-	L	-
13	M	-	(L or XL)	-	-	-	-	L	-	XL	-	-	-	-
14	M	-	-	(M or L)	-	-	(M or L)	M	-	-	XL	-	-	L
15	M	-	-	(L or XL)	-	-	-	L	-	-	XL	-	-	-
16	M	-	-	-	-	(XS or S)	(XS or S)	M	-	S	S	-	XS	XS
17	M	-	-	-	(XS or S)	-	-	M	M	-	-	XS	-	-
18	M	-	-	-	-	(XS or S)	-	M	-	M	-	-	XS	-
19	M	-	-	-	-	-	(XS or S)	M	-	-	M	-	-	XS
20	(M or L)	(M or L)	(M or L)	-	-	-	-	L	XL	L	-	-	-	-
21	(M or L)	(M or L)	-	(M or L)	-	-	-	L	XL	-	L	-	-	-
22	(M or L)	-	(M or L)	(M or L)	-	-	-	L	-	XL	L	-	-	-
23	(L or XL)	(XS or S)	-	-	-	-	-	XL	S	-	-	-	-	-
24	(L or XL)	(L or XL)	-	-	(L or XL)	-	-	L	L	-	-	XL	-	-
25	(L or XL)	(L or XL)	(L or XL)	(L or XL)	-	-	-	M	XL	L	M	-	-	-
26	(L or XL)	-	(XS or S)	-	-	-	-	XL	-	S	-	-	-	-
27	(L or XL)	-	(L or XL)	-	-	(L or XL)	-	L	-	L	-	-	XL	-
28	(L or XL)	-	-	(XS or S)	-	-	-	XL	-	-	S	-	-	-
29	(L or XL)	-	-	(L or XL)	-	-	(L or XL)	L	-	-	L	-	-	XL
30	(L or XL)	-	-	-	(L or XL)	(L or XL)	(L or XL)	L	-	-	-	XL	L	M

Manuscript submitted to IEEE Access

1 mensagem

IEEE Access <no-reply@atyponrex.com>

26 de março de 2025 às 02:13

Para: Andre Biscaro <andre.biscaro@unemat.br>

Dear Andre Biscaro,

Your manuscript entitled "A novel fuzzy-logic-based genetic algorithm for optimal coordination of protective relays in electric power transmission systems" has been successfully submitted online through the IEEE Author Portal and is being delivered to the Editorial Office of *IEEE Access* for consideration.

You will receive a follow-up email with your Manuscript ID and any other relevant information about your submission from our electronic peer review platform, ScholarOne Manuscripts, in the next several days.

Thank you for submitting your manuscript to *IEEE Access*

Sincerely,
The Editorial Staff at *IEEE Access*

By submitting a manuscript to or reviewing for this publication, your name, email address, and affiliation, and other contact details the publication might require, will be used for the regular operations of the publication, including, when necessary, sharing with the publisher (IEEE) and partners for production and publication. The publication and the publisher recognize the importance of protecting the personal information collected from users in the operation of these services and have practices in place to ensure that steps are taken to maintain the security, integrity, and privacy of the personal data collected and processed. You can learn more by reading our [privacy policy](#). In case you don't want to be contacted by this publication again, please send an email to ieeeaccess@ieee.org.

IEEE Access - Manuscript ID Access-2025-13649

1 mensagem

IEEE Access <onbehalf@manuscriptcentral.com>

26 de março de 2025 às 02:30

Responder a: ieeeaccess@ieee.org

Para: andre.biscaro@unemat.br, mant@dee.feis.unesp.br

26-Mar-2025

Dear Authors,

Your manuscript entitled "A novel fuzzy-logic-based genetic algorithm for optimal coordination of protective relays in electric power transmission systems" has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in IEEE Access.

If you are receiving this email, that means you are listed as an author. If you do **not** approve of being listed as a co-author on this article, please reach out to ieeeaccess@ieee.org as soon as possible.

As a reminder, IEEE Access is a fully open access journal. Open Access provides unrestricted access to published articles via IEEE Xplore. In lieu of paid subscriptions, authors are required to pay an article processing charge of \$2,075 (plus applicable local taxes) after the article has been accepted for publication.

Your manuscript ID is Access-2025-13649. Please mention the manuscript ID in all future correspondence to the IEEE Access Editorial Office. The submitting author can view the manuscript status at any time by checking their author dashboard on the [IEEE Author Portal](#). If the submitting author needs to update their email address after submission, please reach out to ieeeaccess@ieee.org so we can assist you in doing so.

