

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS HENRIQUE MARCOLINO

**COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE E DISTÂNCIA PARA
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO**

Ilha Solteira

2014

MATHEUS HENRIQUE MARCOLINO

**COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE E DISTÂNCIA PARA
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica
Área de Conhecimento: Automação

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani

Ilha Solteira

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M321c **Marcolino, Matheus Henrique.**
Coordenação de relés de sobrecorrente e distância para sistemas de
transmissão / Matheus Henrique Marcolino. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
106 f. : il.

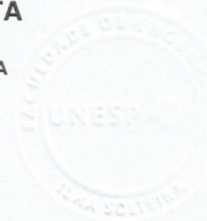
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani
Inclui bibliografia

1. Sistemas de proteção. 2. Coordenação ótima. 3. Relés de sobrecorrente e
distancia. 4. Modelagem de relés numéricos. 5. Algoritmo genético. 6.
Controlador nebuloso.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Coordenação de Relés de Sobrecorrente e Distância para Sistemas de Transmissão

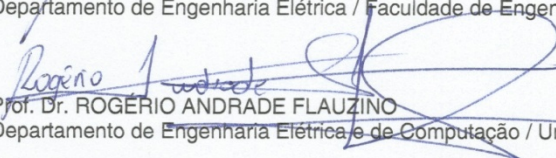
AUTOR: MATHEUS HENRIQUE MARCOLINO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ROGERIO ANDRADE FLAUZINO
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Universidade de São Paulo

Data da realização: 16 de julho de 2014.

DEDICO

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos em minha vida, pela saúde, pelos amigos e pela família.

Ao professor Dr. José Roberto Sanches Mantovani pela oportunidade, apoio, e confiança no meu profissionalismo, em todo o período de orientação deste trabalho. Aos professores Fabio Bertequini Leão e Antonio Padilha Feltrin pelas sugestões, correções e críticas construtivas na banca de qualificação, com o intuito de melhorar o trabalho.

Ao meu pai Mauricio Marcolino, e a minha tia Meire Marcolino, por todo apoio e confiança.

À minha namorada Amanda Kimie Nakamura, por acreditar em mim e sempre me apoiar nos momentos mais difíceis no desenvolvimento desse trabalho.

Aos colegas de trabalho e acima de tudo amigos, Jônatas Boás Leite, Leonardo Henrique, Marcos Célio de Sousa e Diogo Rupolo, por toda ajuda e conselhos tanto no trabalho como na vida. Ao amigo de outro laboratório, Vander Teixeira Prado pelo suporte e motivação. E a todos os outros colegas do LaPSEE.

A FEPISA e a CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

A linha de transmissão é uma componente essencial do sistema elétrico de potência e a sua proteção é necessária para garantir o funcionamento contínuo e estável da rede. Um sistema de proteção adequado deve reunir de forma confiável e segura diferentes funções de proteção. Neste trabalho é adotada a proteção piloto, transferência de *trip* de sobre alcance permissivo para linhas de transmissão de extra-alta tensão (EAT). Esta proteção utiliza funções de sobrecorrente para retaguarda de faltas fase-terra e funções de distância para faltas entre fases. Um método inteligente foi desenvolvido para realizar a coordenação de relés de sobrecorrentes e de distância para sistemas malhados, assim como a modelagem de relés numéricos com a inserção de controladores nebulosos desenvolvidos em MODELS para serem inseridos no ATP (*Alternative Transient Program*). A metodologia proposta consiste em coordenar de forma ótima estes relés em sistemas de transmissão, para isto utiliza-se um algoritmo genético dedicado. Além disto, é desenvolvido o projeto de um controlador nebuloso que agregado ao relé numérico auxilia na proteção e na tomada de decisões independente das condições operacionais do sistema – topologia e níveis de carregamentos. Os resultados representam tempos de coordenação reduzidos quando comparados com outras técnicas. A presença do controlador auxilia o relé na tomada de decisões contribuindo para a confiabilidade do projeto de proteção.

Palavras-chave: Sistemas de proteção. Coordenação ótima. Relés de sobrecorrente e distância. Modelagem de relés numéricos. Algoritmo genético. Controlador nebuloso.

ABSTRACT

The transmission line is a component essential to power systems and your protection its essential to ensure a stable and continuous network operation. A appropriate protection system must collect securely and trustily different protection functions. In this work a pilot protection is used, a *permissive overreaching transfer trip* for extra high voltage lines. This structure uses directional overcurrent relays as backup protections against phase-earth faults and distance relays for phase-phase faults. A intelligent method was developed for mesh networks to coordination relays, as modeling of numerical relay with fuzzy control using MODELS language to be inserted in ATP (Alternative Transient Program). The proposed methodology realizes an optimal coordination for all relays in the transmission network. To get this a genetic algorithm is developed. In addition, a fuzzy control is designed in numeric relay, this tool helps the relay on decisions independent of topology changes or different load levels that makes the pilot protection an adaptive protection.

Keywords: Power System protection. Optimal coordination. Overcurrent and distance relays. Modeling of numerical relay. Genetic algorithm. Fuzzy control. Adaptive protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da proteção piloto	24
Figura 2 – Diagrama unifilar com o esquema de proteção adotado.	28
Figura 3 – (a) Elementos de distância para a TTSP. (b) Alcance das zonas de distância.	29
Figura 4 - (a) lógica dos contatos; (b) lógica de estado sólido para Z1.	30
Figura 5 – Relação entre o ATPDraw e outros programas do ATP	33
Figura 6 – Janela de execução do ATPLauncher	34
Figura 7 - a) modelo do transformador monofásico saturável, b) Excitação do TC	35
Figura 8 – Exemplo de curva de Saturação dos núcleos de um TC	36
Figura 9 – Arquitetura do relé proposto	37
Figura 10 – Especificações do filtro passa-baixas analógico	38
Figura 11 – Sistema elétrico malhado.	46
Figura 12 – Curva dos relés de sobrecorrente, referentes a Tabela 3, para TMS=1.	50
Figura13 – Curvas do relé inverso padrão variando TMS.	51
Figura 14 - Processo de coordenação ótimo proposto.	54
Figura 15 – Codificação do indivíduo.	56
Figura 16 – Função de pertinência triangular	59
Figura 17 – Função de pertinência trapezoidal	60
Figura 18 – Conjunto “crisp” frio.	61
Figura 19 – Conjunto nebuloso jovem	61
Figura 20 – Sistema nebuloso com nebulizador e desnebulizador	62
Figura 21 - Diagrama unifilar da proteção utilizando controlador nebuloso	63
Figura 22 – Arquitetura do relé numérico com o controlador nebuloso	64
Figura 23 - Característica da curva do relé de sobrecorrente, análise tridimensional	65
Figura 24 – Funções de pertinência da função de sobrecorrente do relé	66
Figura 25 - Característica das curvas do relé de distância do tipo MHO	68
Figura 26 - Funções de pertinência da função de distância do relé	68
Figura 27 – Funções de pertinência dos tempos das funções do relé	70
Figura 28 – Característica da corrente de curto-circuito	72
Figura 29 – Funções de pertinência do sinal piloto	73
Figura 30 – Características do sinal de controle	74
Figura 31 – Sistema teste de 8 barras	79
Figura 32 – Sistema teste de 39 barras	80

Figura 33 – Painel do relé numérico projetado em MODELS no ATP	84
Figura 34 – Curvas de distância e sobre-corrente para os pares que possuem o relé 1.	85
Figura 35 – Curvas de distância e sobre-corrente para os pares que possuem o relé 15.	91
Figura 36 – (a) Impedância vista pelo relé 2; (b) Saída de controle.	92
Figura 37 – (a) Impedância vista pelo relé 1; (b) Saída de controle.	93
Figura 38 – (a) Impedância vista pelo relé 7; (b) Saída de controle.	93
Figura 39 – (a) Impedância vista pelo relé 12; (b) Saída de controle.	94
Figura 40 – (a) Impedância vista pelo relé 3; (b) Saída de controle.	95
Figura 41 – (a) Impedância vista pelo relé 10; (b) Saída de controle.	95
Figura 42 – (a) Impedância vista pelo relé 11; (b) Saída de controle.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relações para classificação de faltas.	41
Tabela 2 – Impedância de falta de sequência positiva para todos os tipos de falta	42
Tabela 3 – Valores usuais de CTI.	48
Tabela 4 - Valores IEC, para relés de sobrecorrente.	49
Tabela 5 – Conjunto de regras referentes a curtos-circuitos entre fases	75
Tabela 6 – Conjunto de regras referentes a curtos-circuitos fase- terra	75
Tabela 7 – Parâmetros do algoritmo genético	81
Tabela 8 – Parâmetros dos relés gerados pelo AG	82
Tabela 9 – Lista P/R do sistema de 8 barras, com seus intervalos de coordenação.	83
Tabela 10 - Parâmetros dos relés gerados pelo AG	86
Tabela 11 – Lista P/R do sistema de 39 barras, com seus intervalos de coordenação.	88
Tabela 12- Características das linhas.	102
Tabela 13 - Informações dos transformadores.	102
Tabela 14 - Informações do gerador.	102
Tabela 15 - Informações das cargas.	103
Tabela 16 – Informações dos geradores.	103
Tabela 17 – Informações das linhas e transformadores	104
Tabela 18 – Informações das fontes de tensão e das cargas	105

LISTA DE ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BPS	<i>Break Point Set</i>
EAT	Extra Alta Tensão
BT	Busca Tabu
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FO	Função Objetivo
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LN	Lógica Nebulosa
LT	Linha de Transmissão
PL	Programação Linear
PP	Proteção principal
PR	Proteção de retaguarda
P/R	Par de relés principal e retaguarda
RD	Relés de Distância
RSCD	Relés de Sobrecorrente Direcional
SCADA	<i>Supervisory control and data acquisition</i>
TC	Transformador de corrente
TMS	<i>Time Multiplies Setting</i>
TP	Transformador de Potencial
TTSP	Transferência de TRIP de sobre alcance permissivo

LISTA DE SÍMBOLOS

Aa	Matriz de incidência modificada
A_{ij}	Matriz A composta pelas barras (i) e ramos (j)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	REVISÃO DA LITERATURA	17
1.1.1	Coordenação de Relés de Distância e Sobrecorrente	17
1.1.2	Alternative transients program (Atp)	18
1.1.3	Sistemas Nebulosos	19
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	20
2	PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	22
2.1	CONCEITOS GERAIS DE PROTEÇÃO	22
2.1.1	Termos da Engenharia de Proteção	22
2.2	LINHAS DE TRANSMISSÃO DE EXTRA-ALTA TENSÃO	24
2.2.1	Proteção Piloto	24
2.2.2	Proteção Piloto Para Linhas de Extra-alta Tensão	26
2.3	PROJETO DE PROTEÇÃO PROPOSTO	27
2.4	ESQUEMA DE PROTEÇÃO ADOTADO	29
2.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	31
3	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO ITERATIVO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	32
3.1	ATP 32	
3.1.1	ATPDraw	32
3.1.2	ATPLauncher	33
3.1.3	Modelagem de Transformadores de Corrente	34
3.2	CONCLUSÕES PARCIAIS	36
4	ARQUITETURA DO RELÉ NUMÉRICO	37
4.1	FILTRO ANALÓGICO	37
4.2	CONVERSÃO A/D	39
4.3	FILTRO DIGITAL	39
4.4	ALGORITMO DO RELÉ NUMÉRICO	40
4.5	DETECTOR DE FALTA	41
4.6	LOCALIZADOR DE FALTA	42
4.8	CONCLUSÕES	44
5	ESTUDO DA COORDENAÇÃO DOS RELÉS	45
5.1	INTRODUÇÃO	45

5.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	46
5.3	TÉCNICA DE SOLUÇÃO	52
5.3.1	Processo de Otimização	54
5.5	CONCLUSÕES	57
6	CONTROLADOR NEBULOSO	58
6.1	INTRODUÇÃO A LÓGICA NEBULOSA	58
6.1.1	Funções de Pertinência	59
6.1.2	Sistemas Nebulosos	61
6.2	PROJETO DO CONTROLADOR NEBULOSO	62
6.2.1	Estrutura do Relé Numérico com Controlador Nebuloso	63
6.2.2	Composição do Controlador Nebuloso	64
6.3	CONCLUSÕES	77
7	RESULTADOS	78
7.1	SISTEMAS TESTE	78
7.1.1	Sistema de 8 Barras	82
7.1.2	Sistema de 39 Barras	86
7.2	CONTROLADOR NEBULOSO	92
7.2.1	Primeiro Cenário	92
7.2.2	Segundo Cenário	94
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	97
8.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	99
	ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTES	102

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são projetados para resistir a diversas situações de “*stress*” e suportar a todas as cargas mecânicas severas tais como ventos, tempestades e etc. Este projeto é efetuado de forma tal a minimizar os custos de transmissão de energia, que requer equilíbrio entre os investimentos iniciais de construção e manutenção do sistema. Uma vez que não é economicamente viável projetar um sistema que esteja protegido para todo tipo de falhas possíveis, a alternativa é projetar um sistema de proteção que possa detectar facilmente condições anormais em sua área de atuação e tomar ações apropriadas. O tipo de ação a ser tomada depende do dispositivo de proteção e das condições do sistema.

As linhas de transmissão (LT) são elementos fundamentais do SEP e estão mais sujeitas aos danos, por estarem expostas às mudanças atmosféricas e intempéries, portanto sua proteção adequada se torna essencial. Neste trabalho o tema de pesquisa é a proteção de linhas de transmissão propondo-se um esquema em que se utilizam relés de distância (RD), como proteção principal (PP) e relés de sobrecorrente direcionais (RSCD) como proteção de retaguarda (PR), mais especificamente proteção de retaguarda de terra.

Os relés possuem uma variedade de aplicações, sendo destacada neste trabalho a aplicação para proteção de LTs. É importante destacar que o uso correto dos relés está relacionado com a filosofia de proteção adotada que envolve a necessidade de coordenação e seletividade entre os diferentes tipos de proteção existentes no SEP. Muitas filosofias de proteção propostas apresentam a coordenação correta para sistemas radiais, e.g. Razaviet al. (2007) e Sadeh, Amintojjar e Bashir (2011). Em sistemas malhados, o fluxo de corrente é bidirecional, e esta característica da rede impõe o uso de relés de distância (inerentemente direcionais) e de relés de sobrecorrente direcionais.

O esquema de proteção envolve um conjunto de fatores, que inclui o projeto de proteção dos dispositivos empregados. O conhecimento prévio do perfil das faltas e seus efeitos no SEP são essenciais para o projeto de proteção. A comunicação entre a central de operações e os relés instalados nas LTs, deve ser a mais rápida e eficiente possível, contanto que não afete a confiabilidade da mesma.

Em sistemas de transmissão de extra-alta tensão (EAT), classificados em tensões de 345 kV ou mais, a central de operações precisa de um monitoramento o mais próximo do tempo real possível, pois se houver alguma contingência deve-se agir rapidamente para proteger o SEP. Atualmente, a proteção piloto é a mais utilizada para este tipo de sistema. O meio

de comunicação utilizado depende de diversos fatores, como por exemplo, os fatores econômicos e geográficos em que será inserido o sistema elétrico sob análise.

Com a evolução das pesquisas devido à importância da proteção, há o surgimento de diversas técnicas para o desenvolvimento de algoritmos para a proteção de SEP, como a utilização de controladores fuzzy, redes neurais, DSP (*Digital Signal Processor*), FPGA (*Field Programmable Gate Array*), filtro adaptativo de Kalman, Transformada de Fourier, dentre outras.

1.1 REVISÃO DA LITERATURA

Existem diversos trabalhos publicados que envolvem a coordenação de relés de distância e sobrecorrente em sistemas de transmissão, porém a função objetivo utilizada não pode ser aplicada corretamente em sistemas malhados. Contudo há nestes trabalhos o desenvolvimento de conceitos importantes que foram empregados durante o desenvolvimento deste projeto. Outros trabalhos foram utilizados para o desenvolvimento do relé numérico no ATP (*Alternative Transients Program*) e também para a análise e estudos de técnicas de proteção adaptativa.

1.1.1 Coordenação de Relés de Distância e Sobrecorrente

Em Rockefeller (1969) desenvolve-se um programa que realiza diversas funções de um relé de proteção de uma subestação, tais como de detectar faltas, localizá-las e enviar o sinal de TRIP para a abertura dos disjuntores, caso necessário. Trata-se de um trabalho pioneiro e importante na área de proteção digital.

Braga e Saraiva (1996), formulam o problema de coordenação com um conjunto de relés de sobrecorrente direcionais através de análise da topologia da rede e identificando os pares de relés primário e de retaguarda. Para efetuar esta identificação, utilizam a teoria dos grafos e a matriz de incidência de redes. O problema de coordenação dos relés é formulado como um modelo de programação linear (PL).

Kawahara et al. (1997) apresentam um método baseado em regras heurísticas para efetuar a coordenação de relés de sobrecorrente. Neste método, após a determinação dos pares de relés primário e retaguarda, os pontos ou barras candidatas a *Break Point Set* (BPS) são en-

contrados, seguindo um encadeamento de eventos, determinando assim uma sequência de configuração dos relés, para que a coordenação possa ser realizada corretamente.

Sadehet al. (2011) apresentam uma solução para o problema da coordenação entre relés de sobrecorrente e distância utilizando *Particle Swarm Optimization (PSO)*. O PSO híbrido é utilizado para encontrar um ponto ótimo na coordenação de relés de sobrecorrente e de distância. O algoritmo apresentado é basicamente dividido em duas partes. A parte não linear, é usada para encontrar a corrente de ajuste dos relés de sobrecorrente, e sequencialmente um PL é aplicado para determinar o TMS (*Time Multiplies Setting*) ótimo e o tempo de atuação da segunda zona de proteção do relé de distância.

Orduñaet al. (2003), propõem um esquema de proteção adaptativo que trabalha em tempo real para a coordenação de relés de proteção em sistemas malhados, onde a proteção de retaguarda é feita de modo remoto. O algoritmo proposto utiliza um “sistema especialista”, onde através das mudanças no estado da rede, este sistema detecta e corrige as configurações das zonas de proteção coordenando os relés das diferentes LTs. Através de um algoritmo o sistema determina a configuração dos BPS (*Break Point Set*).

Noghabiet al. (2009), realizam o estudo da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais, considerando mudanças na topologia da rede no problema de otimização. Além disto, desenvolvem um algoritmo genético híbrido, que utiliza PL para resolver parte do problema de otimização separadamente.

1.1.2 Alternative Transients Program (ATP)

Foram utilizados alguns trabalhos como referência para auxiliar na utilização do software ATP e na sua linguagem de programação MODELS.

Kim et al. (2000) apresentam a implementação de um algoritmo para proteção de distância utilizando a linguagem MODELS do ATP. Utilizam uma estrutura simplificada em MODELS que apresenta a modelagem de um relé de distância. Através de simulações com contingências da natureza fase-fase e fase-fase-terra, é analisado o desempenho do algoritmo do relé proposto.

Funabashiet al. (1998), apresentam um modelo que localiza faltas no domínio do tempo, utilizando a linguagem MODELS do ATP. O modelo proposto é composto de filtros analógicos para as entradas dos sinais de tensão e corrente, equipamento de *sample-and-hold* (amostragem), filtros digitais, ferramenta para cálculo das magnitudes e fases das tensões e correntes, algoritmo localizador de faltas, e análise estatística das saídas.

Adu (2002) descreve uma metodologia para classificar contingências que podem ocorrer em uma LT. Este método utiliza as relações das magnitudes e fases das componentes simétricas das correntes.

Schweizer (1986) apresenta uma revisão teórica para localizar faltas por meio da impedância. As técnicas apresentadas são, baseadas na experiência técnica dos laboratórios *Schweitzer Engineering*.

Høidalenet al. (2003), apresentam as novidades do software ATPDraw, com ênfase nos aspectos técnicos da modelagem de LTs, cabos e transformadores.

1.1.3 Sistemas Nebulosos

O projeto de proteção adaptativa se tornou possível devido à evolução da tecnologia. Há diferentes metodologias na literatura para projetar um controlador adaptativo, e neste trabalho a ênfase é na utilização de um controlador nebuloso para realizar os ajustes necessários nos relés numéricos.

Ferrero et al. (1995), apresentam um modelo baseado em Lógica Nebulosa (LN) para detectar o tipo de contingência, utilizando componentes simétricas. Este modelo pode ser aplicado em um relé numérico, e são realizadas simulações em diferentes cenários para analisar a metodologia proposta.

Chenet al. (2006), apresentam conceitos introdutórios sobre sistemas nebulosos, importantes para a elaboração do projeto do controlador nebuloso.

McNeilet al. (1994), fazem uma abordagem prática de lógica nebulosa, possibilitando o entendimento da utilização prática do processo nebuloso.

Das e Reddy (2005), apresentam um método que classifica diversos tipos de contingências em LTs, utilizando um algoritmo baseado em lógica nebulosa. O método proposto utiliza as relações que foram desenvolvidas em (ADU, 2002) para classificar as faltas, e necessita de apenas três medidas de corrente do relé para classificar o tipo de falta em apenas meio ciclo.

Erenturk (2005) apresenta o projeto e a aplicação de um relé digital baseado em *fuzzylogic*, e um estimador de valores de tensão e corrente para SEP radiais. Além de fazer uma abordagem teórica sobre *fuzzylogic*, o autor apresenta a definição matemática do estimador de valores, medição e detecção da corrente de falta, determinação de sua duração, mecanismo de decisão do relé e detalhamento da arquitetura proposta.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Nesta dissertação têm-se os seguintes objetivos e contribuições:

- Revisão bibliográfica de metodologias utilizadas na coordenação ótima de relés de distância e de sobrecorrente.
- Implementação de um AG, para realizar a coordenação ótima entre relés de distância (proteção primária e retaguarda para faltas entre fases) e relés de sobrecorrente direcionais (proteção de retaguarda, para faltas fase-terra) em SEP malhados.
- Desenvolvimento e análise de um relé numérico utilizando a linguagem MODELS do ATP.
- Testar o modelo do relé numérico desenvolvido em sistemas de pequeno e grande porte.
- Desenvolvimento e análise de um controlador nebuloso que auxilia o relé na tomada de decisões.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho é constituído por oito capítulos. No primeiro capítulo apresentam-se os conceitos introdutórios, nos quais se justifica a importância da proteção em SEP, que envolve a coordenação dos relés para que a proteção seja eficiente e uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos utilizados como referência para a execução deste projeto.

No capítulo 2 apresentam-se conceitos gerais da teoria da proteção, onde são abordados aspectos introdutórios da proteção piloto e sua aplicação em LTs de EAT. A proposta para coordenação ótima de relés em SEP malhados é apresentada e detalhada.

No capítulo 3 o ambiente de simulação ATP é apresentado em detalhes, assim como suas ferramentas *ATP Launcher*, *ATP Draw*, *PlotXY*, e o arquivo *Lis-file*, este software é utilizado para cálculo de curtos-circuitos e simulação dos relés numéricos em dois sistemas testes.

No capítulo 4 toda a estrutura do relé numérico proposto é apresentada e detalhada. Este algoritmo foi implementado utilizando a linguagem MODELS do ATP.

No capítulo 5 é realizado o estudo de coordenação dos relés de proteção, onde são apresentados e detalhados os processos necessários para a coordenação ótima dos relés em sistemas malhados.

No capítulo 6 apresentam-se os conceitos introdutórios de sistemas nebulosos, assim como o projeto de um controlador nebuloso inserido como uma melhoria no relé numérico, possibilitando que o relé aprimore sua tomada de decisões diante de qualquer cenário prático.

No capítulo 7 apresentam-se os resultados da metodologia proposta para a coordenação ótima de relés de proteção, para um sistema de 8 barras e para um sistema de 39 barras. Apresenta-se também o comportamento do relé com o controlador na presença de um curto-circuito

No capítulo 8 apresentam-se as conclusões finais deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

No anexo encontram-se os dados dos sistemas testes de 8 e 39 barras utilizados.

2 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste capítulo apresentam-se conceitos necessários para o entendimento da proteção do SEP, sendo mais especificamente da proteção das LTs de EAT. O projeto de proteção proposto neste trabalho é apresentado com detalhes.

2.1 CONCEITOS GERAIS DE PROTEÇÃO

As contingências em um SEP, em geral, devem ser isoladas com o objetivo de minimizar os danos aos componentes do SEP, pois não é possível projetar um sistema imune às falhas. O monitoramento dos sistemas de proteção é feito pela medição de tensão e corrente, ou a combinação das mesmas. Os relés de proteção em essência são comparadores, em que os resultados determinam uma tomada de decisão. Os disjuntores são os dispositivos responsáveis por isolar a área afetada, de acordo com o comando enviado pelo relé.

O tempo de isolamento de uma contingência é dado pela soma dos tempos de comparação, decisão e ação. Este somatório de tempo é importante, pois está diretamente relacionado com os danos que a anormalidade pode causar ao SEP. Quanto menor o tempo de eliminação de uma contingência, menor será o dano causado ao SEP, preservando sua estabilidade e integridade física. Cada dispositivo de proteção deve possuir alguma restrição permitindo que o mesmo só seja sensível às faltas próximas a ele. Neste aspecto a proteção piloto se torna uma opção interessante para proteção de linhas de transmissão longas, porque a utilização de canais de comunicação reduz este tempo.

2.1.1 Termos da Engenharia de Proteção

Nas seguintes definições são apresentados alguns termos importantes utilizados na literatura que trata dos estudos da proteção.

- **Confiabilidade:** indica a capacidade de um sistema de proteção funcionar corretamente e com segurança, diante de quaisquer circunstâncias;
- **Seletividade:** está relacionada com a coerência de ação contra faltas dos dispositivos de proteção, ou seja, aquele relé que estiver mais próximo à falta é o competente a isolá-la. O objetivo é evitar ações indevidas;

- **Sensibilidade:** a resposta da proteção diante de anormalidades deve ser com a tolerância adequada, entre a operação e não operação dos dispositivos de proteção;
- **Velocidade:** quanto melhor o monitoramento do SEP, mais veloz é a identificação de uma falha e quanto mais rápida for a comunicação entre os dispositivos de proteção menor o dano que a ocorrência causará ao SEP;
- **Relés de distância (RD):** é um relé projetado para trabalhar com grandezas como corrente, tensão, e ângulos de fase entre a corrente e a tensão. Essas variáveis são usadas para calcular a impedância vista pelo relé, que é proporcional à distância da falta. Estes relés são inerentemente direcionais, o que facilita seu uso em sistemas malhados. Possuem em geral três zonas de proteção, sendo que a primeira zona deve ser instantânea e as outras duas temporizadas de acordo com o projeto de proteção (ANDERSON, 1998);
- **Relés de sobrecorrente direcionais (RSCD):** é um relé que além de apresentar a característica de operar quando sensibilizado por uma corrente superior a um valor pré-ajustado, possui a característica de direcionalidade, que pode ser obtida através da utilização de um equipamento, que encontre através da leitura da corrente e tensão um sentido para o fluxo de potência (ANDERSON, 1998);
- **Relés primários (principal):** são relés responsáveis por operar contra faltas em sua zona de proteção;
- **Relés secundários (retaguarda):** são relés responsáveis por operar devido a uma falha dos relés primários ou em caso de manutenção;
- **Disparo indevido:** ocorre quando o relé atua para faltas fora de sua zona de proteção, e pode ocorrer em sistemas com a sensibilidade alta (ANDERSON, 1998).

Existem diferentes níveis de perturbações em um SEP, sendo que alguns são considerados comuns em que os dispositivos de proteção não precisam agir e outros são considerados mais severos. As variações de carga, por exemplo, em que determinada hora do dia o sistema pode estar operando em carga máxima e em outra em carga moderada devem ser consideradas nos projetos de proteção, pois são eventos esperados, que não afetam os dispositivos que compõem o SEP. Existem contingências devido aos fenômenos naturais, como tempestades, ou

a má funcionalidade de equipamentos. Há eventos de pequeno porte que quando acumulados podem causar danos severos ao SEP. Portanto o monitoramento constante do SEP é essencial e cabe ao engenheiro de proteção projetar sua proteção com a maior confiabilidade possível, evitando ações indevidas e agindo com velocidade em situações necessárias.

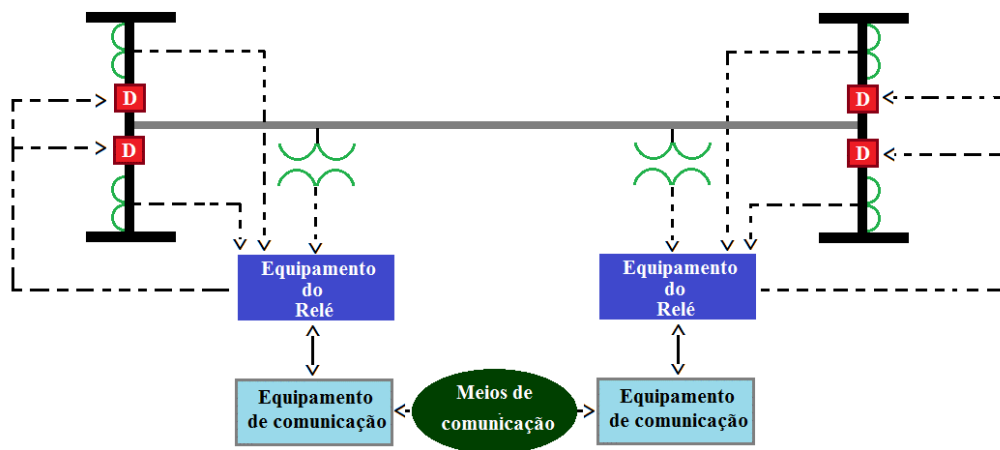
2.2 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE EXTRA-ALTA TENSÃO

As linhas de transmissão estão diretamente relacionadas com o desempenho do sistema, portanto é essencial garantir o seu bom funcionamento. Como são elementos que possuem grande extensão a proteção de distância se torna a mais adequada. Em sistemas de extra-alta tensão, a proteção de distância necessita monitoramento em tempo real do sistema elétrico e rápida tomada de decisões, justificando o emprego da proteção piloto. A seguir são abordados os principais aspectos desse tipo de proteção.

2.2.1 Proteção Piloto

Este tipo de proteção utiliza canais de comunicação que permitem o monitoramento das condições elétricas nos terminais das LTs.

Figura 1 –Esquema da proteção piloto



Legenda:

- D Disjuntores
- Transformadores de medição de corrente e tensão
- Canais de comunicação (Fibra óptica, fio, portadora na linha de potência, micro-ondas)
- Linha de transmissão

Fonte: (ANDERSON, 1998).

Na Figura 1 apresenta-se uma LT simplificada, com seus equipamentos necessários para medições de corrente e tensão, que são os transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP). Essas grandezas são utilizadas pelas funções de sobrecorrente e de distância do relé para a tomada de decisões. Equipamentos de comunicação possibilitam a central de operações receber informações dos extremos da LT para os relés instalados nas mesmas. Os meios de comunicação completam o esquema de proteção piloto. Existem diversos meios de comunicação como por fio, portadora na linha de potência (PLC), micro-ondas e fibra óptica. A escolha do tipo de meio de comunicação compete ao engenheiro que projeta o esquema de proteção, onde se deve levar em conta fatores econômicos e geográficos. Considerando os aspectos de confiabilidade e segurança um esquema de proteção possui ao menos dois meios de comunicação de naturezas distintas.

Historicamente, as comunicações por fio e por portadora na linha de potência eram as mais utilizadas. Nos últimos dez anos, sistemas com comunicação por fibra óptica são os mais utilizados devido a sua completa imunidade às interferências elétricas e redução de seus custos (AREVA, 2002).

Segundo Anderson (1998) utilizam-se os seguintes critérios para escolha dos meios de comunicação:

- Fio, utilizada em linhas com até 14,5 km de comprimento;
- Portadora na linha de potência (PLC), usada em linhas com mais de 14,5 km, ou quando sistemas com fibra óptica não estão disponíveis ou possuem custos elevados;
- Micro-ondas (MO), ideal para linhas com mais de 14,5 km e quando a PLC não fornece quantidade suficiente de canais, ou quando se utiliza um segundo caminho de comunicação além do PLC. São necessários monitoramento constante e comunicação dos dados;
- Fibra óptica (FO), usado em linhas curtas (50 a 100 km) onde a PLC não é adequada, ou como meio de comunicação alternativo juntamente com outro meio de comunicação. Atualmente são as mais utilizadas mesmo em LT longas, pois se tornou uma opção economicamente viável.

2.2.2 Proteção Piloto Para Linhas de Extra-alta Tensão

Segundo Anderson, 1998, paralinhas com nível de tensão de 345 kV, é necessário um esquema de proteção diferenciado, mais veloz e eficiente, que monitore constantemente as LTs, justificando o emprego de equipamentos de comunicação. Existem basicamente dois esquemas de proteção piloto: (1) Os chamados não unitários, classificados basicamente em esquemas de comparação direcional, distância, transferência de TRIP, bloqueio e híbridos (englobam transferência de TRIP e bloqueio); e (2) Os esquemas unitários que envolvem comparação de fase e esquemas longitudinais para linhas longas.

Os esquemas unitários não são muito utilizados em esquemas de proteção. Estes esquemas apresentam algumas características similares à proteção diferencial, onde medições nos terminais da linha são realizadas para determinar a necessidade de *tripping*, (ANDERSON, 1998).

Os esquemas não-unitários realizam medições em todos os terminais das LTs e comunicam-se com terminais remotos, contudo não há comparação das medições. Dois importantes esquemas de proteção não-unitários são, (ANDERSON, 1998):

- Transferência de TRIP, os relés localizados nas extremidades da linha reconhecem a contingência contida na zona de proteção, e enviam o sinal de *trip* para o relé remoto localizado na extremidade da linha;
- Bloqueio, que funciona de maneira oposta ao esquema anterior. Neste esquema um sinal de bloqueio é enviado continuamente, para evitar o *tripping* do relé remoto. Ou seja, o relé remoto só opera quando o sinal de bloqueio for interrompido, que seria uma situação onde há a presença de uma contingência.

Existem ainda esquemas inseridos nos apresentados acima, como esquemas de sobre alcance e sub alcance, que utilizam equipamentos de distância. Basicamente o que os diferencia é o alcance das zonas de proteção do relé de distância. Há também esquemas de *tripping* permissivos *etripping* diretos. O termo *tripping* permissivo representa a situação onde um relé próximo à falta envia um sinal de confirmação à central indicando que a falta está na linha protegida pelo mesmo, então o relé na extremidade oposta pode permitir o envio do sinal de *trip* sem atraso, (ANDERSON, 1998).

Neste trabalho o esquema de proteção adotado representa as características da transferência de *trip* de sobre alcance permissivo (TTSP). Este esquema é um dos mais utilizados na prática devido a sua velocidade em identificar e isolar uma contingência. O meio de comunicação mais utilizado neste esquema atualmente é a fibra óptica. Porém num projeto real po-

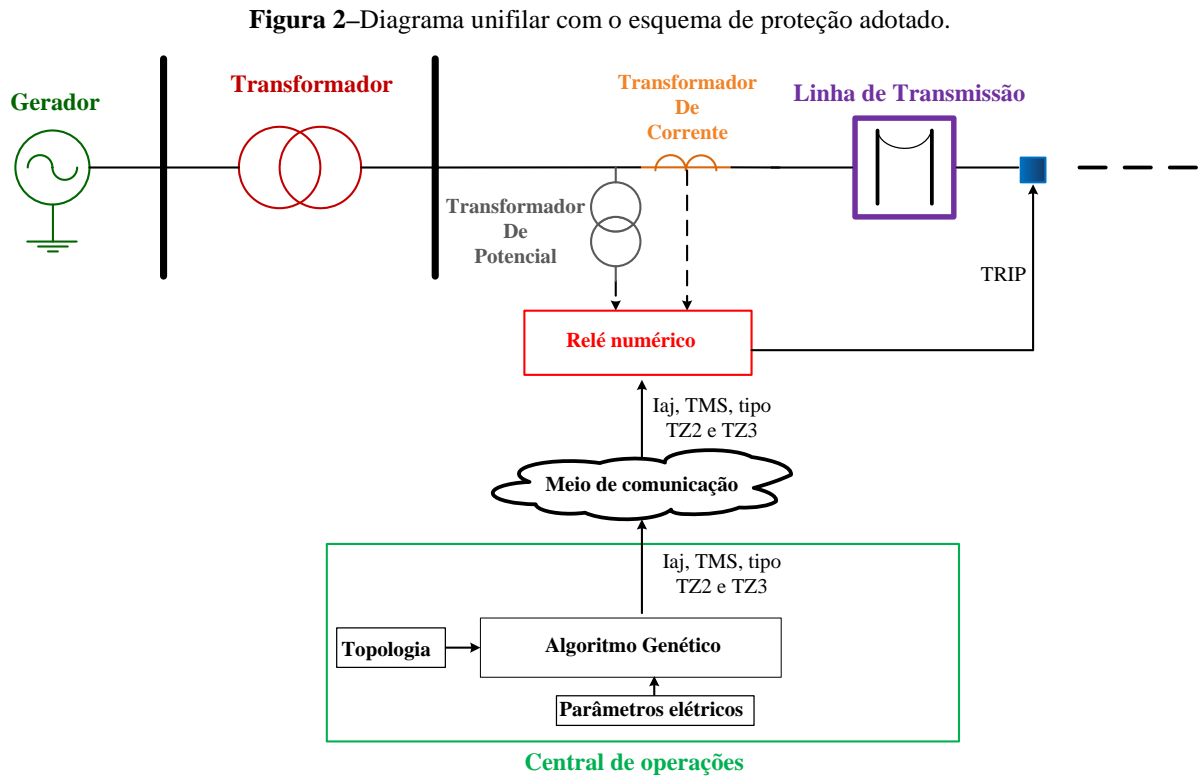
dem ser utilizados outros meios de comunicação, de modo a aumentar a confiabilidade da proteção. Quando são utilizados em conjunto meios de comunicação de natureza distintas, diminuem consideravelmente a chance de perda de comunicação entre a central de operações e os relés das LTs.

2.3 PROJETO DE PROTEÇÃO PROPOSTO

O projeto de proteção proposto neste trabalho consiste das seguintes etapas para ser realizado:

1. **Escolha do esquema de proteção:** O esquema de proteção é escolhido de acordo com o cenário. Como se trata de um sistema com linhas de extra alta tensão, optou-se pela proteção piloto. Em seguida, adota-se um esquema de proteção piloto, baseado na confiabilidade e eficiência e a escolha foi a transferência de *trip* de sobre alcance permissivo;
2. **Desenvolver as funções dos relés de distância e sobrecorrente:** nessa etapa é apresentada, a arquitetura do relé numérico desenvolvido, assim como toda sua estrutura em MODELS (linguagem específica do ATP);
3. **Estudo da coordenação dos relés:** esse estudo é essencial para que os relés funcionem adequadamente. O esquema de proteção deve obedecer a um sequenciamento de eventos sendo que este estudo é dirigido para sistemas malhados, em que existem correntes de diferentes sentidos que dificultam muito a coordenação dos relés. Para isso é necessária, uma etapa de planejamento para obter a coordenação ótima, a proposta foi utilizar o algoritmo genético.
4. **Simulação de curtos-circuitos:** é necessário adotar sistemas para testes, alocar os relés nos terminais das linhas, ajustando seus parâmetros de acordo com a resposta do AG. E por fim simular diversos curtos-circuitos e verificar o comportamento de cada relé.
5. **Teste do controlador nebuloso:** Através de simulações de diferentes cenários de faltas, testar a eficiência do relé com o controlador nebuloso, ou seja, se o mesmo toma as ações necessárias de acordo com a condição operacional do sistema.

Para compreender melhor o projeto de proteção envolvendo os procedimentos descritos anteriormente, na Figura 2 apresenta-se um diagrama unifilar com o projeto de proteção adotado.



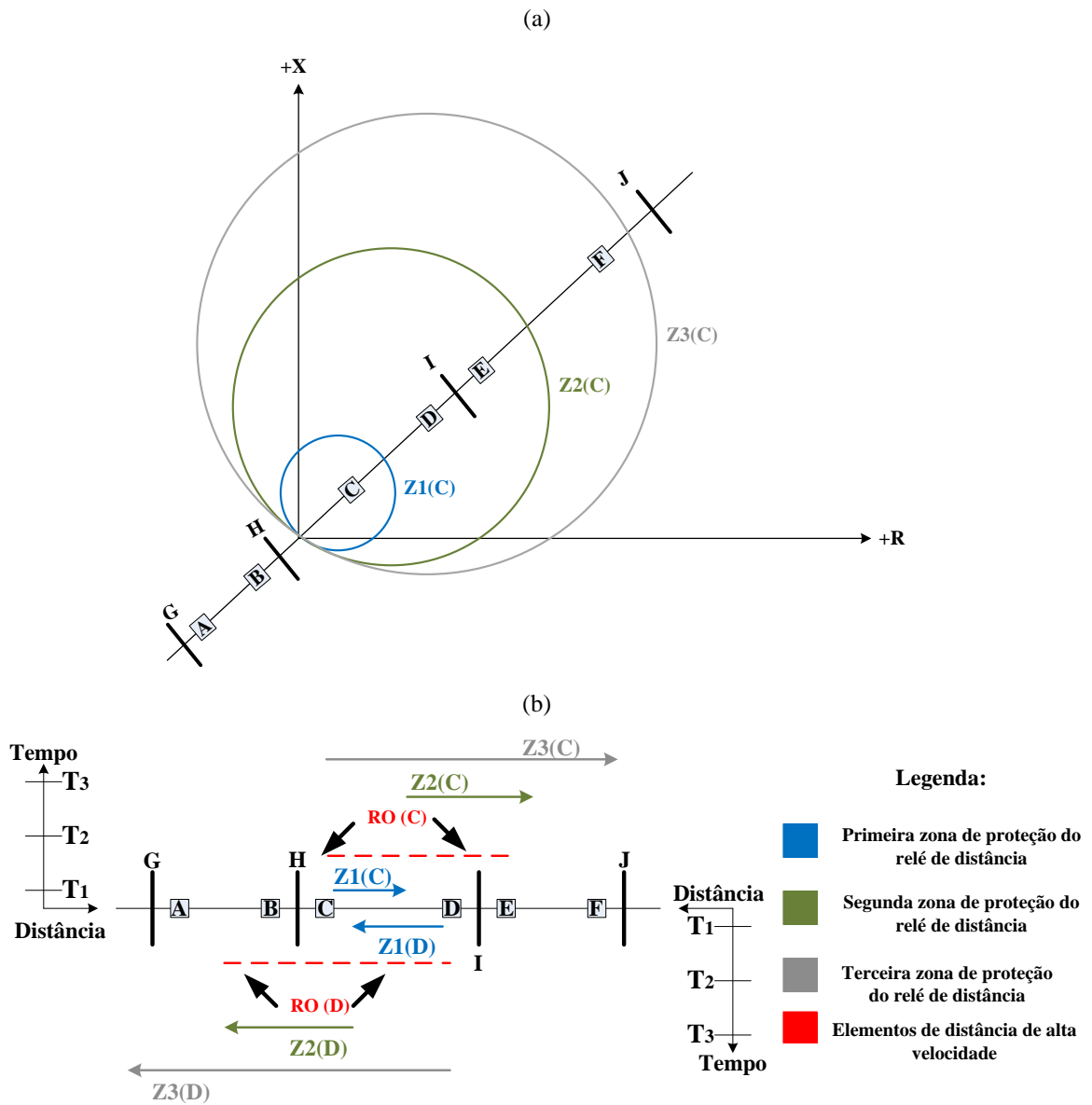
Fonte: Elaborado pelo autor.

No diagrama unifilar da Figura 2, as leituras de tensão e corrente são feitas pelos transformadores de tensão e corrente. A central de operações, através de dados da topologia e parâmetros elétricos do sistema realiza a simulação de coordenação ótima dos relés através do AG, que envia os parâmetros aos relés através de um sistema de comunicação. Nesse cenário se a impedância vista pelo relé alterara consideravelmente, através de alguma mudança na topologia do sistema, o relé não funciona mais corretamente com os parâmetros inicialmente gerados pelo AG e o sistema de relés deve novamente ser reparametrizado.

2.4 ESQUEMA DE PROTEÇÃO ADOTADO

O esquema de proteção piloto adotado, é caracterizado pelas distribuições das zonas de proteção representadas pela Figura 3. Nesse esquema utilizam-se relés de distância para proteção de faltas entre fases e terra, e relés de sobrecorrente temporizados para proteção de retaguarda de faltas a terra, (ANDERSON, 1998).

Figura 3 –(a) Elementos de distância para a TTSP. (b) Alcance das zonas de distância.

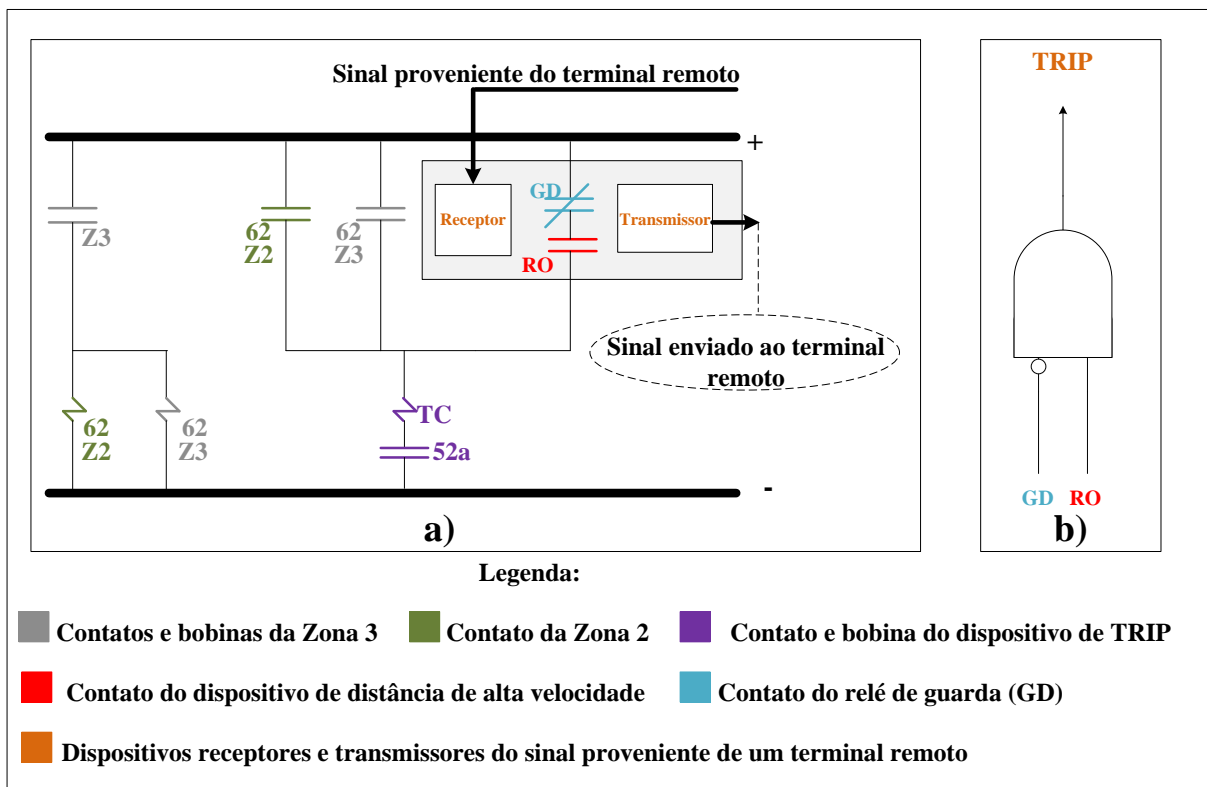


Fonte: (ANDERSON, 1998).

O esquema apresentado na Figura 3b possui elementos de distância de alta velocidade denominados de RO. Esses dispositivos são configurados para sobrepor o alcance do terminal remoto e agem na transferência do sinal de TRIP quando uma falta é detectada, e como dispositivos permissivos. Este esquema usa contatos de guarda GD (normalmente fechados), sendo que em situação de operação normal estes contatos são energizados (abertos). Na Figura 3a apresenta-se o alcance das zonas de proteção do relé C (local) e do relé D (remoto) de distância para este esquema. Em geral utiliza-se a zona 1 com alcance de até 80% da linha em que o relé esta instalado, a zona 2 com alcance de 100%, mais 50 % da linha adjacente, e zona 3 com 100% da linha protegida mais 100% da linha adjacente.

Para compreender melhor o funcionamento desses dispositivos, na Figura 4 apresenta-se o circuito de controle da transferência de TRIP de sobre alcance permissivo.

Figura 4- (a) lógica dos contatos; (b) lógica de estado sólido para Z1.



Fonte: (ANDERSON, 1998).

O sistema da Figura 4 atua como segue. Considere uma falta próxima de C na terminação da linha (Figura 3). O elemento de distância da Zona 1, C local, identifica a falta em sua zona de TRIP e envia um sinal de TRIP imediato aos disjuntores C. A terceira zona Z3, também identifica a falta, com isso o contato Z3, Figura 4, fecha, acionando as bobinas dos

contatos temporizados Z2 e Z3. Com relação à lógica de transferência de TRIP têm-se, em uma situação de operação normal, os contatos de guarda GD energizados (abertos), ou seja, sinal lógico de GD é “1”, e de RO “0”, com isso não há envio do sinal de TRIP (vide Figura 4b). Quando o elemento RO identifica uma falta, ele passa a possuir nível lógico “1”, simultaneamente, o transmissor do relé local troca a frequência do sinal piloto, da condição de guarda para TRIP. Ao receber o sinal de TRIP, o receptor do relé D remoto desenergiza a bobina GD que passa para sua condição de normalmente fechado, ou seja, o nível lógico de GD torna-se 0. Como o elemento RO do relé remoto também identifica a falta, ele realiza o mesmo processo de troca de frequência do sinal piloto, concluindo assim o circuito de *tripping*.

2.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo apresentaram-se conceitos gerais de proteção, cujos termos são essenciais para compreensão deste trabalho. Assim como uma breve introdução sobre proteção piloto e sua principal característica que consiste em utilizar meios de comunicação entre os relés que compõe a proteção. Detalhou-se o projeto de proteção proposto, bem como o esquema de transferência de *trip* de sobrealcance permissivo adotado.

3 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO ITERATIVO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Neste capítulo apresenta-se o ambiente de simulação dos sistemas elétricos analisados neste trabalho, chamado ATP. Uma das ferramentas utilizadas neste trabalho o ATPDraw, é um modo gráfico desse software. O ATP é usado em duas frentes, para cálculo de curtos-circuitos e para a análise dos parâmetros de ajuste e coordenação dos relés gerados pelo algoritmo genético no sistema elétrico testado. O usuário pode construir um circuito elétrico usando apenas o “*mouse*” e selecionando componentes através de um menu ilustrativo. Desta forma o programa gera um formato apropriado para que o usuário possa fazer simulações, modificações e plotar gráficos de correntes, tensões, dentre outras aplicações.

3.1 ATP

O *software* ATP surgiu em 1984 a partir do programa EMTP (*Eletro-Magnetic Transients Program*). Este *software* possui uma interface que permite ao usuário agregar módulos separados para a simulação de blocos de controle (*TACS- Transient Analysis of Control Systems*) ou elementos não lineares (através da linguagem MODELS), (PRINKLER; HØIDALEN, 2009).

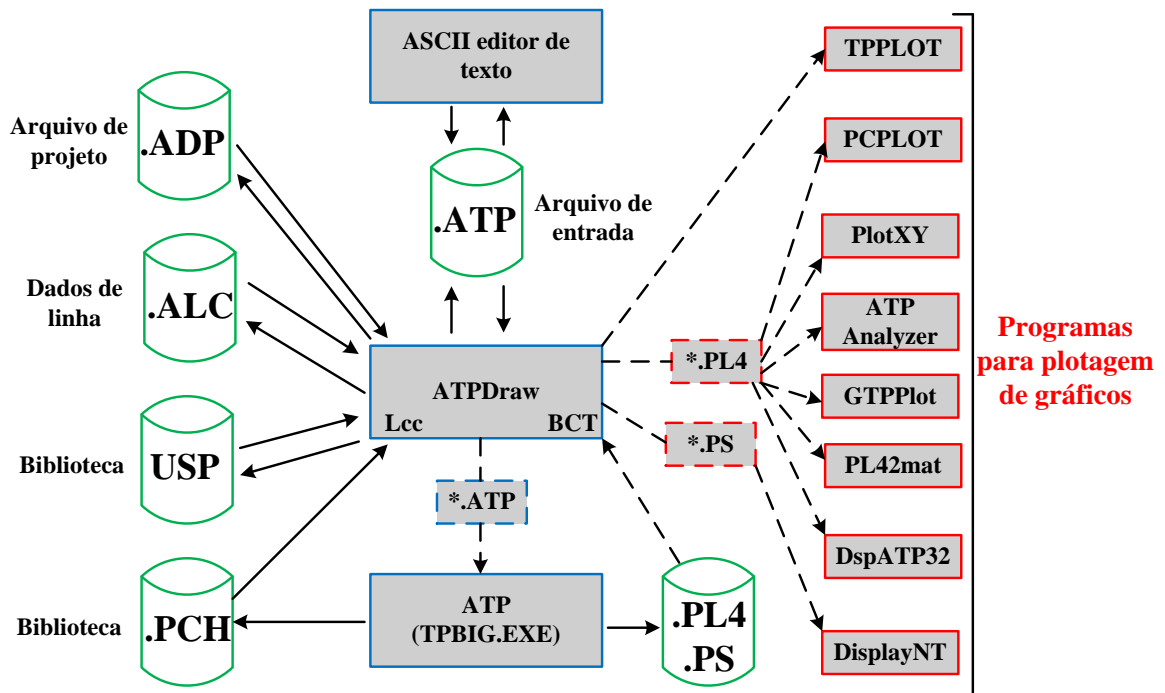
3.1.1 ATPDraw

O ATPDraw apresenta uma interface onde é possível visualizar o esquema elétrico que se pretende simular. As novas versões desse *software* possuem correções e *upgrades* que permitem ao usuário projetar LTs, transformadores, cabos com diversas variáveis, tornando as simulações mais realistas.

Quando o usuário salva um circuito no ATPDraw a extensão do arquivo é “.acp”, este arquivo contém toda a representação gráfica do projeto elétrico. Quando o processo de simulação é executado pelo usuário o ATPDraw gera os arquivos “.atp”, “.lis” e “.pl4”. A extensão “.atp” apresenta todas as informações dos dispositivos utilizados na simulação do projeto elétrico na forma de texto. Esse arquivo localiza-se no diretório escolhido pelo usuário em *ATP-DrawOptions/Files&Folders*. A extensão “.lis” apresenta além dos dados apresentados pelo .atp todos os resultados da simulação em detalhes, tensão, corrente, dados de fluxo de potência, dentre outros. A informação de uma simulação do ATP também é salva na extensão

“.pl4”, que pode ser acessada de modo *on-line* ou *off-line*, esta extensão pode ser usada para mostrar resultados do processo de simulação na forma gráfica, por exemplo. Apenas os sistemas que possuem compatibilidade com essa extensão podem acessar a mesma. A Figura 5 apresenta as inter-relações entre o ATPDraw e outros programas do ATP.

Figura 5 –Relação entre o ATPDraw e outros programas do ATP

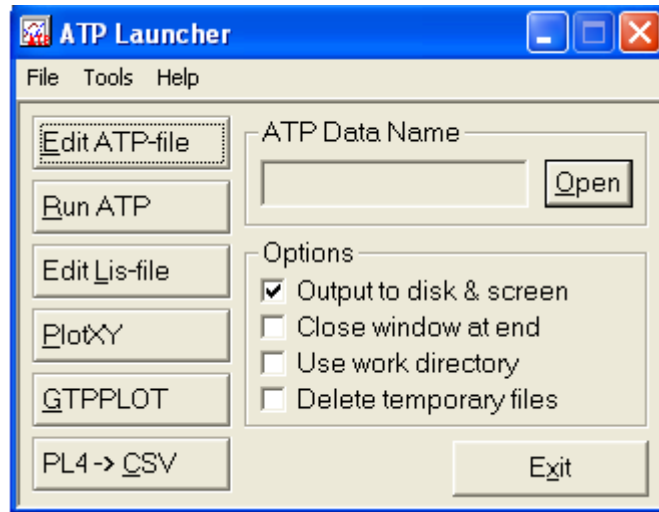


Fonte: (PRINKLER; HØIDALEN, 2009).

3.1.2 ATPLauncher

A ferramenta ATPLauncher é utilizada para controlar a execução do ATP em ambientes MS-Windows, simplificando o controle de comandos ao usuário para a execução de um arquivo .atp. O arquivo .atp pode ser escrito por um usuário experiente que conheça as regras da programação em um editor de texto, ou gerado pelo ATPDraw, como descrito anteriormente. Na Figura 6 ilustra-se a ferramenta ATPLauncher inclusa no ATP.

Figura 6 –Janela de execução do ATPLauncher



Fonte: (PRINKLER; HØIDALEN, 2009).

Através do botão *Open* abre-se um arquivo do “.atp”, que pode ser editado pelo botão *Edit ATP-File* ou executado por *Run ATP*. A opção *Edit Lis-file* é utilizada para editar o arquivo de resultados “.lis”. Os botões *PlotXY* e *GTPPLOT* executam programas auxiliares gráficos. A última opção *PL4 -> CSV* converte o arquivo de saída “.pl4” para CSV (CommaSeparatedValues). A ferramenta também apresenta opções de escolha para o usuário, se os resultados serão apenas armazenados ou mostrados na tela, se a janela de execução do ATP ficará aberta ou fechada após a simulação, utilizar o diretório de trabalho e deletar os arquivos temporários.

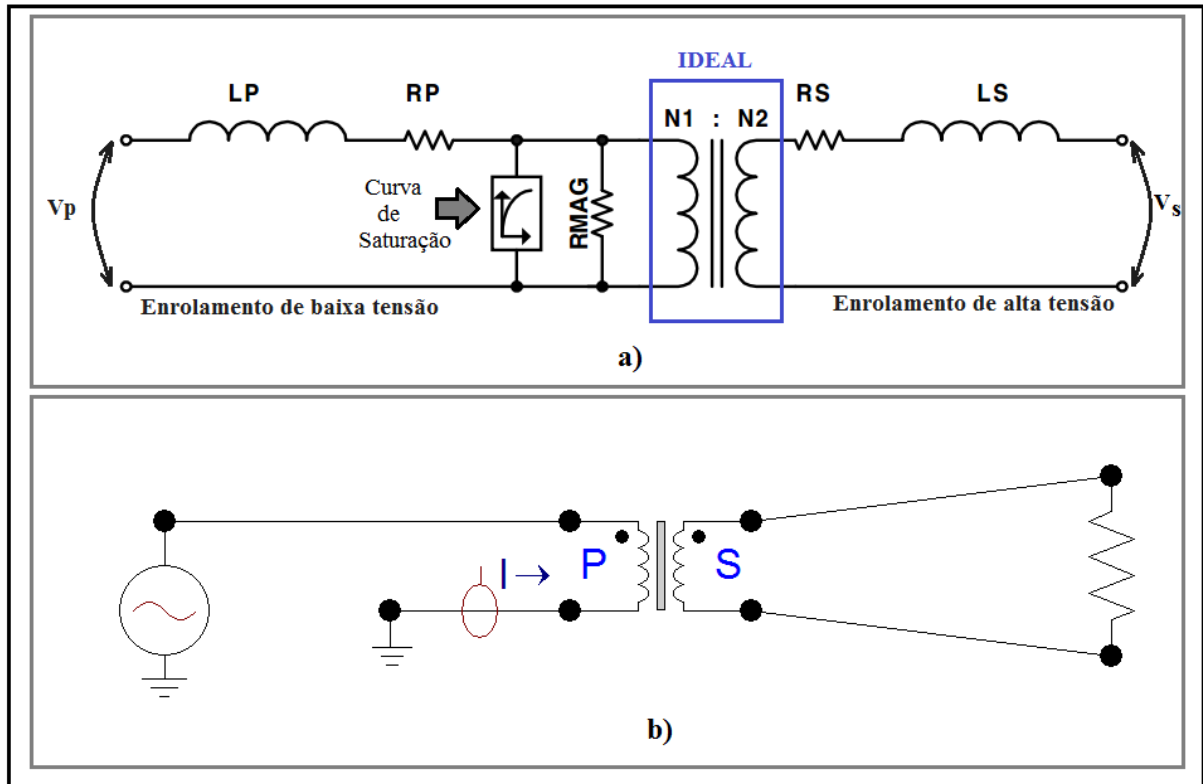
3.1.3 Modelagem de Transformadores de Corrente

De todos os dispositivos elétricos utilizados para simulação do sistema elétrico no ATPDraw, o único que não está pronto para uso é o transformador de corrente (TC). Os geradores, LTs, cargas, transformadores podem ser facilmente encontrados no menu do software, e seus parâmetros podem ser editados pelo usuário conforme os dados do SEP a ser testado, mais informações em (PRINKLER; HØIDALEN, 2009).

O TC pode ser utilizado para medições e proteção. Neste trabalho é usada apenas sua função de proteção. Esses dispositivos podem sofrer saturação, por isso devem ser dimensionados corretamente, evitando que o relé receba valores elevados de corrente.

O modelo do TC utilizado no ATP é elaborado através de um transformador saturável (*TRAFOS*), como é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - a) modelo do transformador monofásico saturável, b) Excitação do TC



Fonte: Elaborado pelo autor.

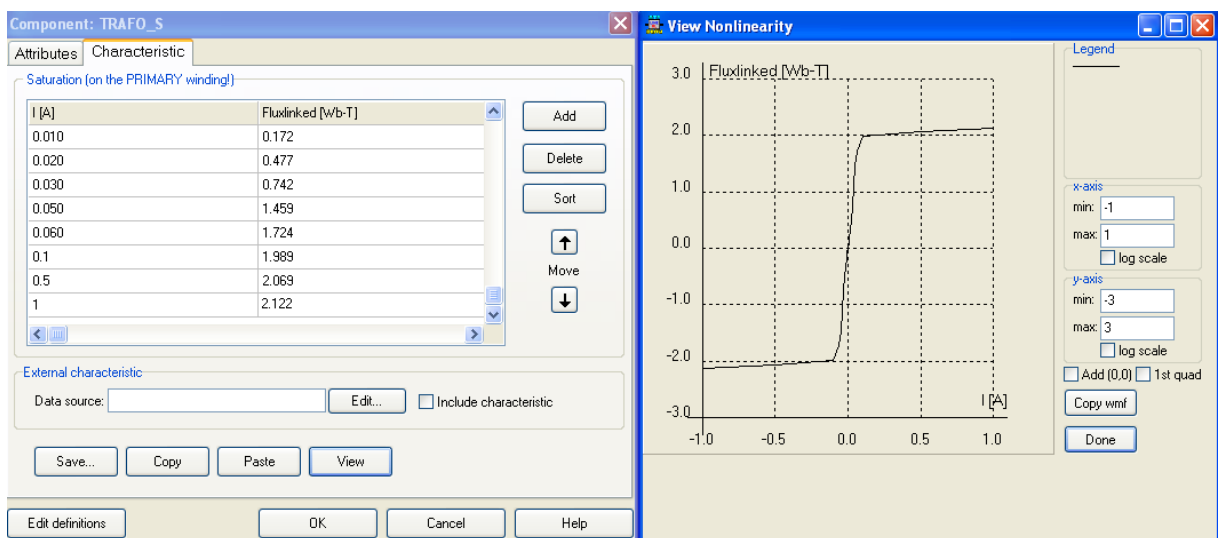
A Figura 7.a mostra o modelo de transformador monofásico utilizado para simular um TC. Este equipamento apresenta alguns parâmetros importantes que devem ser levados em conta na simulação do mesmo no circuito que for inserido, como Folkers (1999):

1. No enrolamento de alta tensão ajusta-se a resistência do secundário (R_S) para um valor igual a zero. Já a indutância do secundário (L_S) deve ser distinta de zero, para este trabalho, pois o enrolamento secundário sempre opera em situação de curto-circuito ou carregado com baixa impedância de carga;
2. A indutância do primário (L_P) é ajustada para zero, pois na prática a indutância do primário dos TCs é desprezível. Para ajustar o valor zero no *software* ATP, deve-se colocar um número muito pequeno, por exemplo, $10E-6$;
3. A resistência do primário (R_P) é ajustada no mesmo valor da resistência do enrolamento secundário dos TCs;
4. A resistência de magnetização (R_{MAG}) é ajustada com um valor infinito, considerando que na prática é um valor muito grande. No *software* ATP esse ajuste é realizado colocando o valor zero no local correspondente ao valor de R_{MAG} .

A curva de magnetização do TC é dada em geral na forma tensão x corrente ($V \times I$), pelos fabricantes do equipamento. O transformador apresentado pela Figura 7 representa essa curva na forma fluxo x corrente ($Wb\text{-turn} \times I$). Há a necessidade de converter os dados fornecidos pelo fabricante do TC, para a utilização deste modelo, (MIGUEL, 2011).

Para conversão de tensão para fluxo, divide-se a tensão por ω ($\omega = 2\pi \cdot f$), sendo f a frequência do sistema, no caso 60 Hz, (MIGUEL; 2011). Na Figura 8 ilustra-se um exemplo de curva de saturação do transformador saturável modelado no ATPDraw.

Figura 8 –Exemplo de curva de Saturação dos núcleos de um TC



Fonte: (MIGUEL, 2011).

Para montar o TC trifásico utilizam-se de três transformadores idênticos aos descritos acima. Através de uma ferramenta chamada *Compress* o usuário pode transformar o banco de transformadores monofásicos em um equipamento único com entradas e saídas personalizadas de acordo com a necessidade do usuário, (PRINKLER;HØIDALEN, 2009).

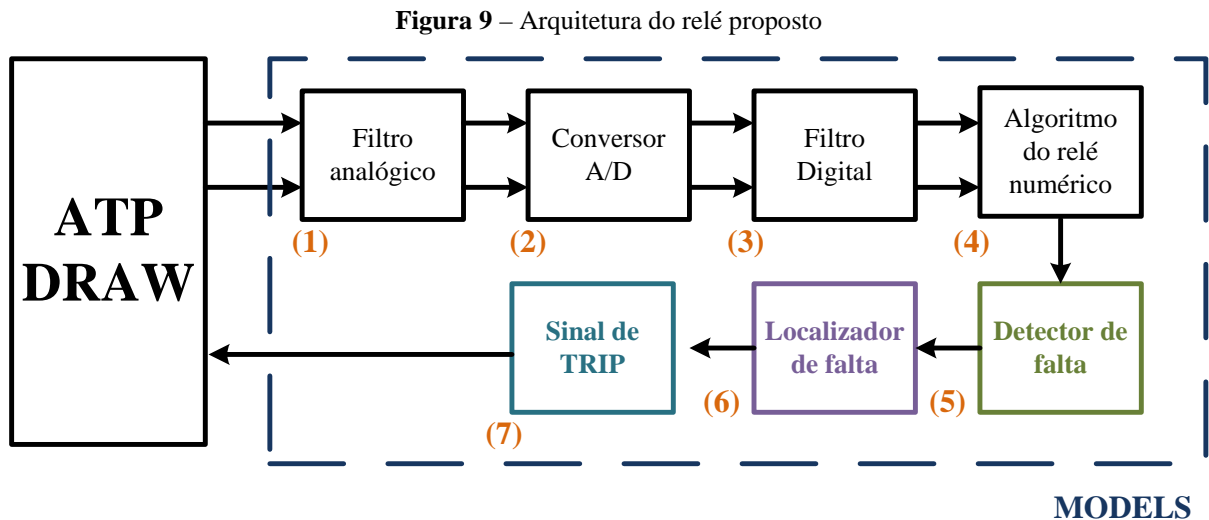
3.2 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou uma breve introdução histórica e técnica sobre o ATP. Realizaram-se explicações sobre as funcionalidades que o *software* possui e do significado das extensões geradas pelo programa. A representação do TC no ATP também foi discutida e apresentada.

4 ARQUITETURA DO RELÉ NUMÉRICO

Neste capítulo apresenta-se a arquitetura do relé numérico utilizada neste trabalho com base no trabalho de Kim et al. (2000), e detalha-se cada etapa do projeto deste dispositivo.

Na Figura 9 está apresentada a arquitetura do relé numérico, que foi implementada no ATP através de MODELS.



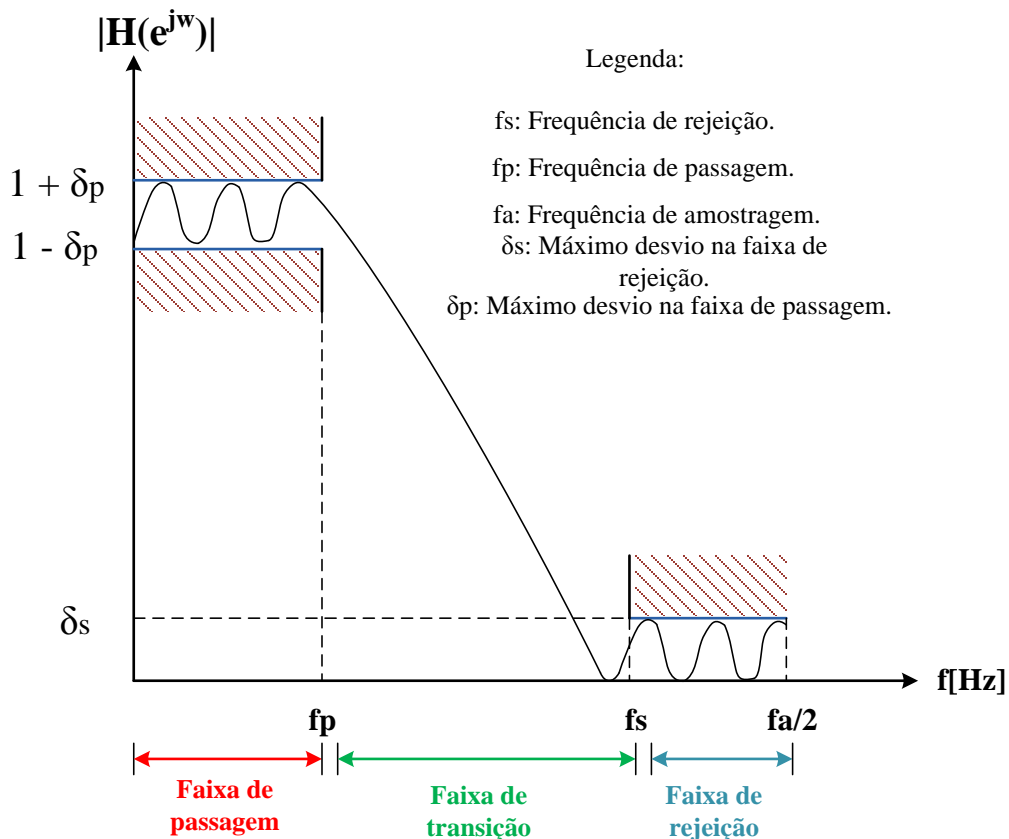
Fonte: (KIM et al., 2000).

A seguir cada bloco que compõe o relé numérico, Figura 9, é detalhado.

4.1 FILTRO ANALÓGICO

O filtro analógico conhecido como *anti-aliasing* é usado na prática, pois os sinais podem não ter banda limitada. Este filtro atenua frequências acima da frequência de Nyquist ($\Omega_a/2$), sendo Ω_a a frequência de amostragem em rad/s. Em outras palavras o filtro limita sinais analógicos de entrada em uma frequência de no máximo até a metade da frequência de amostragem, para que não haja *aliasing*. Foi projetado um filtro analógico Butterworth, de característica passa-baixas no MATLAB, de segunda ordem com frequência de corte de 84,35 Hz. Isto significa que qualquer amostragem feita a partir de 170 Hz ou superior, garante que não ocorrerá sobreposição do espectro do sinal (*aliasing*). Como o filtro não é ideal os sinais de saída, tensão e corrente sofrem uma distorção de fase e amplitude. Na Figura 10 apresentam-se os parâmetros do filtro passa-baixas.

Figura 10 –Especificações do filtro passa-baixas analógico



Fonte:(OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999).

O filtro apresentado na Figura 10 foi projetado em MATLAB, utilizando as funções *buttord* e *butter*, respectivamente. A função *buttord*, calcula a mínima ordem de um filtro digital ou analógico do tipo Butterworth, utilizando-se das frequências de passagem, rejeição, e dos desvios na faixa de passagem e faixa de rejeição (Figura 10). A função *butter*, projeta filtros digitais passa-baixas, passa-banda e passa-alta, e filtros analógicos Butterworth, ou seja encontra os parâmetros apresentados em (1), utilizando um modelo matemático de um sistema físico do tipo entrada/saída (*State-space*) e equações diferenciais, através da ordem do filtro encontrada por *buttord*. A ordem do filtro gerada pela função *buttord* é dois e os parâmetros da equação (1) gerados por *butter* são: $y(1) = 0$, $y(2) = 0$, $y(3) = 568520$, $x(2) = 1066,3$ e $x(3) = 568520$. Esta equação é implementada em MODELS, através da instrução CLAPLACE(Y/X).

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{y(1) \cdot s^n + y(2) \cdot s^{n-1} + \dots + y(n+1)}{s^n + x(2) \cdot s^{n-1} + \dots + x(n+1)} \quad (1)$$

em que s é uma variável da transformada de Laplace e $H(s)$ a função de transferência do filtro analógico da entrada $X(s)$ e saída $Y(s)$.

4.2 CONVERSÃO A/D

A conversão A/D consiste no processo da amostragem. Em geral os sinais são amostrados nas taxas de 60 (uma amostra por ciclo), 120 (duas amostras por ciclo), 240 Hz (4 amostras por ciclo), e assim por diante, seguindo adiretriz 2^n , com n variando de 0 a número de pontos por ciclo. Os sinais analógicos de entrada (tensão e corrente) são limitados pelo filtro analógico (*anti-aliasing*), na etapa anterior. Portanto deve-se usar uma taxa de amostragem de no mínimo 240 Hz, ou seja, o relé pode fazer no mínimo 4 amostras por ciclo, respeitando o teorema de Nyquist. Para realizar essa etapa em MODELS se utiliza a diretiva TIMESTEP MIN: $1/fa$, sendo f_a a frequência de amostragem.

4.3 FILTRO DIGITAL

Quando o SEP sofre uma falta, componentes anormais de tensão e corrente surgem devido as componentes de alta frequência e da componente DC. O filtro *anti-aliasing* consegue eliminar a maioria das componentes de alta frequência, porém não é capaz de amenizar ou eliminar o efeito da componente DC no sinal. Para resolver esse problema é utilizado um filtro digital representado pelas equações (2) e (3) que remove essa componente, (KIM et al., 2000).

$$x[m] = \sum_{n=1}^{\infty} x[n] \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{M}\right) + A \cdot \exp\left(\frac{-m \cdot \Delta t}{\tau}\right) \quad (2)$$

$$y[m] = x[m] - \frac{x[m-1]}{\exp(\Delta t/\tau)} \quad (3)$$

em que, $x[m]$ representa o sinal da saída do conversor A/D com a componente DC (situação de falta), $y[m]$ é a saída do filtro DC, Δt é o intervalo de amostragem, τ a constante de tempo e M é o número de amostras por segundo.

O próximo passo é calcular os fasores de tensão e corrente utilizando a Transformada Discreta de Fourier (DFT - do inglês *Discrete Fourier Transform*). Utiliza-se a DFT com

M=8 amostras por segundo na equação (4). As magnitudes e as fases são obtidas segundo as equações (5) e (6),(OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999).

$$Y[k] = \sum_{m=0}^{M-1} y[m].e^{\frac{-2\pi j}{M}.k.m} \quad (4)$$

$$|Y[k]| = \sqrt{\text{Re}(Y[k])^2 + \text{Im}(Y[k])^2} \quad (5)$$

$$\varphi[k] = \text{arctg}\left(\frac{\text{Im}(Y[k])}{\text{Re}(Y[k])}\right) \quad (6)$$

4.4 ALGORITMO DO RELÉ NUMÉRICO

O algoritmo proposto simula as funções de distância do tipo MHO (vide Figura3), e as funções de sobrecorrente do padrão IEC (*InternationalElectrotechnicalCommission*). A vantagem de utilizar elementos do tipo MHO no esquema de transferência de trip de sobre alcance permissivo (TTSP), é a cobertura da segunda zona, que com essa característica é superior à primeira zona.

As funções de distância apresentam três zonas de proteção baseadas no esquema TTSP. A primeira zona (Z1) é configurada para proteger até 80% da linha onde o relé está instalado, atuando instantaneamente no caso de curtos-circuitos. A segunda zona (Z2) é ajustada para sobre-alcance e atinge de 20 a 50 % do comprimento da linha adjacente, essa zona é temporizada e possui atuação de 250 ms. A terceira zona (Z3) também ultrapassa o comprimento da linha do relé atingindo 100% da linha adjacente e possui tempo de atuação de 450 ms. Esta zona é ajustada como retaguarda atuando em contingências não eliminadas nas seções de linhas adjacentes, (AREVA, 2002). Para o relé numérico as funções de distância são responsáveis pelas faltas entre fases.

As funções de sobrecorrente seguem o padrão IEC, o relé numérico disponibiliza 4 funções sendo elas: inverso padrão; muito inverso; extremamente inverso; e tempo extenso (faltas monofásicas). Essas funções são utilizadas como proteção de retaguarda para faltas fase-terra. Mais detalhes sobre o funcionamento dessas funções são apresentados no Capítulo 5.

4.5 DETECTOR DE FALTA

Esse processo consiste em detectar o tipo de falta. Na literatura encontram-se diversos trabalhos que tratam de técnicas para detecção do tipo de faltas que utilizam as mais diversas técnicas – lógica nebulosa, redes neurais artificiais, inteligência artificial, etc. Neste trabalho para detectar o tipo de falta utiliza-se a proposta apresentada em (ADU, 2002). Para utilizar o método é necessário decompor os fasores das correntes em componentes simétricas. Em seguida são feitas comparações entre as magnitudes das componentes de sequência zero e positiva, entre as magnitudes de sequência negativa e positiva e entre os ângulos das componentes de sequência positiva e negativa. As equações (7) e (8) são utilizadas para esta finalidade, e de acordo com Das e Reddy (2005) pode-se estabelecer as relações apresentadas pela Tabela 1.

$$\begin{aligned} ang_A &= |Arg(I_{a1f}) - Arg(I_{a2f})| \\ ang_B &= |Arg(I_{b1f}) - Arg(I_{b2f})| \\ ang_C &= |Arg(I_{c1f}) - Arg(I_{c2f})| \end{aligned} \quad (7)$$

$$R_{of} = \left| \frac{I_{a0f}}{I_{a1f}} \right| \quad e \quad R_{2f} = \left| \frac{I_{a2f}}{I_{a1f}} \right| \quad (8)$$

Tabela 1 – Relações para classificação de faltas.

	Tipo de falta	Ang_A (°)	Ang_B (°)	Ang_C (°)	R_{of}	R_{2f}
1 Fase	a-g	0 - 60	120 - 180	60 - 120	0,22 - 1,20	0,22 - 1,20
	b-g	60 - 120	0 - 60	120 - 180	0,22 - 1,20	0,22 - 1,20
	c-g	120 - 180	60 - 120	0 - 60	0,22 - 1,20	0,22 - 1,20
2 Fases	a-b	0 - 60	60 - 120	120 - 180	0 - 0,22	0,22 - 1,20
	b-c	120 - 180	0 - 60	60 - 120	0 - 0,22	0,22 - 1,20
	c-a	60 - 120	120 - 180	0 - 60	0 - 0,22	0,22 - 1,20
	a-b-t	0 - 60	60 - 120	120 - 180	0,22 - 1,20	0,22 - 1,20
	b-c-t	120 - 180	0 - 60	60 - 120	0,22 - 1,20	0,22 - 1,20
	c-a-t	60 - 120	120 - 180	0 - 60	0,22 - 1,20	0,22 - 1,20
3 Fases	a-b-c	-	-	-	0 - 0,22	0 - 0,22

Fonte: (DAS; REDDY ,2005).

4.6 LOCALIZADOR DE FALTA

Para utilizar corretamente o localizador de faltas, é necessário que todas as etapas anteriores já tenham sido adequadamente desenvolvidas. Essa ferramenta é utilizada pelo relé numérico para identificar, em uma situação de falta, qual a distância do relé ao ponto da falta. Assim, o relé é capaz de identificar a zona de ocorrência da falta.

Segundo Schweitzer (1990), para localizar precisamente todos os tipos de falta, deve-se realizar as medições das tensões de fase e das correntes em cada fase, pois a localização de faltas entre fases torna-se possível a partir da disponibilidade dos dados das tensões de linha. Na Tabela 2 apresenta-se uma forma prática para calcular a impedância aparente de sequência positiva durante a falta.

Tabela 2–Impedância de falta de sequência positiva para todos os tipos de falta

Tipo de curto-circuito	Equação da impedância de sequência positiva (dist. Z_{1L})
Monofásica	$AT: Z_{1L} = \frac{V_A}{(I_A + k.I_r)}$ $BT: Z_{1L} = \frac{V_B}{(I_B + k.I_r)}$ $CT: Z_{1L} = \frac{V_C}{(I_C + k.I_r)}$
Bifásica	$AB \text{ ou } ABT: Z_{1L} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}}$ $BC \text{ ou } BCT: Z_{1L} = \frac{V_{BC}}{I_{BC}}$ $CA \text{ ou } CAT: Z_{1L} = \frac{V_{CA}}{I_{CA}}$
Trifásica	Qualquer equação referente à faltas bifásicas

Fonte: (SCHWEITZER, 1990).

Da Tabela 2, tem-se:

I_r = a corrente residual ($I_A + I_B + I_C$)

$$k = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3 \cdot Z_{1L}}$$

Z_{0L} = impedância de sequência zero da linha

Z_{1L} = impedância de sequência positiva da linha

dist = distância por unidade para a falta (exemplo, distância para a falta em Km dividido pelo comprimento total da linha em Km)

Uma vez calculada a impedância Z_{1L} , a distância da falta é obtida dividindo o valor de Z_{1L} pela impedância total da linha e multiplicando o resultado pelo comprimento da linha. Esse método elimina os efeitos da resistência de falta sobre a condição de baixo carregamento de carga. Para superar essa deficiência apresentam-se na literatura os seguintes métodos:

Takagiet al., 1982, fornecem um método para calcular a distância para a falta que leva em consideração os valores do cálculo do fluxo de carga pré-falta para reduzir os efeitos da resistência de falta.

Schweizer, 1982, propõe um algoritmo que utiliza as informações das duas extremidades da linha, para determinar a localização da falta. A vantagem deste método é que não há necessidade de conhecer a impedância de sequência zero da linha, parâmetro que nem sempre é fornecido como dado para a simulação do SEP. Esse método não considera os efeitos do acoplamento mútuo de sequência zero entre as linhas. Essa foi a metodologia utilizada neste trabalho. A equação (9) caracteriza esse método.

$$\text{dist} = \frac{V_s - V_r + Z \cdot I_r}{Z \cdot (I_s + I_r)} \quad (9)$$

Onde:

Z = Impedância total da linha

V_s = Tensão na extremidade “s” da linha

V_r = Tensão na extremidade “r” da linha

I_s = Corrente que sensibiliza o relé pela extremidade “s” da linha

I_r = Corrente que sensibiliza o relé pela extremidade “r” da linha

4.7 SINAL DE TRIP

O sinal de TRIP é enviado do relé numérico aos disjuntores, caso haja alguma contingência na linha. Os disjuntores são representados por chaves no ATP, que isolam a LT do SEP caso a falta seja detectada.

4.8 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou a arquitetura do relé numérico desenvolvido na linguagem MODELS do ATP. Cada ferramenta utilizada pelo relé numérico foi abordada separadamente, explicando o funcionamento de cada bloco formando um conjunto de funcionalidades essenciais para o bom funcionamento do relé.

5 ESTUDO DA COORDENAÇÃO DOS RELÉS

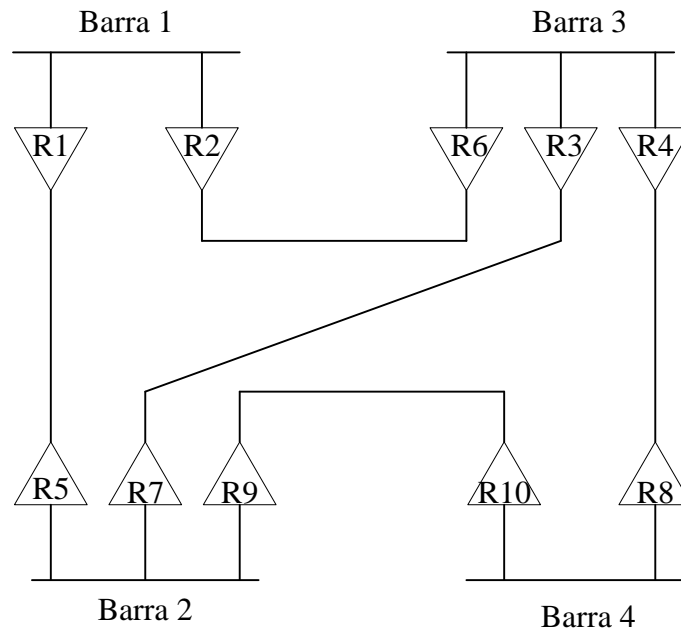
Neste capítulo aborda-se, inicialmente, o problema da coordenação de relés para sistemas malhados, onde se apresenta um modelo matemático para efetuar a coordenação de relés de sobrecorrente e de distância, utilizando uma técnica de solução com algoritmo genético dedicado. Outros aspectos relevantes para a metodologia proposta são considerados neste capítulo referentes à determinação dos pares de relés que devem atuar como proteção principal e retaguarda, baseado no conceito da matriz de incidência de rede.

5.1 INTRODUÇÃO

A escolha da proteção piloto foi justificada pelo cenário em que este projeto foi proposto no Capítulo 2, ou seja, para sistemas de extra-alta tensão. A coordenação de relés de sobrecorrentes direcionais com relés de distância foi desenvolvida considerando as particularidades de sistemas malhados, onde é necessária a utilização de dispositivos com características direcionais. Os relés de distância são os mais usados na prática para proteção de linhas de transmissão, por possuírem características que favorecem a proteção independente do comprimento da linha, e são inerentemente direcionais. Os relés de sobrecorrente direcionais são usados por terem a característica de um relé de sobrecorrente comum, que pode ser mais sensível às faltas que envolvem a terra do que o relé de distância do tipo MHO, e por apresentarem a característica direcional essencial em sistemas onde a corrente possui diversas direções.

O processo de coordenação é muito complexo para sistemas malhados, pois os relés de sobrecorrentes devem ser direcionais, e cada par de relés deve ser coordenado. Além disso, nos pontos onde há fontes externas interconectadas à malha, os relés pertencentes a esta interconexão devem ser coordenados com os localizados no interior da malha. A coordenação é feita por meio de uma movimentação a montante e a jusantena malha, que precisa ser orientada de alguma maneira.

Para ilustrar o problema da coordenação, considere o sistema apresentado pela Figura 11, com 4 barras e cinco linhas. Há relés direcionais instalados em cada extremidade das linhas, e cada relé desempenha a função de proteção principal e retaguarda.

Figura 11 – Sistema elétrico malhado.

Fonte: (KAWAHARA; SASAKI; SUGIHARA, 1997).

Percorrendo a malha do circuito apresentado na Figura 11, pode-se obter 16 pares de relés, descritos por primário(P) / retaguarda (R), visto que cada relé apresenta característica primário e retaguarda, sendo eles, (R7/R1), (R9/R1), (R3/R2), (R4/R2), (R5/R3), (R9/R3), (R10/R4), (R2/R5), (R1/R6), (R4/R7), (R6/R7), (R3/R8), (R6/R8), (R8/R9), (R5/R10), (R7/R10). Para parametrizar o relé 1, por exemplo, deve-se ajustar o relé 6 do par P/R (R1/R6). Contudo os relés 7 e 8 são escolhas similares para pares P/R (R6/R7) e (R6/R8), estes relés devem satisfazer os intervalos de coordenação para outros pares P/R (R4/R7) e (R3/R8) devido a malha do sistema.

Para realizar os ajustes dos relés de forma correta e coordená-los de forma ótima, é necessário que o problema seja formulado matematicamente e haja um processo de coordenação inicial.

5.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A função objetivo apresentada em (10) representa o problema de coordenação ótima de relés de sobrecorrentes de terra e de distância proposto neste trabalho, caracterizado pelo esquema de transferência de TRIP de sobrealcance permissivo. Essa equação considera o tempo de operação dos relés de sobrecorrente e os pares de relés primários e retaguarda. A função de sobrecorrente é utilizada apenas como retaguarda para faltas fase-terra.

$$FO = \min \left[\alpha \cdot \sum_{i=1}^{nr} t_{opi} + \beta \cdot \sum_{i=1}^{npar} \left| \Delta t_{sc-D2,i} - |\Delta t_{sc-D2,i}| \right| \right. \\ \left. + \gamma \cdot \sum_{i=1}^{npar} \left| \Delta t_{sc-D3,i} - |\Delta t_{sc-D3,i}| \right| \right] \quad (10)$$

$$\Delta t_{sc-D2,i} = \sum_{j=1}^{nr} r_{ij} \cdot T_{opj} - \sum_{j=1}^{nr} p_{ij} \cdot TZ2_j - CTI_j \quad (11)$$

$$\Delta t_{sc-D3,i} = \sum_{j=1}^{nr} r_{ij} \cdot T_{opj} - \sum_{j=1}^{nr} p_{ij} \cdot TZ3_j - CTI_j \quad (12)$$

$$CTI = \left[\frac{2 \cdot E_r + E_{TC}}{100} \right] \cdot t + t_{disj} + t_o + t_s \quad (13)$$

O primeiro termo da função, apresentado na equação (10), representa o tempo de operação dos relés de sobrecorrente. Existem basicamente três maneiras de coordenar relés de sobrecorrente, sendo por tempo, corrente ou ambos. A coordenação utilizando somente a caracterização por tempo possui a desvantagem de que quanto mais severa a falta, maior é o tempo de isolamento da mesma. Já a coordenação feita por corrente apenas somente é viável quando há um valor grande de impedância no circuito compreendido entre os dois disjuntores.

O segundo termo da FO, representa a restrição de coordenação entre o tempo da segunda zona do relé de distância (TZ2) e o tempo de operação do relé de retaguarda de sobrecorrente (TOP). Se o AG gerar um valor negativo correspondente à operação $\Delta t_{sc-D2,i}$, representada por (11), isto significa que o TOP (PR) é inferior a TZ2 (PP), significando uma coordenação imperfeita. Apenas se (11) resultar em um valor positivo, o segundo termo não penaliza a FO, e com isso os pares ficam coordenados adequadamente. O terceiro termo da FO representa a restrição de coordenação entre o tempo da terceira zona do relé de distância (TZ2) e o tempo de operação do relé de retaguarda de sobrecorrente (TOP), e apresenta a mesma característica da segunda restrição.

Os termos de penalidades α , β , γ da função objetivo representados em (10) são fatores utilizados pelo AG. O parâmetro α está relacionado com o tempo de operação dos relés de sobrecorrente, quanto maior α maiores as chances do AG gerar indivíduos com menor tempo de operação. Os parâmetros β e γ possuem relação com a coordenação da segunda e terceira zona com a função de sobrecorrente (retaguarda), quanto maiores esses fatores maiores as chances do AG encontrar indivíduos que respeitem a coordenação.

A segunda parte da função apresentada em (10), a equação (11) pode ser escrita na forma matricial compacta de acordo com a equação (14).

$$[\Delta t_{sc-D2}]_{ix1} = \{[R]_{ixj} \cdot [Top]_{jx1} - [P]_{ixj} \cdot [TZ2]_{jx1}\} - [CTI]_{jx1} \quad (14)$$

A terceira parte da equação (10), a equação (12), pode ser escrita como:

$$[\Delta t_{sc-D3}]_{ix1} = \{[R]_{ixj} \cdot [Top]_{jx1} - [P]_{ixj} \cdot [TZ3]_{jx1}\} - [CTI]_{jx1} \quad (15)$$

Esta representação matricial facilita a implementação da técnica de solução deste problema de otimização.

A equação (13) fornece o parâmetro CTI onde:

- E_r : erro de ajuste de tempo do relé;
- E_{TC} : erro na relação do TC (%);
- t : tempo de operação do relé mais próximo(s) à(s) falta(s);
- t_{disj} : tempo de interrupção do(s) disjuntor(s);
- t_o : tempo de inércia do(s) relé(s);
- t_s : margem de segurança (s).

Em AREVA (2002), encontra-se uma tabela com valores usuais para CTI, e que são apresentados na Tabela 3.

Tabela3–Valores usuais de CTI.

	Tecnologia do relé			
	Eletromecânico	Estático	Digital	Numérico
Erro de ajuste de tempo comum (%)	7,5	5	5	5
Tempo de inércia (s)	0,05	0,03	0,02	0,02
Margem de segurança (s)	0,1	0,05	0,03	0,03
CTI usual (s)	0,4	0,35	0,3	0,3

Fonte: (AREVA, 2002).

O tempo de operação dos relés de sobrecorrente é apresentado pela equação (16), (AREVA, 2002).

$$t_{opi} = TMS_i \cdot \left(\frac{a}{I_i^n - c} + b \right) \quad (16)$$

$$I_i = I_{cci}/I_{aji} \quad (17)$$

Onde TMS_i é um fator multiplicativo de ajuste de tempo. O termo I_i representa o múltiplo da corrente, sendo a relação da corrente de curto circuito I_{cci} (que sensibiliza o relé) e a corrente de ajuste (I_{aji}). Os termos a, b, c e n caracterizam diversos modelos IEC de relés de sobrecorrente, apresentados pela Tabela 4.

Tabela 4- Valores IEC, para relés de sobrecorrente.

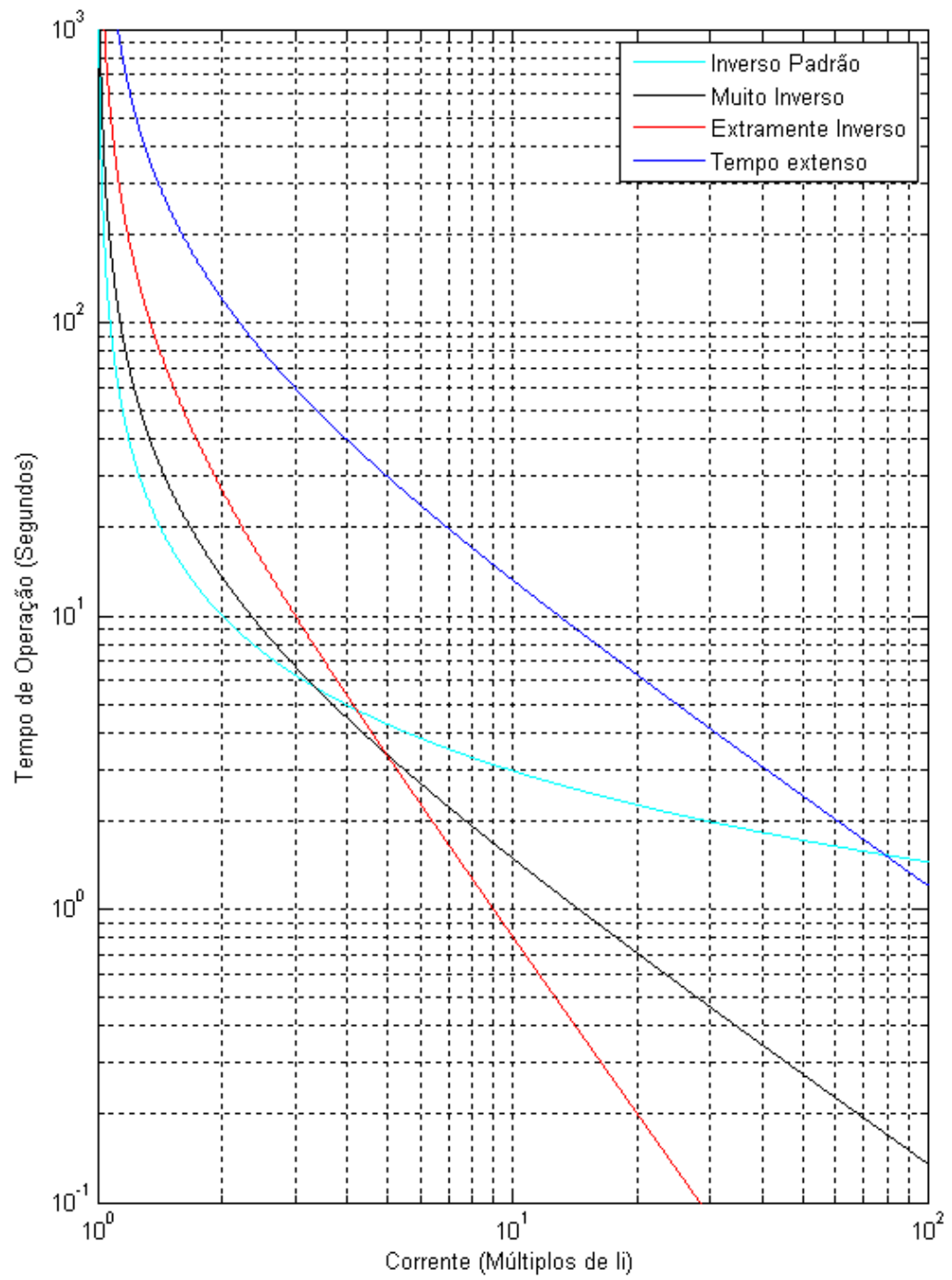
Tipo	Tipo (n°)	Padrão	a	b	n
Inverso padrão	3	IEC	0,14	0	0,02
Muito inverso	2	IEC	13,5	0	1
Extremamente inverso	1	IEC	80	0	2
Tempo extenso (faltas monofásicas)	4	IEC	120	0	1

Fonte: (AREVA, 2002).

Os relés de sobrecorrente de tempo inverso (*IDMT* do inglês *inverse definite mean time*) são os mais usados sendo que o tempo de operação do dispositivo é inversamente proporcional ao nível da corrente que o sensibiliza. Nesse projeto considera-se a característica direcional.

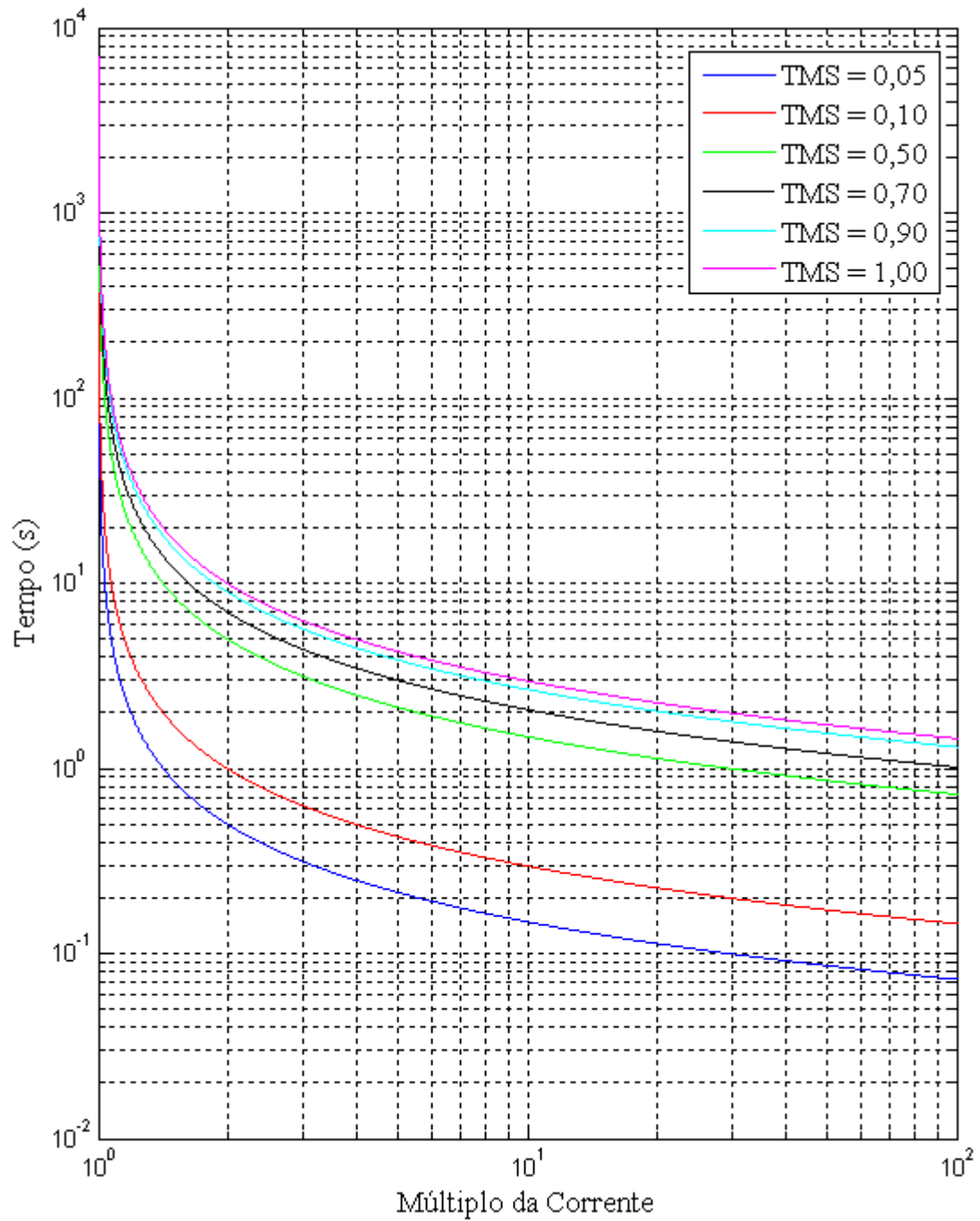
Segundo Anderson (1998), em geral, o relé inverso padrão responde com uma margem satisfatória à maioria dos curtos-circuitos, porém pelos testes realizados, dependendo da intensidade da falta, outros tipos de relés apresentaram menor tempo de atuação, considerando o mesmo TMS e I_{aji} . Na Figura 12 ilustra-se como a variação pelo múltiplo da corrente afeta o tempo de operação de cada relé. No caso que o TMS é constante e unitário, varia-se apenas o múltiplo da corrente I_i , para verificar as diferentes características dos relés apresentados na Tabela 4. Na Figura 13 é apresentado um relé padrão inverso onde varia-se apenas o TMS, para que se possa verificar o efeito dessa variável na curva característica do relé. Na Figura 12 verifica-se que o tempo de operação do relé vai depender do múltiplo da corrente, ou seja, do valor da corrente que sensibiliza o relé e do valor de corrente a ser ajustado. Dependendo da intensidade e do tipo da falta um relé é mais apropriado que outro sendo este critério determinado através do modelo matemático proposto para o problema de coordenação.

Figura 12 – Curva dos relés de sobrecorrente, referentes a Tabela 3, para TMS=1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura13 –Curvas do relé inverso padrão variando TMS.



5.3 TÉCNICA DE SOLUÇÃO

A técnica de solução proposta para solução do problema é um algoritmo genético simples dedicado. O algoritmo genético foi escolhido neste trabalho pela sua facilidade em resolver problemas não lineares, baixo tempo de processamento para problemas com poucas restrições e facilidade de implementação.

O algoritmo genético trabalha com um conjunto de indivíduos (soluções codificadas) que constituem uma população. Cada uma dessas soluções é conhecida como cromossomos. Tal população é capaz de evoluir devido à aplicação dos operadores genéticos: seleção, recombinação e mutação. Os indivíduos mais fortes sobrevivem durante o processo de otimização propiciando o surgimento de melhores configurações com indivíduos mais evoluídos, levando a possíveis soluções ótimas para o problema. As características específicas de um indivíduo determinam sua capacidade de sobrevivência e, em última instância, essa capacidade específica é determinada pelo seu conteúdo genético, isto é, pela sua unidade elementar chamada na biologia de gene. A seleção natural leva à sobrevivência dos indivíduos melhores dotados e no processo de reprodução, esses indivíduos transmitem aos descendentes os melhores genes; por outro lado, os indivíduos menos dotados morrem no processo de competição por espaço, alimento, etc. Assim, o princípio da seleção natural permite gerar descendentes somente dos indivíduos melhores dotados. A evolução acontece fundamentalmente entre, o processo de recombinação genética que acontece na duplicação e separação de células reprodutivas gerando uma metade de célula (por exemplo, espermatozóide), e na reprodução em que duas metades de células se juntam (espermatozóide e núcleo) formando o zigoto. Nesse processo ocorre uma troca de material genético, que pode levar à geração de um indivíduo muito bem dotado. Nos algoritmos genéticos todo o processo de otimização pode ser descrito pelos seguintes passos:

- i.* Representação em termos de cromossomo das propostas de soluções (configurações) assumidas para o problema em estudo;
- ii.* Parâmetros de controle do algoritmo: tamanho da população, número de gerações, taxas relativas dos operadores genéticos, etc;
- iii.* Geração da população inicial formada por indivíduos representando um conjunto de possíveis soluções (configurações) do problema;
- iv.* Seleção das configurações candidatas a permanecerem na população: classificar cada configuração pelo valor de sua correspondente função de adaptação. Assim, os elementos melhores classificados neste processo têm maior chance

de participar na geração dos elementos da nova população, que é gerada através da aplicação dos operadores de recombinação e mutação;

- v. Operadores genéticos (recombinação e mutação) que gerem, produzam e/ou alterem a composição dos cromossomos durante a reprodução.

Para resolver o problema da coordenação em sistemas malhados é necessário um procedimento inicial, onde através de regras determinam-se os pares de relés principais (primários) e retaguarda (*backup*) a serem ajustados com eficiência. Esta etapa é chamada de *Break Point Set* (BPS), (BERNARDES, 2013).

Este procedimento é inicializado com a leitura da topologia da rede, e em seguida a etapa de determinação dos pares de relés principais e de retaguarda (P/R) é efetuada baseada na metodologia proposta em (BRAGA; SARAIVA, 1996).

Para se determinar os pares P/R, constrói-se uma matriz de incidência modificada denominada de Aa , representada pela expressão (18).

$$Aa = [A \mid -A] \quad (18)$$

A matriz de incidência A tem dimensão ($n_{\text{barras}}(i) \times n_{\text{ramos}}(j)$) é obtida através dos seguintes passos:

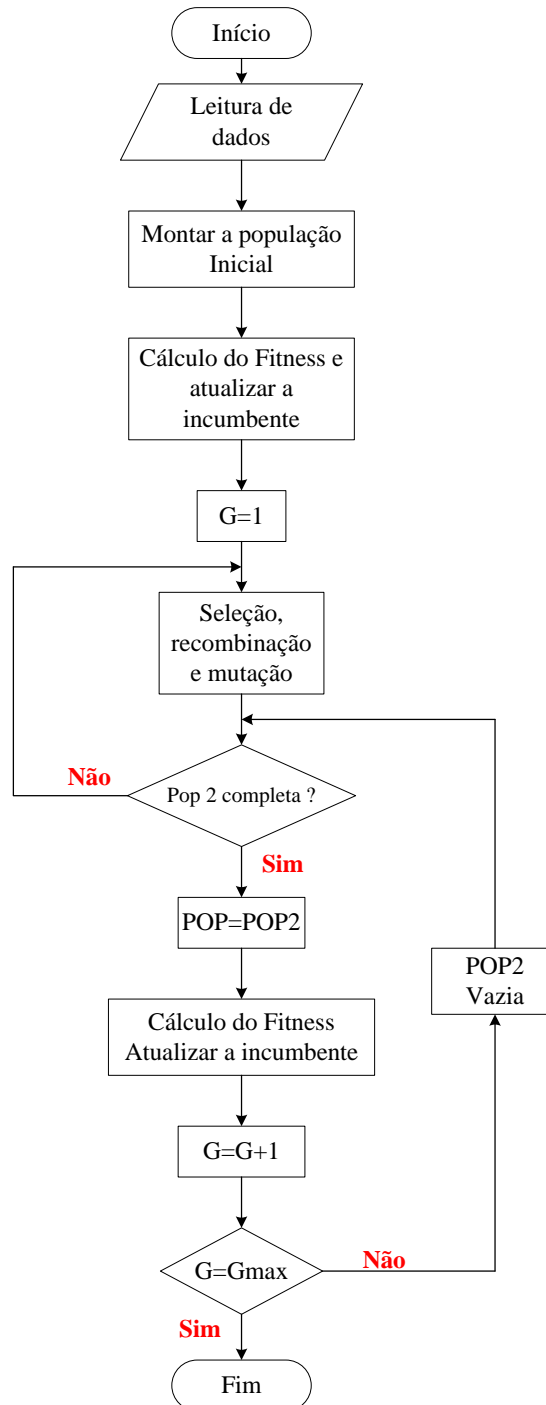
- i.* Determinar um sentido para o fluxo de corrente em todo sistema de modo coerente;
- ii.* Se o sentido do fluxo do ramo j for para fora da barra i o elemento a_{ij} da matriz A é $+1$;
- iii.* Se o sentido do fluxo do ramo j for incidente na barra i o elemento a_{ij} da matriz A é -1 ;
- iv.* Se não houver conexão entre o ramo j e a barra i o elemento a_{ij} é 0 .

Depois de formada a matriz A , Aa é facilmente encontrada. Para configurar o relé j analisa-se a coluna j , encontrando o elemento -1 desta coluna. A linha respectiva a este elemento negativo, por exemplo, i , é analisada. Nessa linha os elementos $+1$ são candidatos a relés primários do relé j . Se algum candidato estiver no mesmo ramo que j ele é desconsiderado.

5.3.1 Processo de Otimização

O processo de otimização proposto para o problema de coordenação de relés é apresentado na Figura 14. A equação (10) representa a função objetivo do problema, que apresenta as restrições de coordenação consideradas.

Figura 14 -Processo de coordenação ótimo proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento inicial apresentado na Figura 14 consiste em formar uma população inicial, de forma aleatoriamente controlada respeitando os valores limites inferiores e superiores das variáveis do modelo matemático, equações (19)-(21). Cada indivíduo dessa população possui todos os relés a serem coordenados, os genes de cada do indivíduo representam os parâmetros dos relés de sobrecorrente e distância. Os primeiros 3 genes de cada indivíduo são, a corrente de ajuste do relé de sobrecorrente I_{aj} , um fator multiplicativo de ajuste de tempo TMS e o tipo do relé de sobrecorrente (curvas representadas na Tabela 4).

Os limites dos parâmetros do relé de sobrecorrente são considerados como:

$$TMS_i^{min} \leq TMS_i \leq TMS_i^{max} \quad (19)$$

$$I_{cargai}^{max} \leq I_{aji} \leq I_{faltai}^{min} \quad (20)$$

$$1 \leq Tipo_i \leq 4 \quad (21)$$

O fator de tempo, TMS varia de 0,05 a 1, sendo considerado pelo AG como uma variável contínua. A I_{aj} varia entre a corrente que circula no sistema em carga máxima I_{cargai}^{max} , e a corrente que caracteriza a falta menos severa I_{faltai}^{min} . A variável I_{aj} é considerada uma variável contínua pelo AG. O parâmetro tipo indica qual dentre as quatro curvas do padrão I-EC (Figura 12) é utilizada, por exemplo, $tipo=1$ significa que a curva representa o padrão IEC extremamente inverso, essa é uma variável do tipo inteira para o AG.

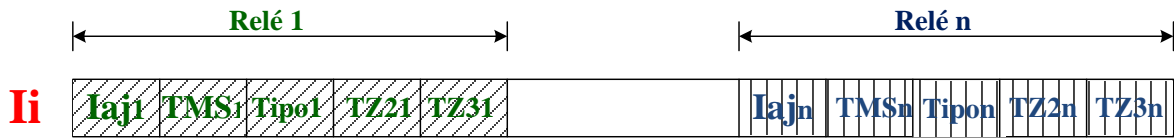
Os outros dois parâmetros (genes) correspondem aos tempos de atuação das zonas dos relés de distância. Como a primeira zona $TZ1$ é considerada instantânea, o AG considera para fins de coordenação a segunda ($TZ2$) e terceira ($TZ3$) zonas do relé de distância. Esses dois parâmetros são considerados contínuos e variam de acordo com o intervalo apresentado nas equações (22) e (23). Os valores práticos de $TZ2$ e $TZ3$ são respectivamente 200 e 650 ms, considera-se: $T_{Z2}^{min} = 200 \text{ ms}$, $T_{Z2}^{max} = 400 \text{ ms}$, $T_{Z3}^{min} = 500 \text{ ms}$ e $T_{Z3}^{max} = 700 \text{ ms}$, AREVA, 2002.

$$T_{Z2i}^{min} \leq T_{Z2i} \leq T_{Z2i}^{max} \quad (22)$$

$$T_{Z3i}^{min} \leq T_{Z3i} \leq T_{Z3i}^{max} \quad (23)$$

Na Figura 15 ilustra-se a codificação do indivíduo, sendo I_i o i -ésimo indivíduo formado pelos n relés.

Figura 15 – Codificação do indivíduo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva característica gerada pelos parâmetros dos relés de sobrecorrente é representada na equação (14). O AG gera um grupo de valores TMS para cada indivíduo da população, cujos limites superior e inferior são apresentados em (19). As correntes de curto circuito (I_{cc}) são obtidas através de simulações de faltas nas linhas de transmissão no ATP. Essas faltas são simuladas no meio de cada linha do sistema elétrico. Os resultados das correntes de falta são armazenados e utilizados pelo AG como parâmetro para o cálculo do múltiplo da corrente. A corrente de ajuste é obtida através dos limites apresentados em (20), que dependem das características do sistema elétrico.

A variável que representa o tipo de curva dos relés de sobrecorrente é obtida pelo AG correspondente ao intervalo apresentado em (21), portanto se o AG fornecer como resultado a curva do tipo 2, por exemplo os valores de a , b e n são obtidos na Tabela 4. Para o caso de valores referentes ao tipo muito inverso, c é sempre unitário para as funções de sobrecorrente utilizadas. Com isso o AG encontra o menor tempo de operação t_{opi} para o relé levando em consideração o tipo de relé, o ajuste de tempo (TMS) e o ajuste de corrente (I_{aj}).

A função objetivo para cada indivíduo é calculada e o indivíduo que tiver menor valor de *fitness* tem suas variáveis armazenadas, ou seja, torna-se a solução incumbente. A seleção é realizada por torneio em que a cada jogo são selecionados 4 indivíduos aleatoriamente, escolhendo-se o melhor deles. Este procedimento é repetido novamente para selecionar o segundo indivíduo, que em conjunto com o primeiro participa do processo de recombinação. Após a seleção é realizada a recombinação, onde o número de pontos de recombinação indica o número de divisões de cada indivíduo, que é recombinado com o outro de forma aleatória. Com os dois novos indivíduos realiza-se a mutação, em que é causada em cada indivíduo uma pequena perturbação, que depende da taxa de mutação. Essa perturbação é realizada mudando a curva do relé para uma mais próxima, ou mudando o valor da corrente de ajuste, ou de TZ_2 e TZ_3 .

Este procedimento é realizado até a nova população temporária (POP2) ficar completa. Após o término deste procedimento essa nova população substitui a inicial, o *fitness* é calculado novamente e atualiza-se a solução incumbente (o melhor indivíduo). Se o AG atingir

número máximo de gerações, o processo de otimização é finalizado, caso contrário o AG passa para a próxima geração e realiza todo processo a partir da seleção novamente.

5.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se o estudo da coordenação dos relés de distância e sobrecorrente para sistemas de transmissão malhados e de acordo com o projeto de proteção de linhas definido no capítulo 2 deste trabalho, um modelo matemático de programação não-linear foi desenvolvido. Para solução deste modelo é proposto um método inteligente baseado em algoritmo genético detalhando-se esta técnica de solução em função do problema sob análise.

6 CONTROLADOR NEBULOSO

Neste capítulo apresenta-se o projeto de um controlador nebuloso, que é inserido na arquitetura do relé numérico, desenvolvido no *software* ATP através de MODELS. Desta forma são apresentados os conceitos introdutórios de lógica nebulosa e o projeto do controlador.

6.1 INTRODUÇÃO A LÓGICA NEBULOSA

A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida inicialmente por Lotfi e Zadeh (1965), com a capacidade de manipular e representar incertezas. Esses conjuntos possuem a capacidade de expressar as ambiguidades e subjetividades do pensamento humano sem distorções, sendo assim uma ferramenta adequada para tratar às imprecisões e incertezas das informações, (DECANINI, 2008).

Os conjuntos nebulosos são funções contínuas, representadas por funções de pertinência. A função de pertinência, $\mu_C : \Omega \rightarrow [0,1]$, que define o conjunto nebuloso C do universo de discurso Ω , associa a cada elemento x de Ω , o grau de pertinência $\mu_C(x)$ entre x e o conceito expresso por C , onde x pertence a C , (CHENG; PHAM, 2006; MCNEIL; (TERANO et al, 1994).

- $\mu_C(x) = 1$: x é completamente compatível com C ;
- $\mu_C(x) = 0$: x é completamente incompatível com C ;
- $0 < \mu_C(x) < 1$: x é parcialmente compatível com C .

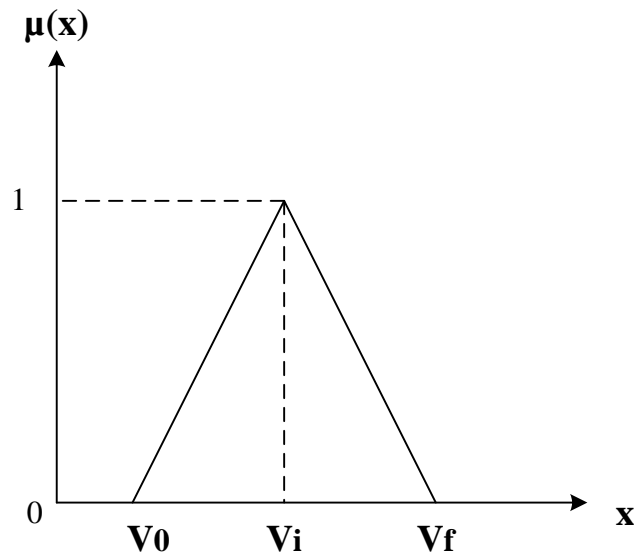
A utilização da teoria dos conjuntos nebulosos, em um contexto lógico, por exemplo, baseados na experiência, denomina-se lógica nebulosa. Esta ferramenta permite definir modelos complexos do mundo real através de variáveis e regras simples.

6.1.1 Funções de Pertinência

As funções de pertinência são representadas por funções contínuas e limitadas por “0” e “1”, que caracterizam os conjuntos nebulosos e podem ser caracterizadas por diferentes formas que associam a entrada e a resposta de saída. As mais utilizadas são as triangulares, trapezoidais, gaussianas e exponenciais. As Figuras 16 e 17 ilustram as funções de pertinência triangular e trapezoidal respectivamente.

A função de pertinência triangular é definida por três parâmetros, sendo eles: os vértices v_0 , v_i , v_f . Estes parâmetros definem o desempenho da inferência nebulosa.

Figura 16 – Função de pertinência triangular



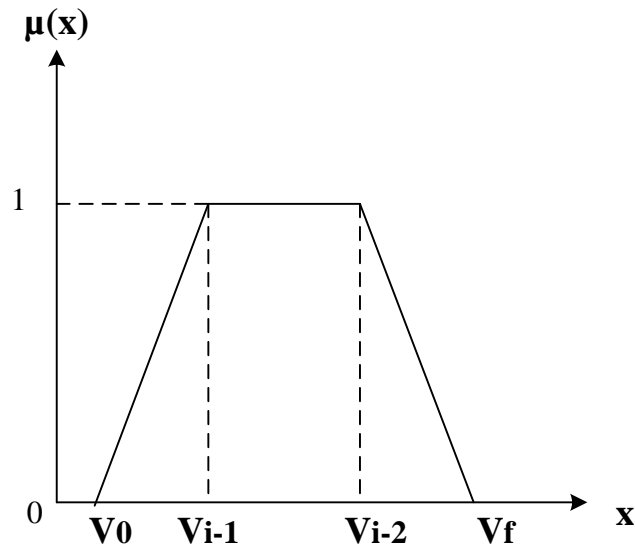
Fonte: (DECANINI, 2008).

A função de pertinência triangular pode ser definida pelo conjunto de equações abaixo, (CHENG; PHAM, 2006; MCNEIL, 1994).

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - V_0}{V_i - V_0}, & V_0 \leq x \leq V_i \\ \frac{V_f - x}{V_f - V_i}, & V_i \leq x \leq V_f \\ 0, & \text{nos demais intervalos} \end{cases} \quad (24)$$

A função de pertinência trapezoidal é definida por quatro parâmetros, sendo eles: v_0 , v_{i-1} , v_{i-2} e v_f .

Figura 17 – Função de pertinência trapezoidal

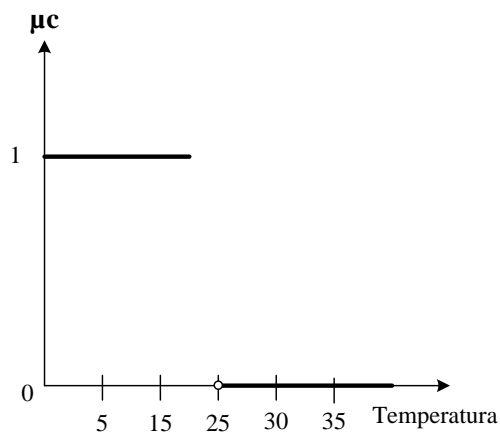


Fonte: (DECANINI, 2008).

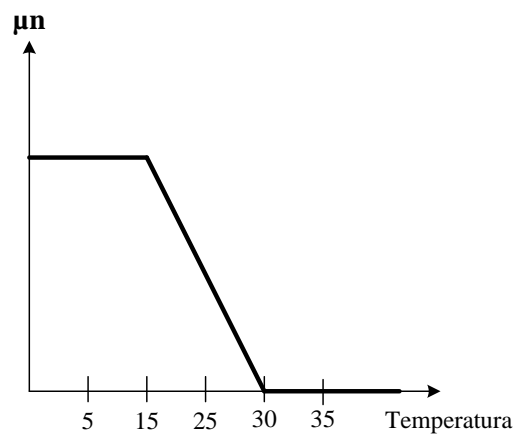
A função de pertinência trapezoidal pode ser definida pelo conjunto de equações a seguir, (CHENG; PHAM; 2006; MCNEIL, 1994).

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - V_0}{V_{i-1} - V_0}, & V_0 \leq x \leq V_{i-1} \\ 1, & V_{i-1} \leq x \leq V_{i-2} \\ \frac{V_f - x}{V_f - V_{i-2}}, & V_{i-2} \leq x \leq V_f \\ 0, & \text{nos demais intervalos} \end{cases} \quad (25)$$

As expressões acima indicam a pertinência gradual nos conjuntos nebulosos, ao contrário do que ocorre com conjuntos da teoria de conjuntos clássica, conhecidos como *crisp*, para os quais a pertinência é do tipo “compatível ou incompatível”. Estas definições são ilustradas nas Figuras 18 e 19, que descrevem o conceito de “frio” através de um conjunto *crisp* e um conjunto nebuloso, respectivamente.

Figura 18 – Conjunto “crisp” frio.

Fonte: (DECANINI, 2008).

Figura 19 –Conjunto nebuloso jovem

Fonte: (DECANINI, 2008).

6.1.2 Sistemas Nebulosos

O sistema nebuloso é representado por regras nebulosas do tipo *Se-Então*, McNeil F.M., 1994. Estas regras constituem o núcleo do sistema nebuloso. Na Equação (26) é representado o formato de uma regra nebulosa:

$$\begin{aligned} \text{Se } x \text{ é } A \text{ (premissa);} \\ \text{Então } y \text{ é } B \text{ (consequência).} \end{aligned} \quad (26)$$

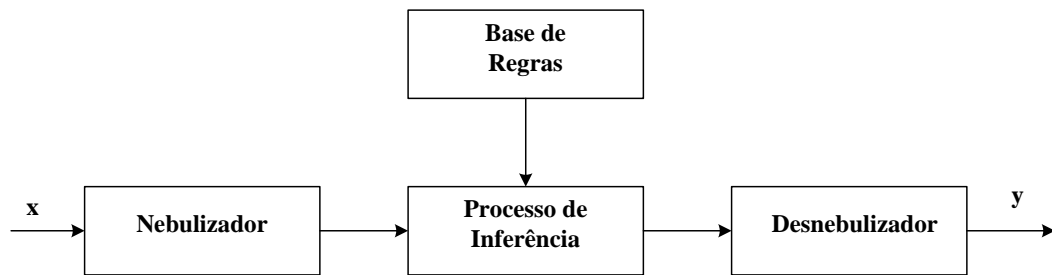
sendo:

x e y = variáveis de entrada e saída, respectivamente;

A e B = termos linguísticos associados aos conjuntos nebulosos.

Os sistemas nebulosos podem ser representados na forma ilustrada na Figura 20.

Figura 20 – Sistema nebuloso com nebulizador e desnebulizador



Fonte: (DECANINI, 2008).

sendo que:

- Nebulizador** → transforma variáveis de valor real em variáveis lingüísticas;
- Base de Regras** → banco de regras nebulosas;
- Inferência** → manipula a base de regras;
- Desnebulizador** → converte variáveis lingüísticas em variáveis de valor real.

O nebulizador e o desnebulizador permitem que o usuário trabalhe com variáveis de entrada de valor real e obtenha variáveis de saída de valor real, sendo que todo processo é realizado com variáveis lingüísticas.

Os sistemas nebulosos são usualmente aplicados na automação de processos que utilizam de informações imprecisas fornecidas por seres humanos e em problemas complexos, que quando solucionados pela abordagem clássica desprendem um alto custo computacional. Utilizando sistemas nebulosos, a solução é obtida a partir do conjunto de regras, de senso comum através de um método de inferência, obtendo assim um processo mais rápido e simplificado.

6.2 PROJETO DO CONTROLADOR NEBULOSO

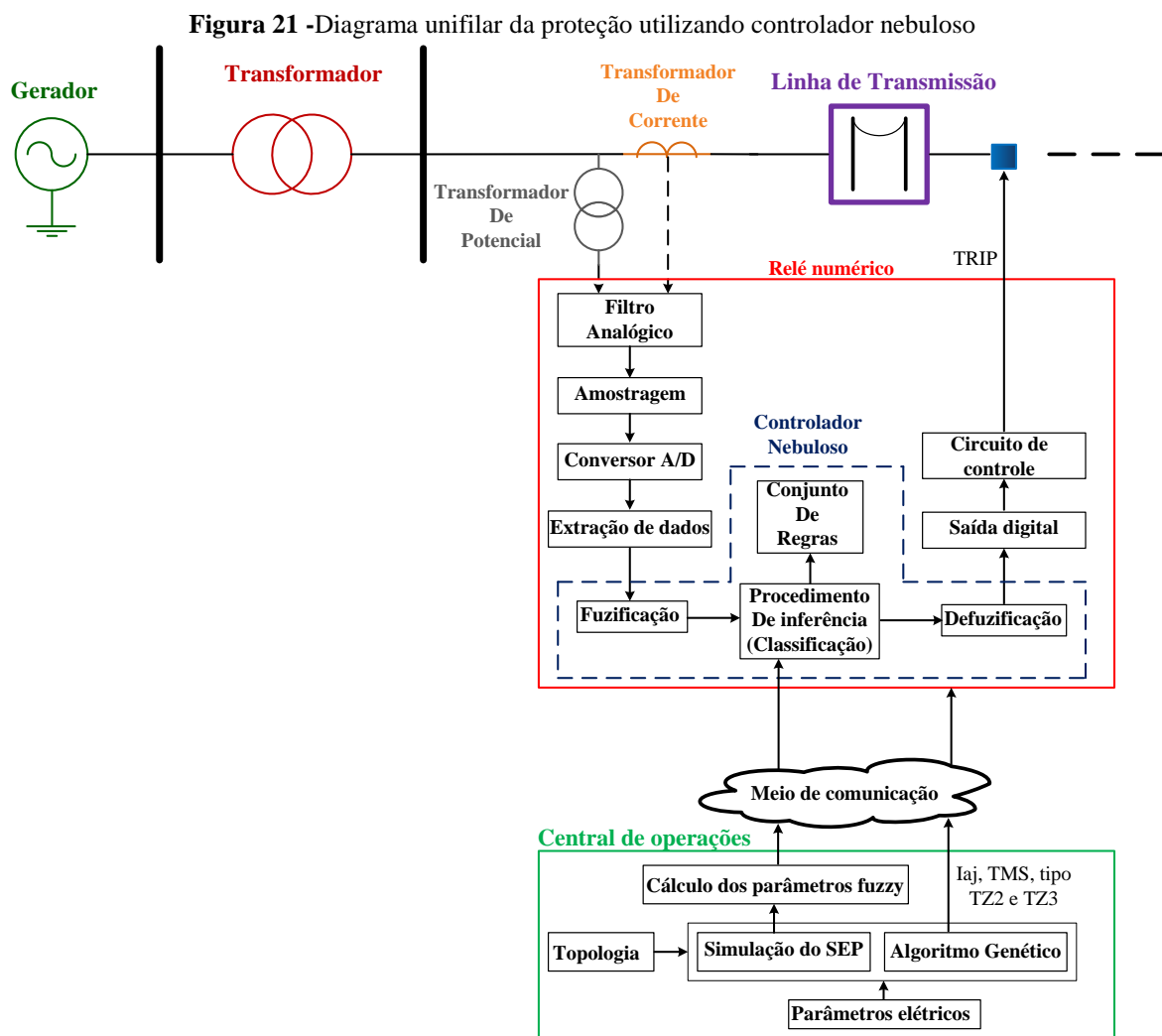
Nesta seção apresentam-se as motivações para o projeto do controlador, ou seja, qual a vantagem desta melhoria no relé numérico no cenário de proteção piloto, caracterizando a proteção adotada no projeto de proteção deste trabalho, transferência de *trip* de sobre alcance permissivo.

6.2.1 Estrutura do Relé Numérico com Controlador Nebuloso

A metodologia proposta inicialmente funciona para parametrizar os relés através de uma condição de falta preestabelecida, objetivando a coordenação otimizada dos mesmos para condições de operação e topologia da rede preestabelecidas. Porém se houver variações significativas na impedância vista pelo relé o método proposto não é totalmente confiável.

Um exemplo prático deste cenário é a presença de dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), que modificam a impedância medida pelo relé. Uma solução para este problema é a utilização de um controlador nebuloso, onde através de funções de pertinência que representem as características de sobrecorrente e de distância, e seus tempos operacionais, associados a um conjunto de regras, determina sua saída de controle, que significaria enviar o sinal de *trip*, no caso de falta ou não para operações normais.

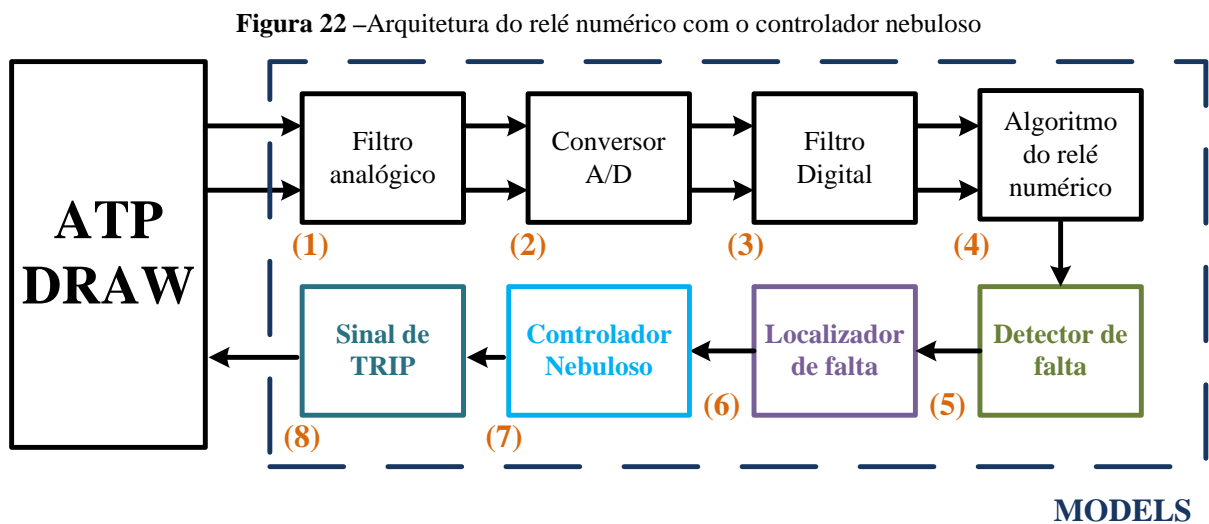
Este controlador é inserido no relé numérico, como ilustrado no diagrama unifilar da Figura 21.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama ilustrado na Figura 21 apresenta como o controlador nebuloso é inserido no relé numérico. Este controlador possui as mesmas funções do sistema nebuloso ilustrado na Figura 20. Portanto como se pode observar na Figura 21, depois de parametrizado com I_{aj} , TMS , *tipo de curva*, $TZ2$ e $TZ3$, fornecidos pelo processo de otimização do algoritmo genético dedicado, o controlador é configurado inicialmente. Após este processo o controlador está pronto para auxiliar o relé na tomada de decisões, ou seja, envio ou não do sinal de *trip*, mais detalhes deste processo são apresentados a seguir.

A nova arquitetura do relé numérico é ilustrada na Figura 22, onde todos os blocos anteriores ao controlador possuem o mesmo funcionamento da estrutura ilustrada na Figura 9.



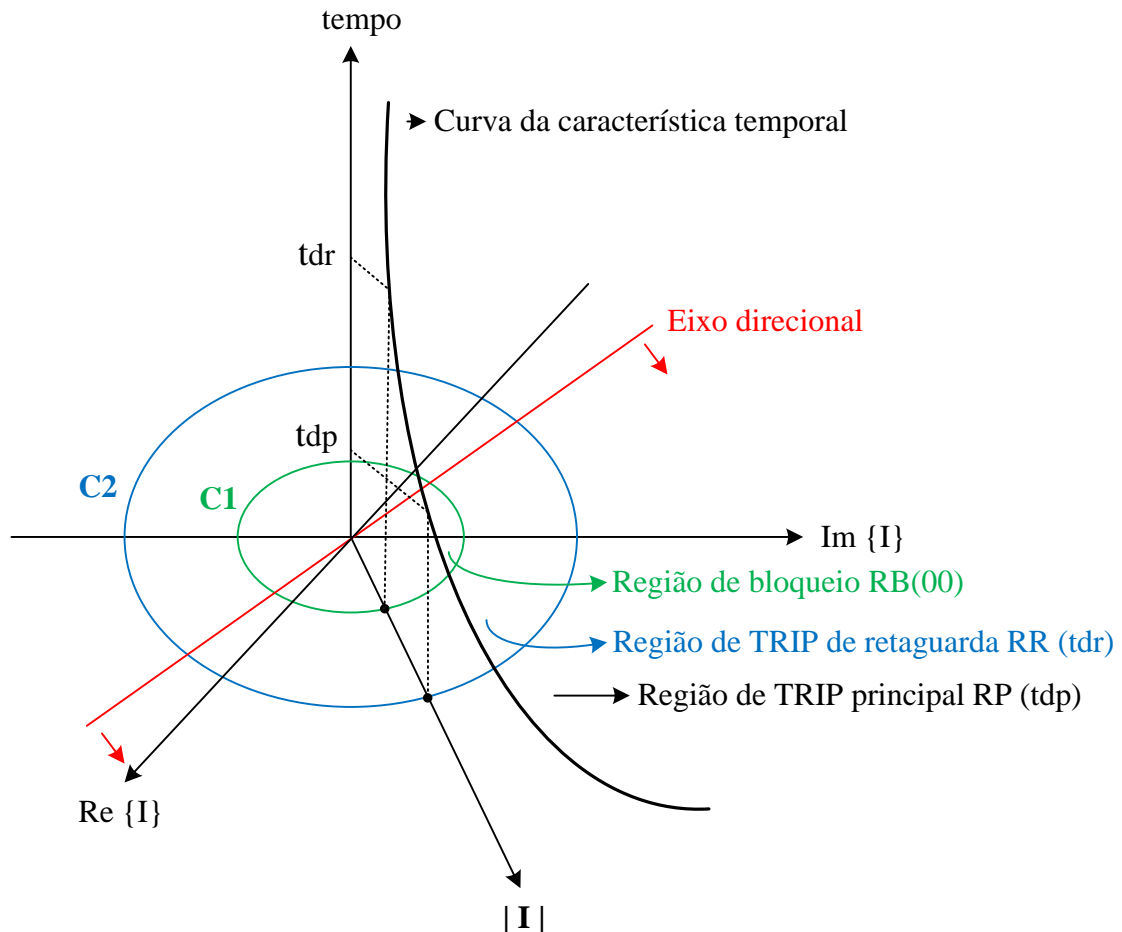
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Composição do Controlador Nebuloso

O controlador nebuloso está inserido no esquema de transferência de *trip* de sobre alcance permissivo ilustrado na Figura 3, onde as funções de sobrecorrente do relé são utilizadas para retaguarda contra faltas fase-terra, e a função de distância para proteção principal, zonas 1 e 2 para qualquer tipo de curto-circuito, e zona 3 responsável pela retaguarda para faltas entre fases. Além disto, neste esquema utilizam-se relés com funções de sobre alcance denominados *RO* e de guarda (*GD*). Na Figura 4 é ilustrado o esquema de controle desta proteção piloto, onde foi feita uma análise de seu funcionamento. De posse destas informações o controlador deve possuir funções de pertinência que representem adequadamente todas as características funcionais deste esquema.

Na Figura 23 é ilustrada a característica tridimensional da curva de sobrecorrente, em que através desta característica obtiveram-se as funções de pertinência ilustradas na Figura 24.

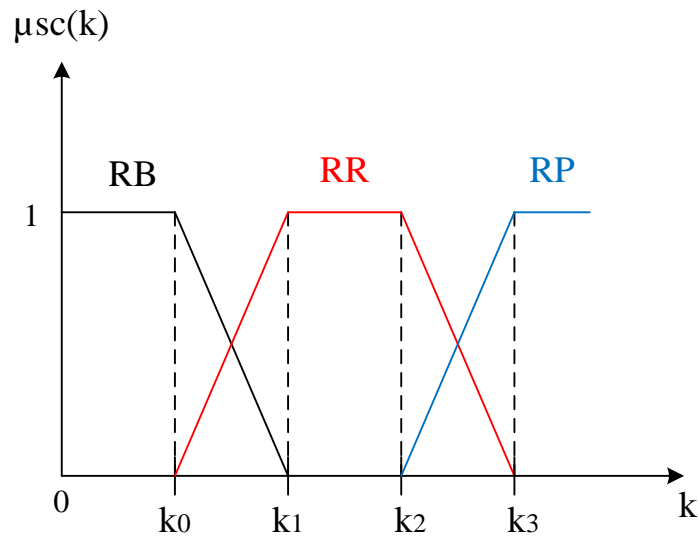
Figura 23 -Característica da curva do relé de sobrecorrente, análise tridimensional



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na curva da Figura 23 observa-se que quanto maior a magnitude da corrente ($|I|$) menor o tempo de operação do relé, característica do relé de tempo inverso. Isto determina as regiões de trip do relé, a região de trip principal deve ser atingida mais rápida que a de retaguarda, portando $t_{dp} < t_{dr}$. A região de bloqueio representa valores característicos da corrente de carga do sistema.

Figura 24 – Funções de pertinência da função de sobrecorrente do relé



Fonte: Elaborado pelo autor.

As funções de pertinência de sobrecorrente são definidas pelo conjunto de equações (27-29).

$$\mu_{SC-RB}(k) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq k_0 \\ \frac{-1}{k_1 - k_0} \cdot k + \frac{1}{k_1 - k_0}, & k_0 < k < k_1 \\ 0, & k \geq k_1 \end{cases} \quad (27)$$

$$\mu_{SC-RR}(k) = \begin{cases} 0, & 0 \leq k \leq k_0 \\ \frac{1}{k_1 - k_0} \cdot k - \frac{k_0}{k_1 - k_0}, & k_0 < k < k_1 \\ 1, & k_1 \leq k \leq k_2 \\ \frac{-1}{k_3 - k_2} \cdot k + \frac{k_2}{k_3 - k_2}, & k_2 < k < k_3 \\ 0, & k \geq k_3 \end{cases} \quad (28)$$

$$\mu_{SC-RP}(k) = \begin{cases} 0, & 0 \leq k \leq k_2 \\ \frac{1}{k_3 - k_2} \cdot k - \frac{k_2}{k_3 - k_2}, & k_2 < k < k_3 \\ 1, & k \geq k_3 \end{cases} \quad (29)$$

onde:

k_n → múltiplo da corrente em situação de operação normal, definido por I_{carga}/I_{aj} ;

I_{cc} → corrente que sensibiliza o relé;

I_{aj} → corrente de ajuste, obtida pelo algoritmo genético dedicado;

k_0 → múltiplo da corrente limite do bloqueio, $k_0 = 1,6 \cdot k_n$

k_1 → múltipla corrente que caracteriza o início da região de TRIP de retaguarda,
 $k_1 = 2,8 \cdot k_n$

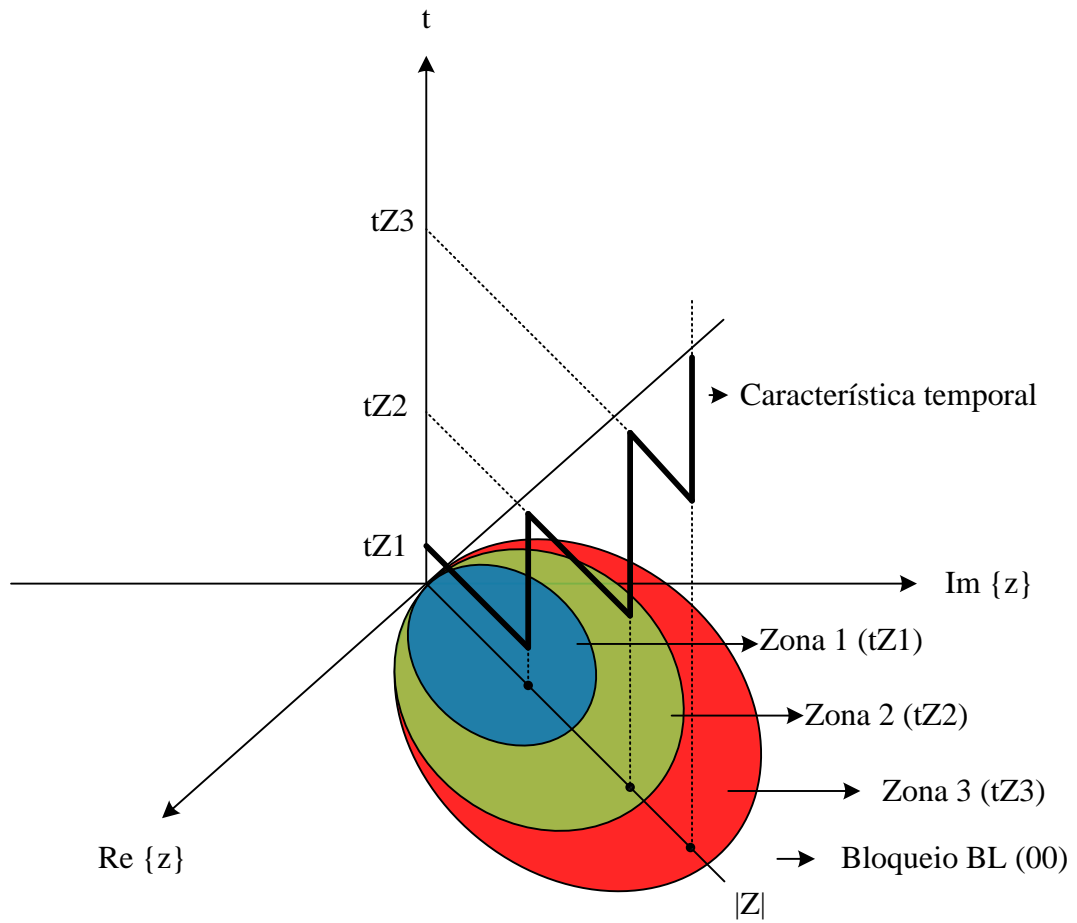
k_2 → múltiplo da corrente que caracteriza o fim da região de TRIP de retaguarda, $k_2 =$
 $4,6 \cdot k_n$

k_3 → múltiplo da corrente que caracteriza o início da região de TRIP principal, $k_3 =$
 $10 \cdot k_n$

As funções de pertinência relacionadas com a função de sobrecorrente do relé, utilizam a corrente de ajuste obtida no processo de otimização, e a corrente que sensibiliza o relé, sendo que a leitura desta grandeza é feita em tempo real pelo controlador nebuloso. As relações de k_0 , k_1 , k_2 e k_3 com k_n devem ser ajustadas de acordo com as características de carga do sistema elétrico em que o relé está inserido. Sendo assim dependendo da corrente que sensibiliza o relé o controlador é representado por uma função de pertinência adequada a situação do sistema elétrico.

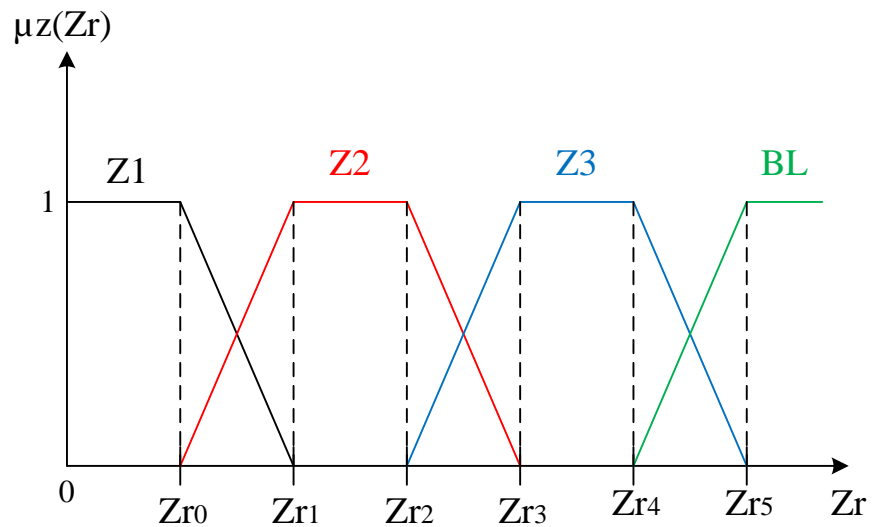
Na Figura 25 é ilustrada a característica tridimensional das curvas de distância. Através desta característica obtiveram-se as funções de pertinência ilustradas na Figura 26.

Figura 25 - Característica das curvas do relé de distância do tipo MHO



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Funções de pertinência da função de distância do relé



Fonte: Elaborado pelo autor.

As funções de pertinência de distância são definidas pelo conjunto de equações (30-33).

$$\mu_{Z-Z_1}(Z_r) = \begin{cases} 1, & 0 \leq Z_r \leq Z_{r0} \\ \frac{-1}{Z_{r1} - Z_{r0}} \cdot Z_r + \frac{Z_{r1}}{Z_{r1} - Z_{r0}}, & Z_{r0} < Z_r < Z_{r1} \\ 0, & Z_r \geq Z_{r1} \end{cases} \quad (30)$$

$$\mu_{Z-Z_2}(Z_r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq Z_r \leq Z_{r0} \\ \frac{1}{Z_{r1} - Z_{r0}} \cdot Z_r - \frac{Z_{r0}}{Z_{r1} - Z_{r0}}, & Z_{r0} < Z_r < Z_{r1} \\ 1, & Z_{r1} \leq Z_r \leq Z_{r2} \\ -\frac{1}{Z_{r3} - Z_{r2}} \cdot Z_r + \frac{Z_{r3}}{Z_{r3} - Z_{r2}}, & Z_{r2} < Z_r < Z_{r3} \\ 0, & Z_r \geq Z_{r3} \end{cases} \quad (31)$$

$$\mu_{Z-Z_3}(Z_r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq Z_r \leq Z_{r2} \\ \frac{1}{Z_{r3} - Z_{r2}} \cdot Z_r - \frac{Z_{r2}}{Z_{r3} - Z_{r2}}, & Z_{r2} < Z_r < Z_{r3} \\ 1, & Z_{r3} \leq Z_r \leq Z_{r4} \\ -\frac{1}{Z_{r5} - Z_{r4}} \cdot Z_r + \frac{Z_{r5}}{Z_{r5} - Z_{r4}}, & Z_{r4} < Z_r < Z_{r5} \\ 0, & Z_r \geq Z_{r5} \end{cases} \quad (32)$$

$$\mu_{Z-BL}(Z_r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq Z_r \leq Z_{r4} \\ \frac{1}{Z_{r5} - Z_{r4}} \cdot Z_r + \frac{Z_{r4}}{Z_{r5} - Z_{r4}}, & Z_{r4} < Z_r < Z_{r5} \\ 1, & Z_r \geq Z_{r5} \end{cases} \quad (33)$$

onde:

Z_r → Impedância vista pelo relé;

Z_{LL} → Impedância da linha em que o relé esta instalado;

Z_{LP} → Impedância da linha subsequente a que o relé esta instalado;

Z_{r0} → Limite de alcance da primeira zona do relé de distância, $Z_{r0} = 0,8 \cdot Z_{LL}$

Z_{r1} → Alcance mínimo da segunda zona do relé de distância, $Z_{r1} = Z_{LL} + 0,2 \cdot Z_{LP}$

Z_{r2} → Alcance máximo da segunda zona do relé de distância, $Z_{r2} = Z_{LL} + 0,5 \cdot Z_{LP}$

Z_{r3} → Alcance mínimo da terceira zona do relé de distância, $Z_{r3} = Z_{LL} + 0,8 \cdot Z_{LP}$

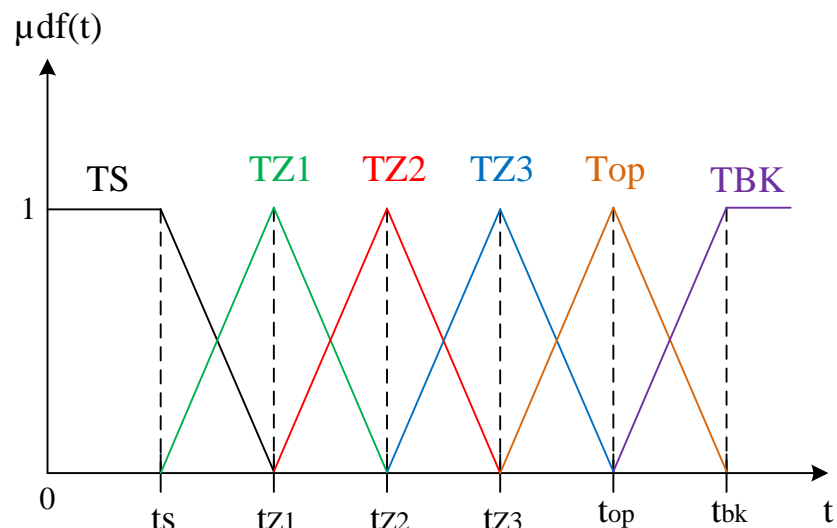
Z_{r4} → Alcance máximo da terceira zona do relé de distância, $Z_{r4} = Z_{LL} + Z_{LP}$

Z_{r5} → Valor mínimo da impedância de bloqueio, $Z_{r5} = 20 \cdot Z_{LL}$

Na Figura 25 são ilustradas as três zonas de proteção da função de distância do relé. A primeira zona é configurada para proteger até 80% da linha. As outras zonas são configuradas de modo a respeitarem as restrições de coordenação. A zona de bloqueio (*BL*) representa altos valores de impedância, pois em situação de operação normal a impedância vista pelo relé é muito superior à impedância da linha. Para a função de distância quanto menor o valor da impedância vista pelo relé mais rápida deve ser a atuação da proteção.

Para que as funções de pertinência de sobrecorrente e de distância funcionem no tempo correto e respeite a coordenação na presença de alguma contingência, seus tempos de operação devem ser representados por funções de pertinência. Na Figura 27 ilustram-se as funções de pertinência dos tempos utilizados pelo controlador para auxiliar na tomada de decisões do relé.

Figura 27–Funções de pertinência dos tempos das funções do relé



Fonte: Elaborado pelo autor.

As funções de pertinência de tempo são definidas pelo conjunto de equações (34-39).

$$\mu_{df-TS}(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq t_s \\ \frac{-1}{t_{Z1} - t_s} \cdot t + \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - t_s}, & t_s < t < t_{Z1} \\ 0, & t \geq t_{Z1} \end{cases} \quad (34)$$

$$\mu_{df-TZ1}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_s \\ \frac{1}{t_{Z1} - t_s} \cdot t - \frac{t_s}{t_{Z1} - t_s}, & t_s < t < t_{Z1} \\ \frac{-1}{t_{Z2} - t_{Z1}} \cdot t + \frac{t_{Z2}}{t_{Z2} - t_{Z1}}, & t_{Z1} < t < t_{Z2} \\ 0, & t \geq t_{Z2} \end{cases} \quad (35)$$

$$\mu_{df-TZ2}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_{Z1} \\ \frac{1}{t_{Z2} - t_{Z1}} \cdot t - \frac{t_{Z1}}{t_{Z2} - t_{Z1}}, & t_{Z1} < t < t_{Z2} \\ \frac{-1}{t_{Z3} - t_{Z2}} \cdot t + \frac{t_{Z3}}{t_{Z3} - t_{Z2}}, & t_{Z2} < t < t_{Z3} \\ 0, & t \geq t_{Z3} \end{cases} \quad (36)$$

$$\mu_{df-TZ3}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_{Z2} \\ \frac{1}{t_{Z3} - t_{Z2}} \cdot t - \frac{t_{Z2}}{t_{Z3} - t_{Z2}}, & t_{Z2} < t < t_{Z3} \\ \frac{-1}{t_{op} - t_{Z3}} \cdot t + \frac{t_{op}}{t_{op} - t_{Z3}}, & t_{Z3} < t < t_{op} \\ 0, & t \geq t_{op} \end{cases} \quad (37)$$

$$\mu_{df-TOP}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_{Z3} \\ \frac{1}{t_{op} - t_{Z3}} \cdot t - \frac{t_{Z3}}{t_{op} - t_{Z3}}, & t_{Z3} < t < t_{op} \\ \frac{-1}{t_{bk} - t_{op}} \cdot t + \frac{t_{bk}}{t_{bk} - t_{op}}, & t_{op} < t < t_{bk} \\ 0, & t \geq t_{bk} \end{cases} \quad (38)$$

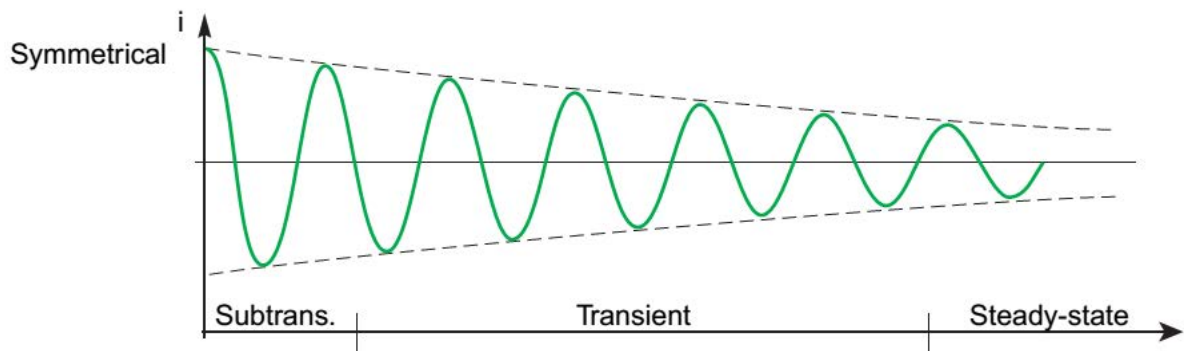
$$\mu_{df-TBK}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_{op} \\ \frac{1}{t_{bk} - t_{op}} \cdot t - \frac{t_{op}}{t_{bk} - t_{op}}, & t_{op} < t < t_{bk} \\ 1, & t \geq t_{bk} \end{cases} \quad (39)$$

onde:

- t_s → Tempo de duração do transitório de uma falta;
- t_{Z1} → Tempo de operação da primeira zona do relé de distância;
- t_{Z2} → Tempo de operação da segunda do relé de distância;
- t_{Z3} → Tempo de operação da terceira zona do relé de distância;
- t_{op} → Tempo de operação do relé de sobrecorrente;
- t_{bk} → Tempo de bloqueio.

Na Figura 28 ilustra-se o comportamento da corrente na presença de um curto-circuito.

Figura 28 –Característica da corrente de curto-circuito



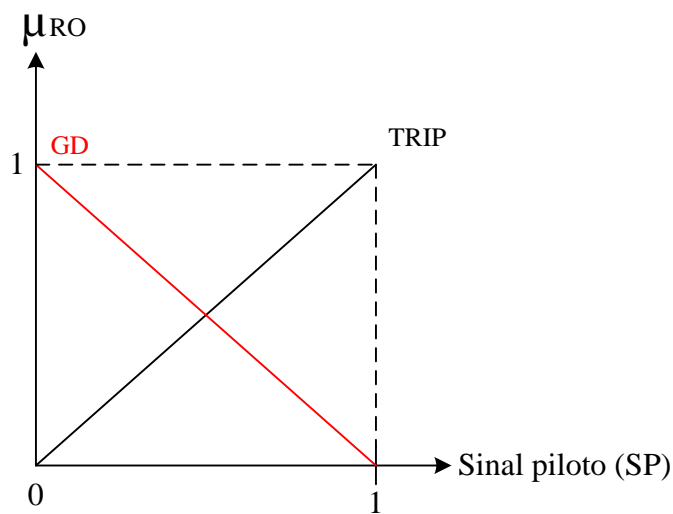
Fonte: Fonte: (NOBLAT; DUMAS; POULMAN, 2005)

A corrente de curto-circuito é caracterizada por três estágios, subtransiente, transiente e regime permanente, como ilustrado na Figura 28. O subtransiente tem duração em torno de 1 ciclo, no caso para um sistema de 60 Hz, 16 ms e não há ação da proteção. Já o transiente pode durar até 500 ms, se a falta for caracterizada até esse tempo o sistema de proteção emite apenas um sinal sonoro de alerta, através do operador. Já se o curto-circuito perdurar mais que o estágio transiente se caracterizando como regime permanente a proteção deve atuar o mais rápido possível. Para representar essa característica criou-se a função de pertinência TS , ilustrada na Figura 27, considerada com duração de 4,5 ciclos (75ms), (NOBLAT; DUMAS; POULAIN, 2005).

O tempo de operação da primeira zona de distância t_{Z1} “instantâneo” é considerado 80ms. Os tempos t_{Z2} , t_{Z3} e t_{op} são obtidos no processo de otimização e obedecem as restrições de coordenação. O tempo de bloqueio t_{bk} representa um tempo superior ao tempo da proteção de retaguarda, se atingido esse tempo o relé não deve enviar o sinal de trip.

Através da análise da Figura 4, onde é ilustrado o esquema de controle da transferência de *trip* de sobrealcance permissivo, conclui-se que o envio do sinal de *trippode* ser feito pelas zonas de distância já apresentadas, ou pelo sinal piloto. Se o sinal piloto indicar que há a necessidade de enviar o sinal de *trip* função de guarda é desativada, ou seja, seu contato fecha. Isto foi possível porque o elemento RO foi acionado pela falta acionando assim seu contato. Na Figura 29 são ilustradas as funções de pertinência do sinal piloto, que são expressas pela lógica das equações (40-42).

Figura 29–Funções de pertinência do sinal piloto



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\mu_{RO-GD}(SP) = \begin{cases} 1, & \text{se } SP = 0 \\ 0, & \text{se } SP = 1 \end{cases} \quad (40)$$

$$\mu_{RO-TRIP}(SP) = \begin{cases} 1, & \text{se } SP = 1 \\ 0, & \text{se } SP = 0 \end{cases} \quad (41)$$

$$SP = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq Z_R < Z_{RO} \\ 0, & \text{se } Z_R > Z_{RO} \end{cases} \quad (42)$$

onde:

SP → Sinal piloto;

GD → Função que representa a característica de guarda do relé;

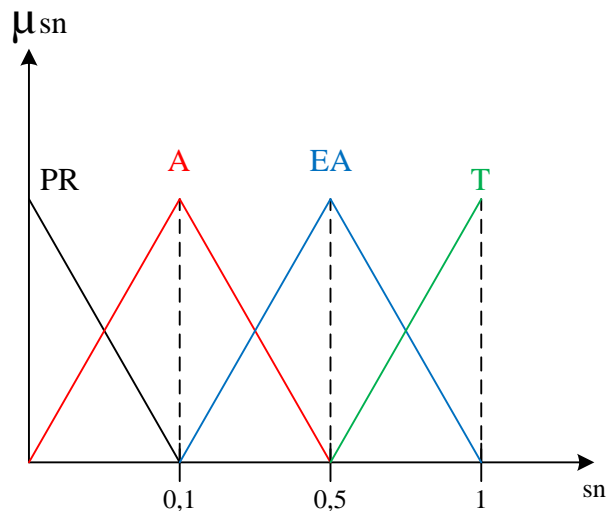
$TRIP$ → Função que representa a característica de *trip* do relé;

Z_{RO} → Limite de alcance da proteção do elemento RO, $Z_{RO} = 1,5 Z_{LL}$;

Z_R → Impedância vista pelo relé.

A Figura 30 ilustra a característica do sinal gerado pelo controlador, ou seja, sua saída de controle.

Figura 30 –Características do sinal de controle



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal de controle em um sistema de transmissão pode apresentar quatro estados, proibido (PR), estado atual (EA), alerta (A) ou *trip* (T). O estado PR representa as combinações de possibilidades que não podem ocorrer, mas que devem ser representadas, por exemplo, o relé apresenta uma impedância baixa compreendida na zona 1 do elemento de distância, e uma corrente na região de bloqueio, ou seja com característica de carga, esta situação nunca ocorre pois se a impedância está em Z1 há a presença de um curto-circuito, caracterizado por correntes elevadas. A característica EA indica que o disjuntor deve permanecer em seu estado atual sem abrir ou fechar. O sinal de alerta (A) emite um sinal de aviso sonoro que houve uma anomalia no sistema, porém ainda não se sabe se é uma falta ou não, se o tempo desta situação anormal perdurar mais que o tempo transitório de uma falta então o sinal de *trip* é enviado aos disjuntores.

O procedimento de inferência utiliza todas as funções de pertinência apresentadas até aqui assim como um conjunto de regras baseadas no conhecimento do engenheiro especialista em sistemas de proteção piloto. Nas Tabelas 5 e 6 estão o conjunto da base de conhecimento para faltas entre fases e faltas fase-terra respectivamente.

Tabela 5–Conjunto de regras referentes a curtos-circuitos entre fases

	t_s	t_{z1}	t_{z2}	t_{z3}	t_{op}	t_{bk}
Z1 AND GD	A	T	EA	EA	EA	EA
Z2 AND GD	A	EA	T	EA	EA	EA
Z3 AND GD	A	EA	EA	T	EA	EA
BL AND GD	EA	EA	EA	EA	EA	EA
Z1 AND TRIP	A	T	T	T	T	T
Z2 AND TRIP	A	T	T	T	T	T
Z3 AND TRIP	A	T	T	T	T	T
BL AND TRIP	A	T	T	T	T	T

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6–Conjunto de regras referentes a curtos-circuitos fase- terra

	t_s	t_{z1}	t_{z2}	t_{z3}	t_{op}	t_{BK}	t_s	t_{z1}	t_{z2}	t_{z3}	t_{op}	t_{BK}
	AND	AND	AND	AND	AND	AND	AND	AND	AND	AND	AND	AND
	GD	GD	GD	GD	GD	GD	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP
Z1 AND RB	PR	PR	PR	PR	PR	PR	A	T	T	T	T	T
Z2 AND RB	PR	PR	PR	PR	PR	PR	A	T	T	T	T	T
Z3 AND RB	PR	PR	PR	PR	PR	PR	A	T	T	T	T	T
BL AND RB	EA	EA	EA	EA	EA	EA	A	T	T	T	T	T
Z1 AND RR	A	T	EA	EA	T	EA	A	T	T	T	T	T
Z2 AND RR	A	EA	EA	EA	T	EA	A	T	T	T	T	T
Z3 AND RR	A	EA	EA	EA	T	EA	A	T	T	T	T	T
BL AND RR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	A	T	T	T	T	T
Z1 AND RP	A	T	EA	EA	EA	EA	A	T	T	T	T	T
Z2 AND RP	A	EA	T	EA	EA	EA	A	T	T	T	T	T
Z3 AND RP	A	EA	EA	T	EA	EA	A	T	T	T	T	T
BL AND RP	PR	PR	PR	PR	PR	PR	A	T	T	T	T	T

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o relé numérico possui um detector de faltas, a informação do tipo da falta está disponível no relé e o controlador utiliza esta informação para respeitar a característica do sistema de proteção piloto adotado.

Através da Tabela 5 podem-se montar todas as 48 regras para faltas entre fases onde a primeira zona Z1 e a zona Z2 são responsáveis pela proteção principal e a terceira zona é utilizada como retaguarda. Na ocorrência de um curto-circuito, espera-se que a coordenação seja respeitada e a secção sob falta seja isolada e as demais restauradas o mais rápido possível. As relações apresentadas na expressão (43) indicam como o processo funciona, utilizando operadores lógicos *IF*.e. *THEN*.

REGRA	SENTENÇA
1	$\mathbf{IF} \mu_{RO} = GD \mathbf{AND} \mu_Z = Z1 \mathbf{AND} \mu_{DF} = t_s \mathbf{THEN} \mu_{SN} = A$
... 48	$\mathbf{IF} \mu_{RO} = TRIP \mathbf{AND} \mu_Z = BL \mathbf{AND} \mu_{DF} = t_{bk} \mathbf{THEN} \mu_{SN} = T$

(43)

Na Tabela 6 estão apresentadas as 144 regras para faltas fase-terra onde a primeira zona Z1 e a segunda zona Z2 são responsáveis pela proteção principal e a função de sobrecorrente pela retaguarda. Assim se houver um curto-circuito monofásico, espera-se que a coordenação seja respeitada e a secção sob falta seja isolada e as demais restauradas o mais rápido possível. As relações apresentadas na expressão (44) indicam como o processo funciona, utilizando operadores lógicos *IF* e *THEN*.

REGRA	SENTENÇA
1	$\mathbf{IF} \mu_Z = Z1 \mathbf{AND} \mu_{SC} = RB \mathbf{AND} \mu_{DF} = t_s \mathbf{AND} \mu_{RO} = GD$ $\mathbf{THEN} \mu_{SN} = PR$
... 144	$\mathbf{IF} \mu_Z = BL \mathbf{AND} \mu_{SC} = RP \mathbf{AND} \mu_{DF} = t_{bk} \mathbf{AND} \mu_{RO} = TRIP$ $\mathbf{THEN} \mu_{SN} = T$

(44)

Após este processo o defuzificador obtém através de todo conhecimento inserido no processo de inferência a saída de controle. Para defuzificar esta resposta utiliza-se a equação (45) que representa o método centróide e obtém-se a saída do controlador representada pelas características ilustradas na Figura 30.

$$SN = \frac{\sum_{i=1}^{nrg} \mu_i(SN) SN_i}{\sum_{i=1}^{nrg} \mu_i(SN)} \quad (45)$$

onde:

nrg → número de regras referentes a situação em análise.

6.3 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma breve introdução sobre lógica *fuzzy*, aonde foram introduzidos os conceitos de função de pertinência e sistemas nebulosos, aonde se enquadra o controlador nebuloso proposto. A proposta do controlador foi apresentada com base na proteção piloto de transferência de *trip* de sobre alcance permissivo, todo conjunto de regras foi estruturado com base nesta filosofia de proteção. Toda estrutura do controlador deve estar inserida no relé numérico.

7 RESULTADOS

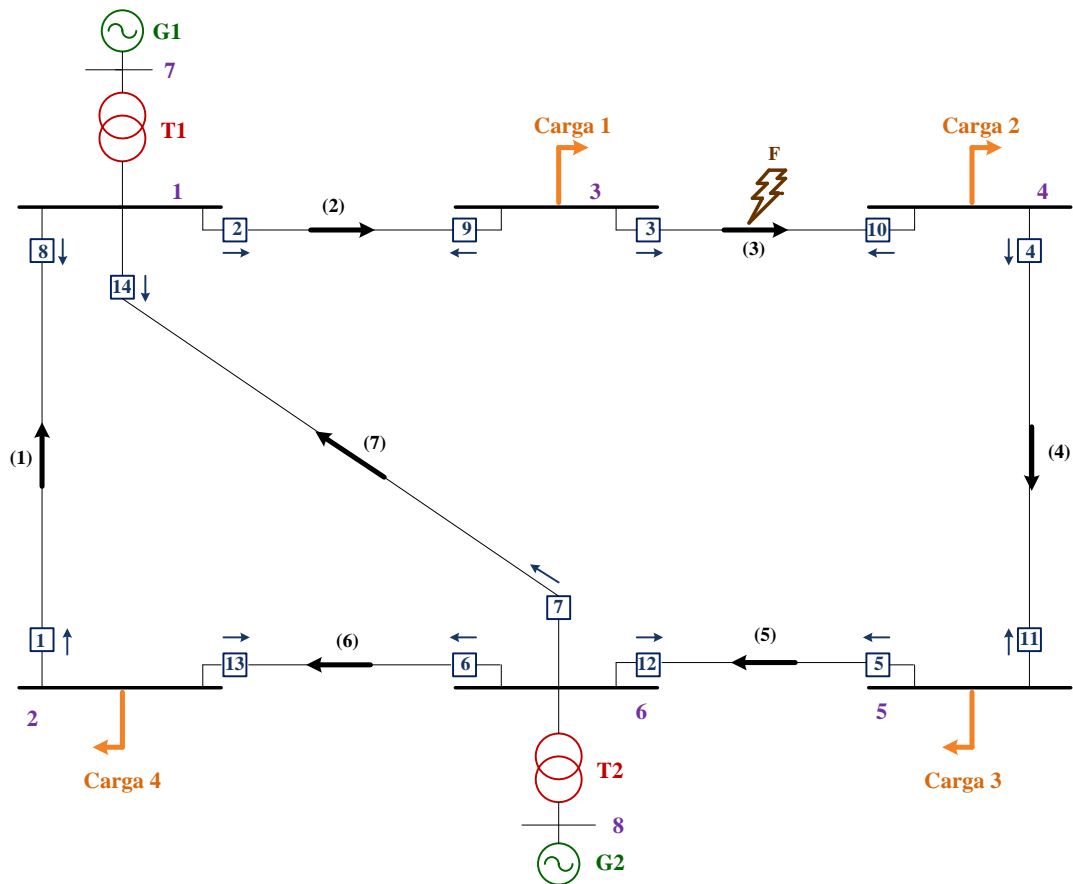
Neste capítulo apresentam-se os resultados dos testes da implementação computacional da metodologia proposta para a solução do problema de coordenação ótima. São apresentados os resultados do algoritmo genético, e do relé numérico. Os testes realizados englobaram todos os tipos de faltas como: fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase, e trifásico, porém por representatividade apenas foram apresentados os resultados para curto-circuito fase-terra, para analisar a coordenação entre as funções de sobrecorrente e distância, já que para faltas entre fases os relés utilizam apenas a função de distância, coordenada entre a primeira zona (instantânea) e a segunda zona temporizada.

São apresentados testes computacionais do relé com o controlador nebuloso para avaliar seu funcionamento diante de diversos tipos de curtos-circuitos.

7.1 SISTEMAS TESTE

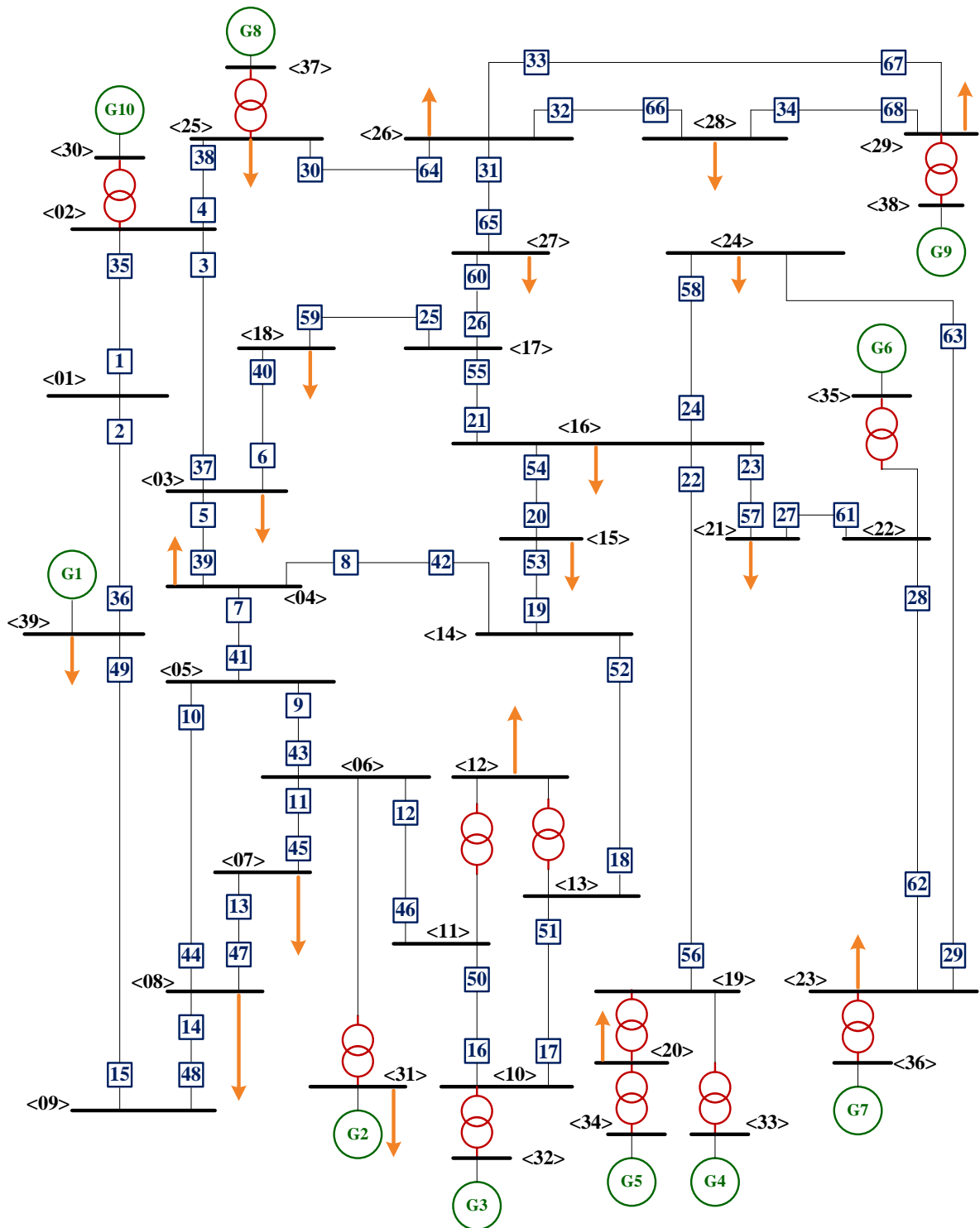
As Figuras 31 e 32 apresentam os dois sistemas testes, onde diversos tipos de curtos-circuitos foram calculados no ATP, os dados dos sistemas se encontram em anexo.

Figura 31 – Sistema teste de 8 barras



Fonte: (BRAGA; SARAIVA, 1996).

Figura 32 – Sistema teste de 39 barras



Fonte: (PAI, 1989).

Foram realizadas diversas simulações do algoritmo genético para encontrar os parâmetros de penalizações ideais α , β , γ , tamanho da população ($tpop$), número de gerações (ng).

Na Tabela 7 apresenta-se de forma resumida como estes parâmetros foram calibrados, com base no sistema de 8 barras.

Tabela 7–Parâmetros do algoritmo genético

	α	β	γ	t_{pop}	ng	FO
1	10	2	1	50	300	21,7 s
2	1	20	5	50	300	17,2 s
3	1	4	25	50	300	17,64 s
4	1	10	0	20	150	10,31 s
5	1	10	0	45	400	7,51 s
6	1	10	0	35	750	7,47 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores dos parâmetros representados na linha 5 da Tabela 7 foram adotados em todos os testes, pois possuem um valor próximo do menor valor da função objetivo FO, encontrada com número de geração reduzido. Quando o parâmetro γ é igual a 0, o terceiro termo da função objetivo é desconsiderado, com isso a coordenação é feita apenas entre a segunda zona do relé de distância (proteção principal) com o relé de sobrecorrente (proteção de retaguarda para faltas fase-terra).

7.1.1 Sistema de 8 Barras

Nas Tabelas 8 e 9 apresentam-se os parâmetros dos relés gerados pelo algoritmo genético, bem como a lista dos pares primário e retaguarda (P/R) com seus respectivos intervalos de coordenação, para curtos-circuitos fase-terra no meio de todas as linhas do sistema teste, com impedância de falta $Z_f = 15 \Omega$, valor típico para este tipo de curto-circuito em sistemas de transmissão.

Tabela 8–Parâmetros dos relés gerados pelo AG

Nº do relé	I_{aj} (A)	TMS (s)	<i>Tipo</i>	T_{op} (s)	TZ_2 (s)	TZ_3 (s)
1	161,8126	0,2586	2	0,5446	0,2162	-
2	370,9343	0,2050	2	0,5442	0,2366	-
3	118,7370	0,1619	3	0,5191	0,2323	-
4	182,8390	0,1193	2	0,5407	0,2161	-
5	200,6075	0,0512	3	0,8120	0,2297	-
6	541,2894	0,1463	1	0,5190	0,2533	-
7	204,1378	0,2023	1	0,5456	0,2531	-
8	274,1337	0,1327	2	0,5420	0,2347	-
9	463,8704	0,0584	3	0,5419	0,2267	-
10	180,8991	0,4322	2	0,5279	0,2469	-
11	779,6485	0,0738	1	0,5526	0,2193	-
12	467,3664	0,2546	2	0,5286	0,2412	-
13	280,0940	0,1199	3	0,5596	0,2311	-
14	491,9340	0,1284	2	0,5577	0,2400	-
Valor do Fitness					Média de TZ_2	
7,836 s					0,234	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9–ListaP/R do sistema de 8 barras, com seus intervalos de coordenação.

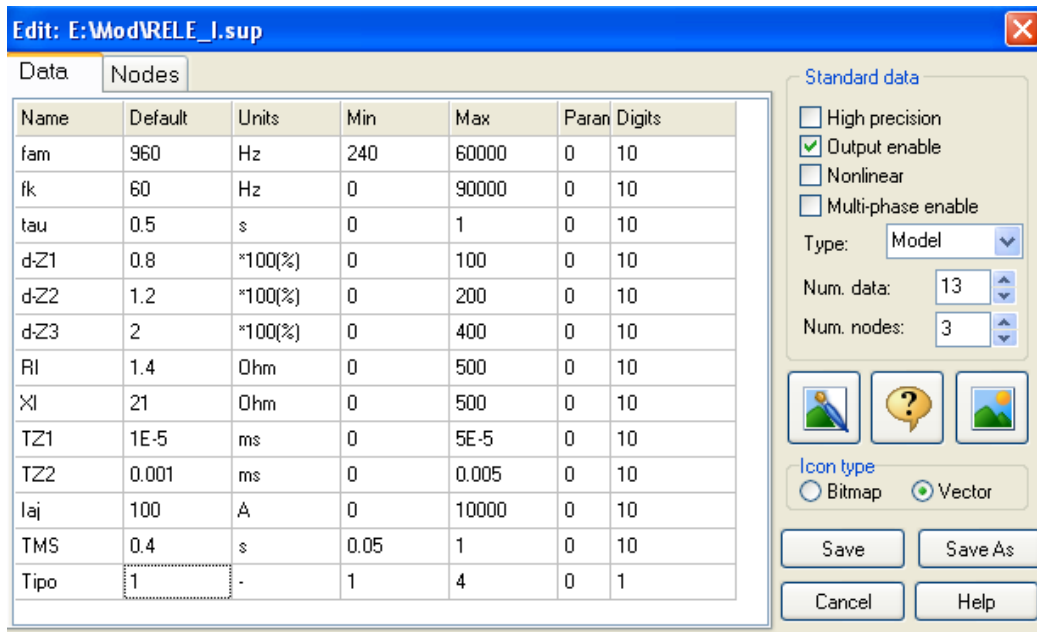
Nº do par	P	R	Δt_{SC-D2} (s)	Δt_{SC-D3} (s)	CTI (s)
1	2	1	0,0079	-	0,30
2	14	1	0,0046	-	0,30
3	3	2	0,0119	-	0,30
4	4	3	0,0029	-	0,30
5	5	4	0,0110	-	0,30
6	6	5	0,2586	-	0,30
7	7	5	0,2589	-	0,30
8	1	6	0,0028	-	0,30
9	2	7	0,0089	-	0,30
10	8	7	0,0109	-	0,30
11	13	8	0,0108	-	0,30
12	8	9	0,0072	-	0,30
13	14	9	0,0019	-	0,30
14	9	10	0,0011	-	0,30
15	10	11	0,0056	-	0,30
16	11	12	0,0093	-	0,30
17	7	13	0,0065	-	0,30
18	12	13	0,0184	-	0,30
19	6	14	0,0044	-	0,30
20	12	14	0,0165	-	0,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 9 ilustram-se todos os pares de relés P/R para o sistema de 8 barras. Para testar a metodologia proposta, considera-se uma falta na linha 3 (Figura 31), entre as barras 3 e 4. Analisando, a Tabela 9, verifica-se que se o relé 3, responsável pela proteção principal não atuar sua retaguarda o relé 2, é responsável por isolar a falta. Esta mesma análise pode ser feita na Tabela 9, verificando que os pares P/R foram construídos corretamente. Os valores de Δt_{SC-D2} devem ser positivos para que os relés estejam corretamente coordenados, ou seja, nenhuma restrição de coordenação foi violada.

Os parâmetros apresentados na Tabela 8 são utilizados na configuração dos relés no ATP. Na Figura 33 ilustra-se a tela gráfica do relé numérico no ATP, que após ser ajustado com esses parâmetros realiza o processo apresentado na Figura 9. Na tela gráfica estão todos os parâmetros fornecidos pelo algoritmo genético, bem como outros dados como frequência de amostragem (fm), constante de tempo (tau), utilizados pelo filtro DC e no cálculo da DFT, dentre outros.

Figura 33– Painel do relé numérico projetado em MODELS no ATP

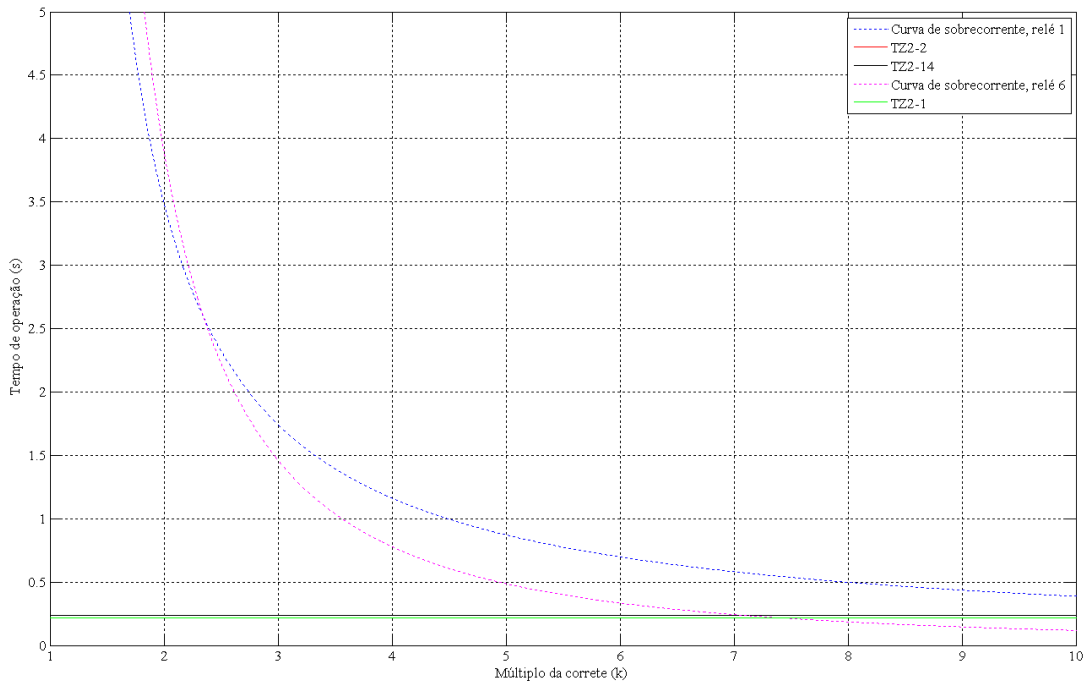


Fonte: Elaborado pelo autor.

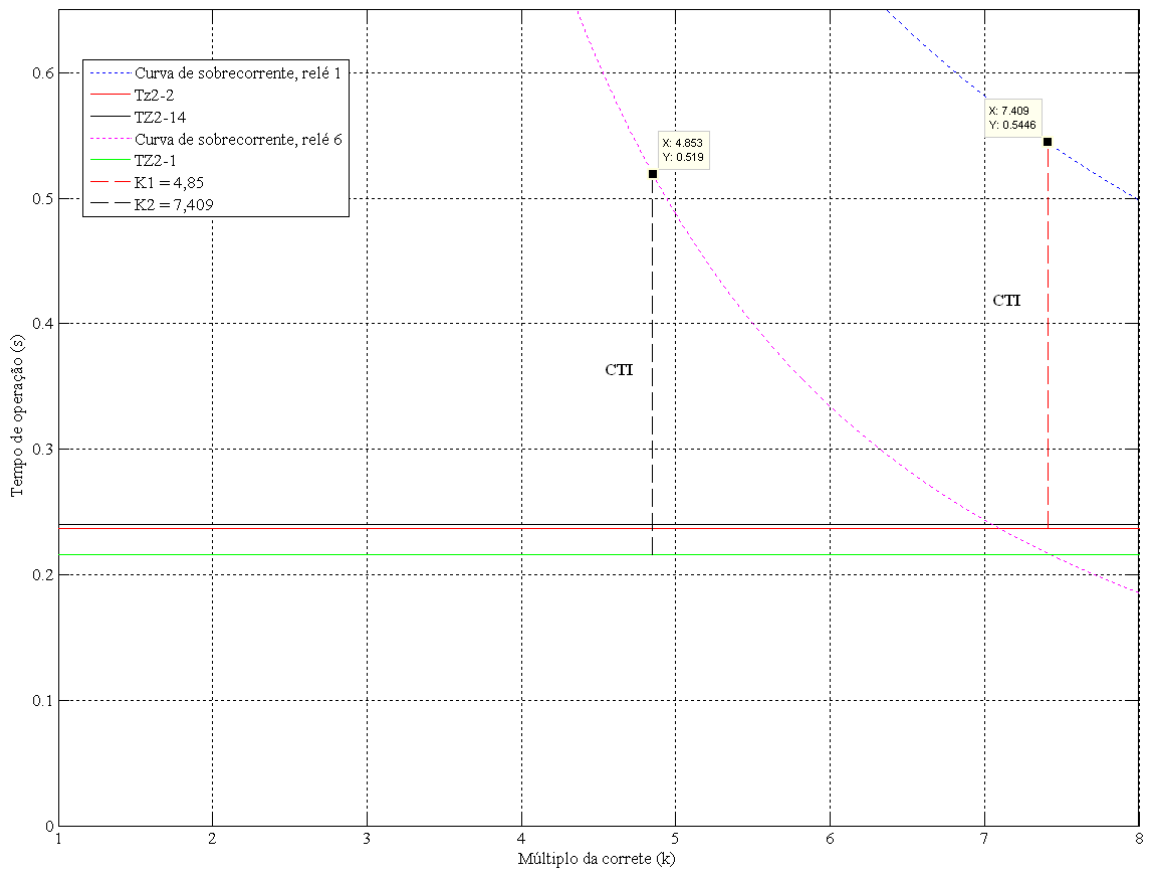
Os resultados apresentados na Tabela 9 estão de acordo com a restrição de coordenação $T_{retaguarga} - T_{principal} \geq CTI$. A Figura 34 ilustra as curvas do relé de distância e sobrecorrente. Nesta figura, utilizam-se todos os pares que pertencem ao relé 1 na Tabela 9, para simplificar a representação. Como se pode observar na Figura 34 a coordenação entre os pares P/R foi obtida corretamente.

Figura 34 –Curvas de distância e sobre-corrente para os pares que possuem o relé 1.

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1.2 Sistema de 39 Barras

Nas Tabelas 10 e 11 encontram-se os parâmetros dos relés gerados pelo algoritmo genético, bem como a lista dos pares de relés primários e retaguarda (P/R) com seus respectivos intervalos de coordenação, para um curto-circuito fase-terra no meio de todas as linhas do sistema de 39 barras, com impedância de falta $Z_f = 15 \Omega$.

Tabela 10 - Parâmetros dos relés gerados pelo AG

Nº do relé	I_{aj} (A)	TMS (s)	<i>Tipo</i>	T_{op} (s)	TZ_2 (s)
1	827,836	0,6681	1	0,60170	0,26032
2	663,721	0,3818	2	0,58457	0,25391
3	691,373	0,2088	3	0,55608	0,24772
4	243,628	0,3224	3	0,57229	0,25695
5	495,867	0,2476	3	0,56945	0,24592
6	238,782	0,3149	3	0,58438	0,22419
7	238,770	0,3073	3	0,60639	0,24459
8	232,653	0,2714	3	0,57580	0,24850
9	133,125	0,2667	4	0,62009	0,25812
10	195,400	0,3158	3	0,57508	0,25007
11	208,988	0,2988	3	0,54876	0,25818
12	382,577	0,2463	3	0,56217	0,25315
13	306,167	0,2344	3	0,59429	0,24163
14	1531,864	0,0936	2	0,53740	0,24917
15	1388,081	0,0667	3	0,57688	0,21679
16	290,982	0,2418	3	0,56988	0,25880
17	243,3531	0,2949	3	0,59942	0,25132
18	299,402	0,2365	3	0,57298	0,24649
19	181,030	0,3156	3	0,58854	0,24739
20	518,918	0,2886	2	0,58480	0,27765
21	284,710	0,2855	3	0,56565	0,26415
22	1139,060	0,1224	1	0,15303	0,26964
23	282,4507	0,3081	3	0,57377	0,27305
24	602,1326	0,8281	2	0,58520	0,26471

25	132,434	0,3457	4	0,57048	0,25378
26	220,728	0,3259	3	0,58436	0,25822
27	280,721	0,2593	3	0,56957	0,26399
28	116,300	0,3471	3	0,59196	0,24329
29	37,524	0,4048	3	0,57830	0,26484
30	321,856	0,2606	3	0,57097	0,25293
31	370,585	0,2174	3	0,55780	0,26884
32	19,300	0,5202	3	0,61668	0,25745
33	51,797	0,3931	4	0,59007	0,26322
34	167,023	0,2229	3	0,57445	0,27618
35	640,007	0,4112	2	0,57742	0,24743
36	761,735	0,2775	3	0,56547	0,26872
37	802,548	0,3338	2	0,56876	0,23723
38	266,590	0,5898	2	0,54668	0,25573
39	551,828	0,1945	3	0,54322	0,25054
40	230,971	0,2611	3	0,55933	0,25765
41	272,536	0,0871	4	0,55882	0,25323
42	227,535	0,1288	4	0,59330	0,24999
43	94,767	0,3359	3	0,56641	0,25494
44	214,624	0,3079	3	0,60411	0,25457
45	220,335	0,1331	4	0,57677	0,23999
46	341,355	0,2272	3	0,56273	0,24970
47	324,272	0,1719	3	0,54873	0,25473
48	1211,507	0,1084	3	0,59250	0,27152
49	1010,749	0,6464	1	0,58786	0,25889
50	348,573	0,7389	2	0,58130	0,25562
51	273,657	0,2800	3	0,56075	0,28667
52	347,676	0,9223	2	0,58608	0,25572
53	183,494	0,2925	3	0,56956	0,24818
54	595,965	0,2374	3	0,56659	0,27360
55	261,227	0,2820	3	0,58282	0,26435
56	1113,922	0,0619	3	0,59132	0,28171
57	290,408	0,6813	1	0,57997	0,23884

Nº do relé	I_{aj} (A)	TMS (s)	<i>Tipo</i>	T_{op} (s)	TZ_2 (s)
58	582,664	0,0680	3	0,63825	0,22914
59	184,784	0,1458	4	0,57692	0,27285
60	214,634	0,6329	2	0,57404	0,24140
61	296,830	0,2297	3	0,55071	0,27456
62	138,560	0,1595	4	0,58921	0,25459
63	32,492	0,8135	4	0,57674	0,27227
64	336,313	0,5191	2	0,55932	0,26773
65	357,282	0,2345	3	0,56801	0,25802
66	18,573	0,3620	3	0,59323	0,23452
67	41,271	0,3304	3	0,57727	0,27256
68	169,512	0,8178	2	0,53959	0,27409
Valor do Fitness		38,84869 s			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11–Lista P/R do sistema de 39 barras, com seus intervalos de coordenação.

Nº do par	P	R	Δt_{sc-D2} (s)	Nº do par	P	R	Δt_{sc-D2} (s)
1	3	1	0,0539798	13	52	8	0,0200729
2	4	1	0,0447509	14	11	9	0,0619063
3	49	2	0,0256745	15	12	9	0,0669344
4	5	3	0,0101590	16	14	10	0,0259110
5	6	3	0,0318968	17	47	10	0,0203531
6	30	4	0,0193528	18	13	11	0,0071286
7	7	5	0,0248583	19	50	12	0,0065562
8	8	5	0,0209446	20	14	13	0,0451142
9	59	6	0,0115299	21	44	13	0,0397143
10	9	7	0,0482684	22	15	14	0,0206132
11	10	7	0,0563206	23	36	15	0,0081549
12	19	8	0,0284107	24	46	16	0,0201783

Nº do par	P	R	Δt_{sc-D2} (s)	Nº do par	P	R	Δt_{sc-D2} (s)
25	18	17	0,0529320	53	3	38	-0,0010360
26	19	18	0,0255950	54	35	38	-0,0007471
27	42	18	0,0229942	55	6	39	0,0190317
28	20	19	0,0108886	56	37	39	0,0059926
29	21	20	0,0206427	57	5	40	0,0134033
30	22	20	0,0151591	58	37	40	0,0221019
31	23	20	0,0117516	59	8	41	0,0103152
32	24	20	0,0200884	60	39	41	0,0082839
33	25	21	0,0118661	61	7	42	0,0487125
34	26	21	0,0074253	62	39	42	0,0427675
35	27	23	0,0097767	63	10	43	0,0163434
36	63	24	0,0129358	64	41	43	0,0131837
37	40	25	0,0128282	65	9	44	0,0459923
38	65	26	0,0263407	66	41	44	0,0508849
39	28	27	0,0262762	67	12	45	0,0236197
40	29	28	0,0271174	68	43	45	0,0218346
41	58	29	0,0491513	69	11	46	0,0045463
42	31	30	0,0021258	70	43	46	0,0077893
43	32	30	0,0135173	71	45	47	0,0087449
44	33	30	0,0077536	72	44	48	0,0379253
45	60	31	0,0164040	73	47	48	0,0377673
46	34	32	0,0404960	74	48	49	0,0163346
47	68	33	0,0159742	75	17	50	0,0299831
48	67	34	0,0018951	76	16	51	0,0019579
49	2	35	0,0235116	77	51	52	-0,0005958
50	1	36	0,0051435	78	42	53	0,0195779
51	4	37	0,0118127	79	53	53	0,0138409
52	35	37	0,0213305	80	53	54	0,0184065

Nº do par	P	R	Δt_{sc-D2} (s)	Nº do par	P	R	Δt_{sc-D2} (s)
81	22	55	0,0131828	98	55	59	0,0125669
82	23	55	0,0097753	99	25	60	0,0202583
83	24	55	0,0181121	100	55	60	0,0096901
84	54	55	0,0092169	101	57	61	0,0118741
85	21	56	0,0271638	102	61	62	0,0146507
86	23	56	0,0182726	103	62	63	0,0221523
87	24	56	0,0266094	104	38	64	0,0035872
88	54	56	0,0177143	105	32	65	0,0105577
89	21	57	0,0158190	106	33	65	0,0047940
90	22	57	0,0103354	107	64	65	0,0002808
91	24	57	0,0152647	108	31	66	0,0243860
92	54	57	0,0063695	109	33	66	0,0300138
93	21	58	0,0740951	110	64	66	0,0255005
94	22	58	0,0686115	111	31	67	0,0084228
95	23	58	0,0652040	112	32	67	0,0198142
96	54	58	0,0646456	113	64	67	0,0095373
97	26	59	0,0186943	114	66	68	0,0050650

Fonte: Elaborado pelo autor.

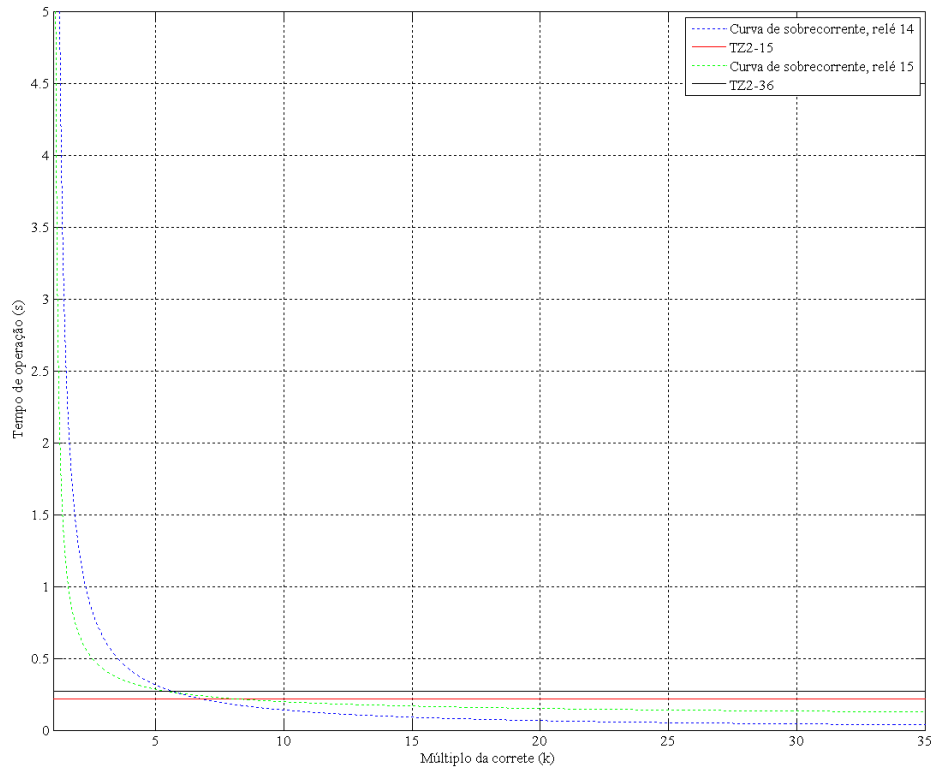
Na Tabela 11 ilustram-se todos os pares de relés P/R para o sistema de 39 barras. Os valores negativos de Δt_{sc-D2} não possuem grandeza significativa, portanto não alteram nenhuma restrição de coordenação.

Os parâmetros apresentados na Tabela 10 são utilizados na configuração dos relés no ATP. Na Figura 33 ilustra-se a tela gráfica do relé numérico no ATP, que após ser ajustado com esses parâmetros realiza o processo apresentado na Figura 9.

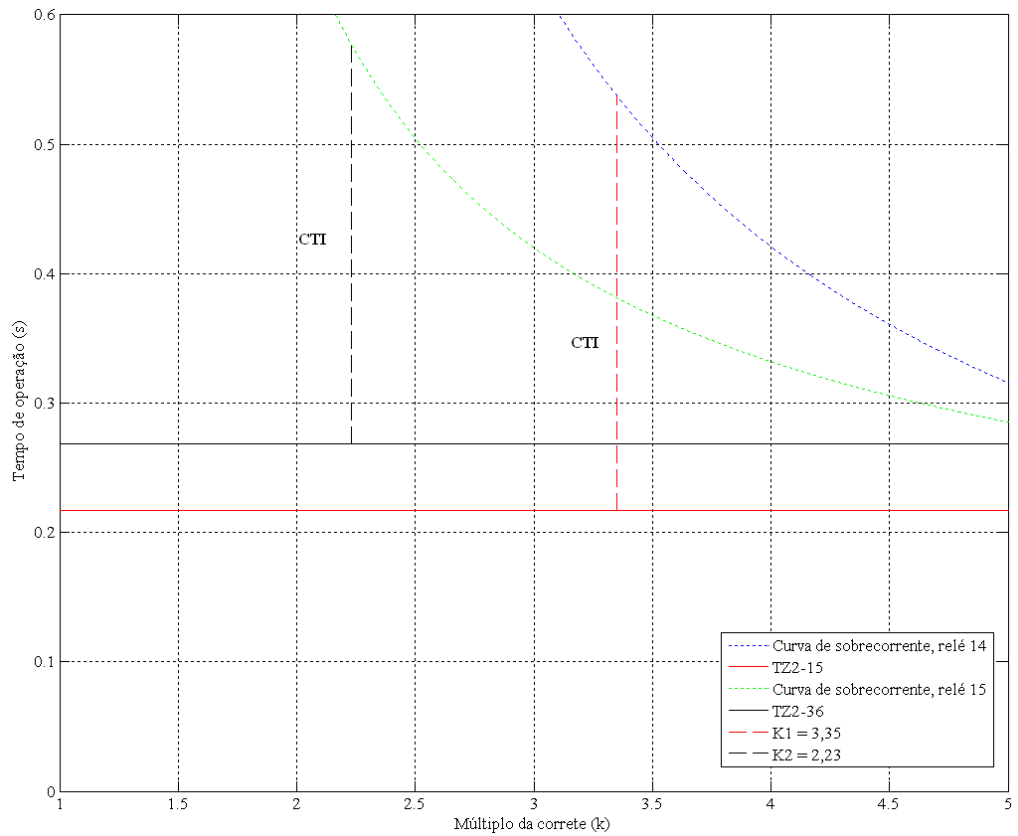
Os resultados apresentados na Tabela 11 estão de acordo com a restrição de coordenação $T_{retaguarga} - T_{principal} \geq CTI$. A Figura 35 ilustra as curvas do relé de distância e sobrecorrente. Nesta figura, utilizam-se todos os pares que pertencem ao relé 15 da Tabela 11, para simplificar a representação. Como se pode observar na Figura 35 a coordenação entre os pares P/R foi obtida corretamente.

Figura 35—Curvas de distância e sobre-corrente para os pares que possuem o relé 15.

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2 CONTROLADOR NEBULOSO

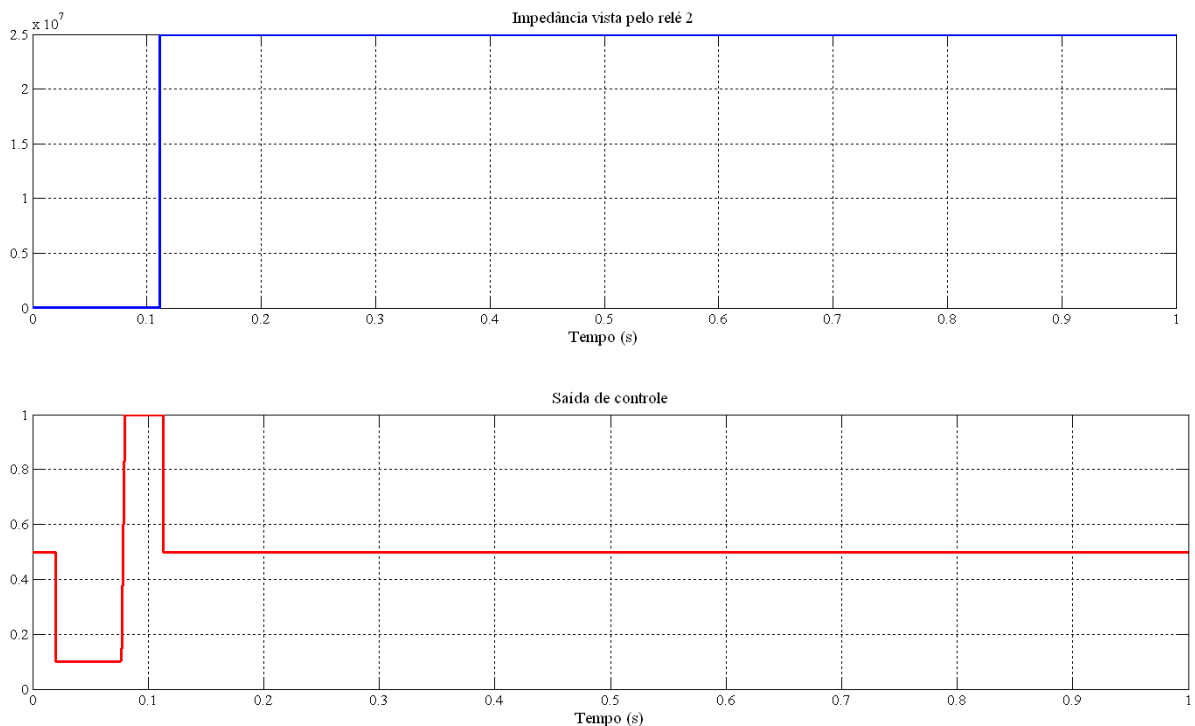
Para analisar o comportamento do relé numérico com o controlador nebuloso, são considerados dois cenários diferentes. O primeiro cenário simula-se um curto circuito trifásico na linha 2 do sistema de 8 barras (Figura 31). O segundo cenário apresenta contingências com a ausência de uma linha (n-1), o teste apresenta a resposta do relé a um curto-circuito fase-terra na linha 3 com a ausência da linha 2.

7.2.1 Primeiro Cenário

O procedimento é o mesmo do apresentado anteriormente, foram obtidos os ajustes das funções de sobrecorrente e de distância, com os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9. Através do detector de faltas ilustrado na Figura 9, o relé identifica o tipo de falta, no caso trifásica, com essa informação o controlador aciona as funções de pertinência ilustradas nas Figuras 26, 27 e 29 que representam as funções de distância, tempo e sinal piloto, respectivamente. Com o conjunto de regras da Tabela 5 o controlador realiza sua ação de controle de acordo com a situação de falta.

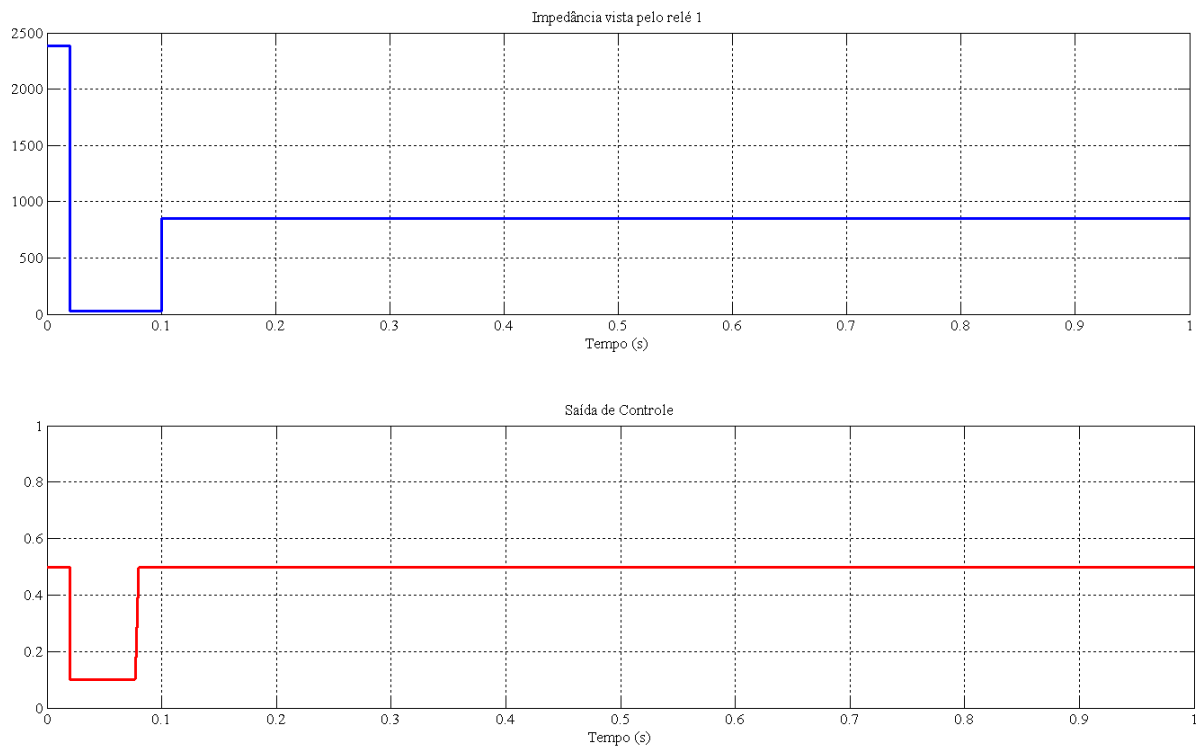
As Figuras 36, 37, 38 e 39 representam respectivamente as saídas de controle e as impedâncias vistas pelos relés 2, 1, 7 e 12.

Figura 36 –(a) Impedância vista pelo relé 2; (b) Saída de controle.



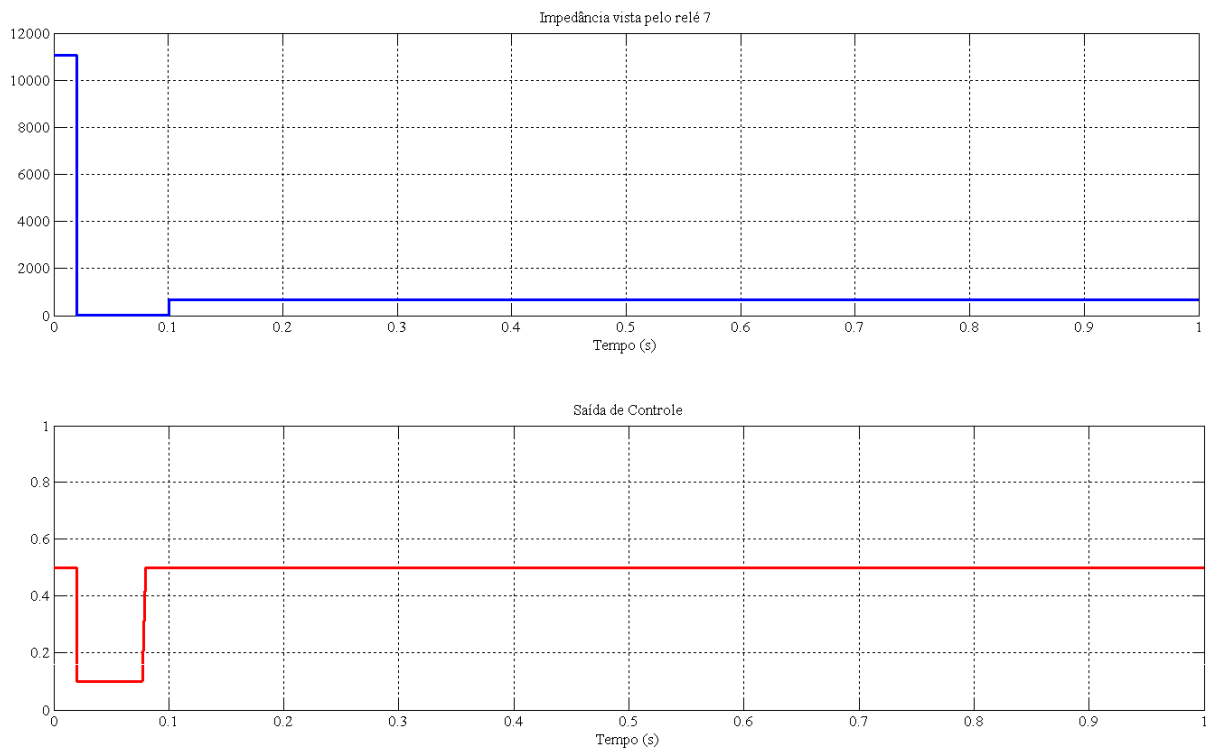
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 –(a) Impedância vista pelo relé 1; (b) Saída de controle.

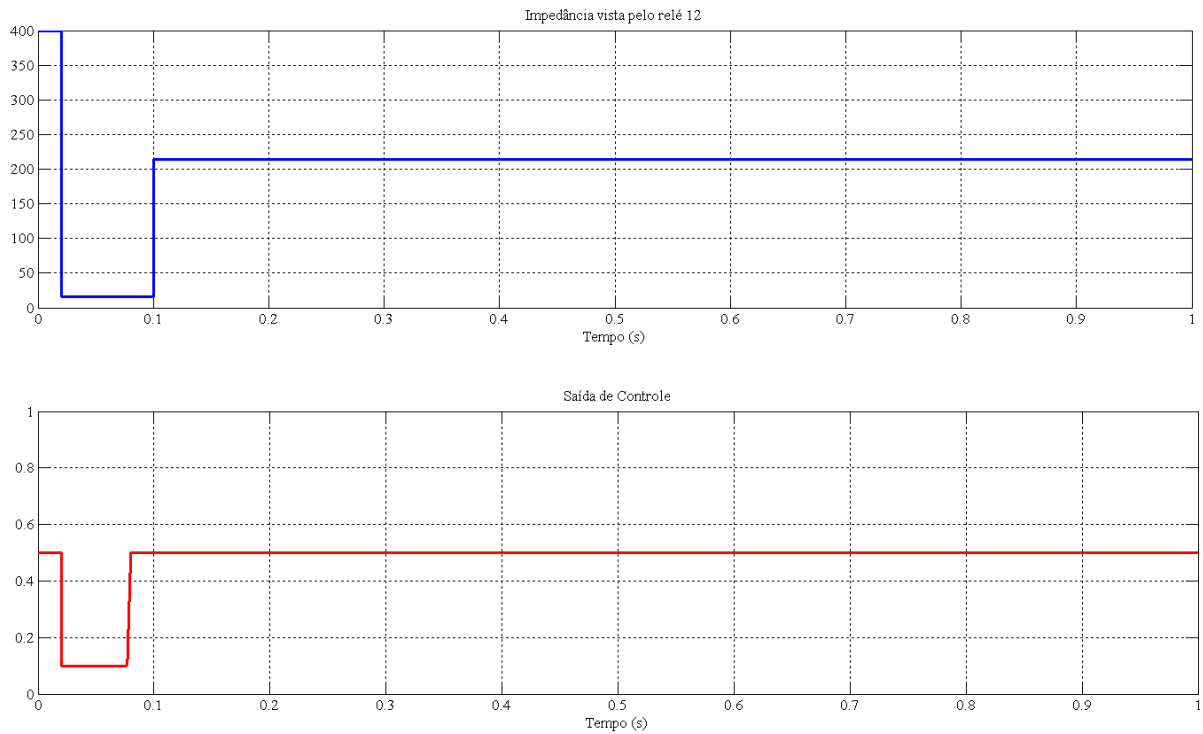


Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 –(a) Impedância vista pelo relé 7; (b) Saída de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 –(a) Impedância vista pelo relé 12; (b) Saída de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

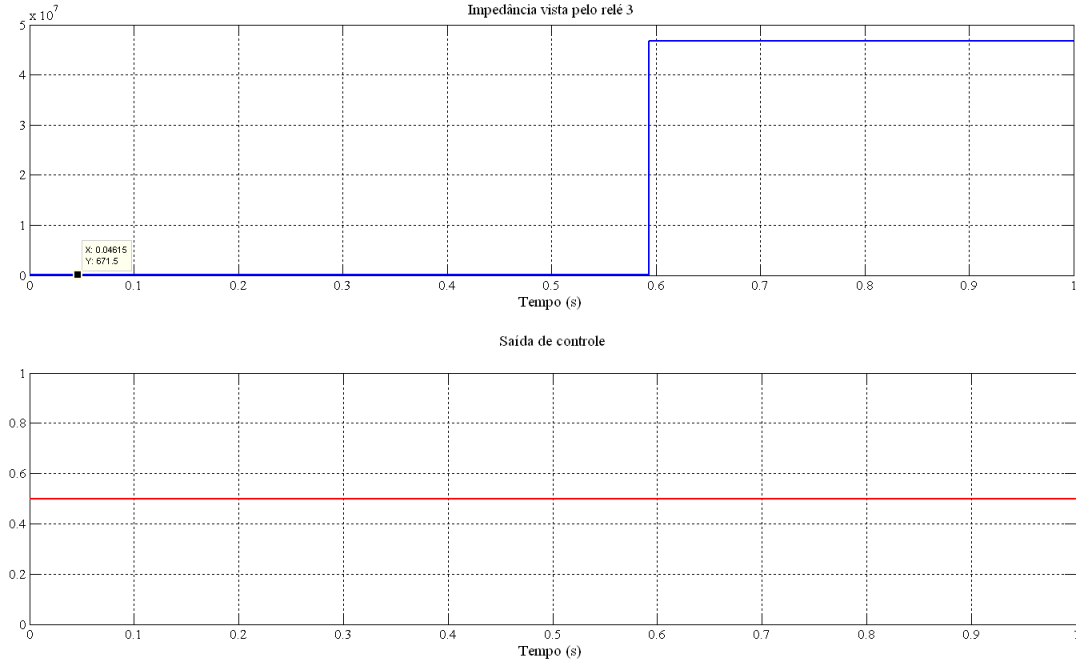
Verifica-se na Figura 36 que o relé 2, responsável pela proteção principal da linha, envia o sinal de *trip* adequadamente, após o tempo de 75 ms (transitório). Após 33 ms do envio do sinal de *trip* a linha é tirada de operação. As Figuras 37, 38 e 39 ilustram as saídas dos relés responsáveis pela proteção de retaguarda do relé 2 que são os relés 1 e 7, que não atuam, pois o relé 2 consegue ilhar a falta, e do relé 12 que também apresentou comportamento adequado.

7.2.2 Segundo Cenário

São obtidos os ajustes das funções de sobrecorrente e de distância, como os valores apresentados pelas Tabelas 8 e 9. Através do detector de faltas ilustrado na Figura 9, o relé identifica o tipo de falta, no caso fase-terra com a ausência da linha 2, com essa informação o controlador aciona as funções de pertinência ilustradas nas Figuras 24, 26, 27 e 29, que representam as funções de sobrecorrente, distância, tempo e sinal piloto respectivamente. Através do conjunto de regras da Tabela 6, o controlador realiza sua ação de controle de acordo com a contingência.