** Please note that any change to the author list after the article has been submitted is considered rare and exceptional, and the decision to allow such changes rests with the Editor. Once the list and order of authors has been established, the list and order of authors should not be altered without permission of all living authors of that article and will still be subject to editorial review.

Thank you again for submitting your manuscript to IEEE Access.

Sincerely,

IEEE Access Editorial Office

PARTICIPAÇÕES EM BANCAS EXAMINADORAS



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

ATESTADO

Atestamos que o Prof. Dr. **ANDRE DO AMARAL PENTEADO BISCARO**, do(a) Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT, participou em 05 de março de 2024, como MEMBRO TITULAR da Comissão Examinadora da DEFESA DE TESE de ALI REZA KHEIRKHAH, discente regular do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Curso de Doutorado, cujo trabalho se intitula "**Electricity Grid Resilience to Disruptions: Assessments and Mitigations**". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros:

1. Prof. Dr. JONATAS BOAS LEITE (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP
2. Dr. MARIO ANDRES MEJIA ALZATE (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP
3. Prof. Dr. ANDRE DO AMARAL PENTEADO BISCARO (Participação Presencial)
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
4. Prof. Dr. MAHDI POURAKBARI KASMAEI (Participação Virtual)
Department of Electrical Engineering and Automation / Aalto University - Finlandy
5. Prof. Dr. LUÍS FELIPE NORMANDIA LOURENÇO (Participação Virtual)
Instituto de Energia e Ambiente / Universidade de São Paulo - USP

Ilha Solteira, 05 de março de 2024.

Graciele Perez Viegas
Nizo:31880676826

Assinado de forma digital por
Graciele Perez Viegas
Nizo:31880676826
Dados: 2024.03.12 10:26:40 -03'00'

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e seis dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente *Geovane Sass Ceccato*, matriculado sob o nº 162054106, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. *Jonatas Boas Leite*, o Prof. Dr. *André do Amaral Penteado Biscaro* e o Dr. *Lucas do Carmo Yamaguti*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"Determinação das Melhores Curvas de Controle Volt/Var para Inversores Inteligentes usando Algoritmo Evolucionário"**, obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.


Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -

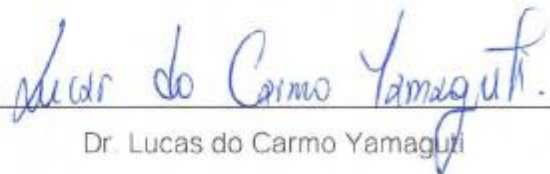

Geovane Sass Ceccato

- Discente -



Prof. Dr. André do Amaral Penteado Biscaro

- Membro da Banca -

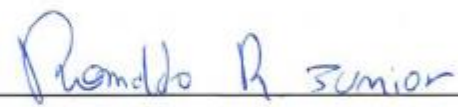

Dr. Lucas do Carmo Yamaguti

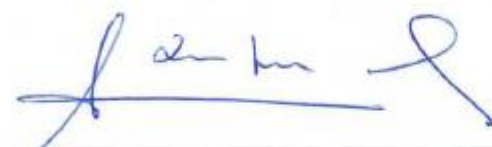
- Membro da Banca -

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos treze dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **Ronaldo Romano Junior**, matriculado sob o nº 182054489, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite, o Prof. Dr. Alexandre César Rodrigues da Silva e o Prof. Dr. André do Amaral Penteado Biscaro, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Comunicação serial entre um computador e um dispositivo eletrônico inteligente comercial, como o SEL 451A**", obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito APROVADO.


Prof. Dr. Jonatas Boas Leite
- Orientador -


Ronaldo Romano Junior
- Discente -


Prof. Dr. Alexandre César Rodrigues da Silva
- Membro da Banca -


Prof. Dr. André do Amaral Penteado Biscaro
- Membro da Banca -

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e quatro dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **EDIVALDO ALVES CORREA JÚNIOR** matriculado sob o nº 17205493, tendo como banca examinadora a sua orientadora, a *Profa. Dra. Suely Cunha Amaro Mantovani*, e os Pós- Doutorandos *Prof. Dr. André Penteado do Amaral Biscaro* e *Dr. Júlio Cesar Eduardo de Souza*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**DESENVOLVIMENTO DE UMA MINIESTAÇÃO METEOROLÓGICA INTEGRADA A UM DISPOSITIVO MÓVEL**", obtendo a nota 9,0 e conceito Aprovado.



Profa. Dra. Suely Cunha Amaro Mantovani

- orientadora -



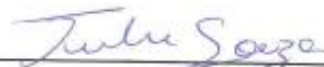
Edivaldo Alves Correa Júnior

- discente -



Prof. Dr. André Penteado do Amaral Biscaro

- Membro da Banca -



Pós- Doutorando Júlio Cesar Eduardo de Souza

- Membro da Banca -

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ATA DA APRESENTAÇÃO DE SEMINÁRIO REFERENTE A DISCIPLINA
ESTUDOS ESPECIAIS I

Título: Planejamento de curto prazo de redes de distribuição com geração distribuída

Aluno: Rommel Angel Huayas Inga

Comissão Examinadora composta pelos seguintes Professores Doutores:

01. Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani (Orientador)
02. Prof. Dr. André do Amaral Penteado Biscaro (UNEMAT)
03. Dr. Lucas do Carmo Yamaguti (UNESP-FEIS)

Data: 26/09/2024

Horário: 10:00 horas

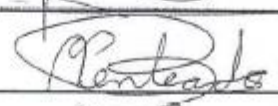
Local: Sala de Seminários do Departamento de Engenharia Elétrica – Campus III

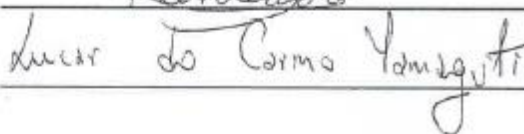
Em sessão pública, após exposição em torno de 31 minutos, o aluno foi arguido oralmente, pelos membros componentes da comissão examinadora, sendo considerado Aprovado com conceito A.

Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo aluno.

ASSINATURAS DA COMISSÃO EXAMINADORA:

 (ORIENTADOR)





CIENTE DO ALUNO:



C e r t i f i c a d o

Certificamos que André do Amaral Penteado Biscaro atuou como parecerista ad hoc dos trabalhos submetidos para avaliação no edital 03/2024 - Edital PIBExt de Incentivo e Bolsas de Extensão promovido pela Pró-Reitoria de Extensão da UFPE, no período de 06 de agosto de 2024 a 21 de agosto de 2024, com uma carga horária total de 12 (doze) hora(s) equivalente a análise de 3 (três) trabalhos.

Recife, 06 de setembro de 2024.



Maria da Conceição dos Reis
Pró-Reitora de Extensão

PROEXT
PRÓ-REITORIA DE
EXTENSÃO



UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO CARLOS ALBERTO REYES
MALDONADO
CARLOS ALBERTO REYES MALDONADO



DECLARAÇÃO Nº 517 / 2024 - PRPPG-SAPES (11.01.27.08.01)

Nº do Protocolo: 23065.010395/2024-85

Cáceres-MT, 14 de novembro de 2024.

Declaramos para os devidos fins que, o Prof. Dr. André do Amaral Penteadó Bísvaro, faz parte do Banco de Consultores Ad Hoc da Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT, na avaliação de Projetos de Pesquisa, e concluiu a avaliação de 01 (um) Projeto de Pesquisa do Edital 013/2024 - PROGRAMA DE APOIO À PESQUISA E INOVAÇÃO - PAPI - CHAMADA DE PROPOSTAS DE PROJETOS DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO, na data de 13 de Novembro de 2024.

Por ser expressão de verdade, dato e assino a presente.

(Assinado digitalmente em 14/11/2024 08:44)

ALANA MICHELLE SA DE SOUZA
SUPERVISORA DE ACOMPANHAMENTO DE PROJETOS DE PESQUISA
REITORIA (11.01)
Matrícula: 87930006

Visualize o documento original em <https://sipac.unemat.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **517**, ano: **2024**, tipo: **DECLARAÇÃO**, data de emissão: **14/11/2024** e
o código de verificação: **89d8fcd84**



SEMANA NACIONAL
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

CERTIFICADO

Certificamos que ANDRÉ DO AMARAL PENTEADO BISCARO participou
como Avaliador - Online da 21ª Semana Nacional de
Ciência e Tecnologia, evento promovido pela Secretaria de Estado de
Ciência, Tecnologia e Inovação (Seciteci), realizado entre os dias 22 e
24 de outubro, no Centro de Eventos do Pantanal, em Cuiabá, com
carga horária de 5 horas.

ALLAN KARDEC PINTO ACOSTA BENITEZ

Secretário de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação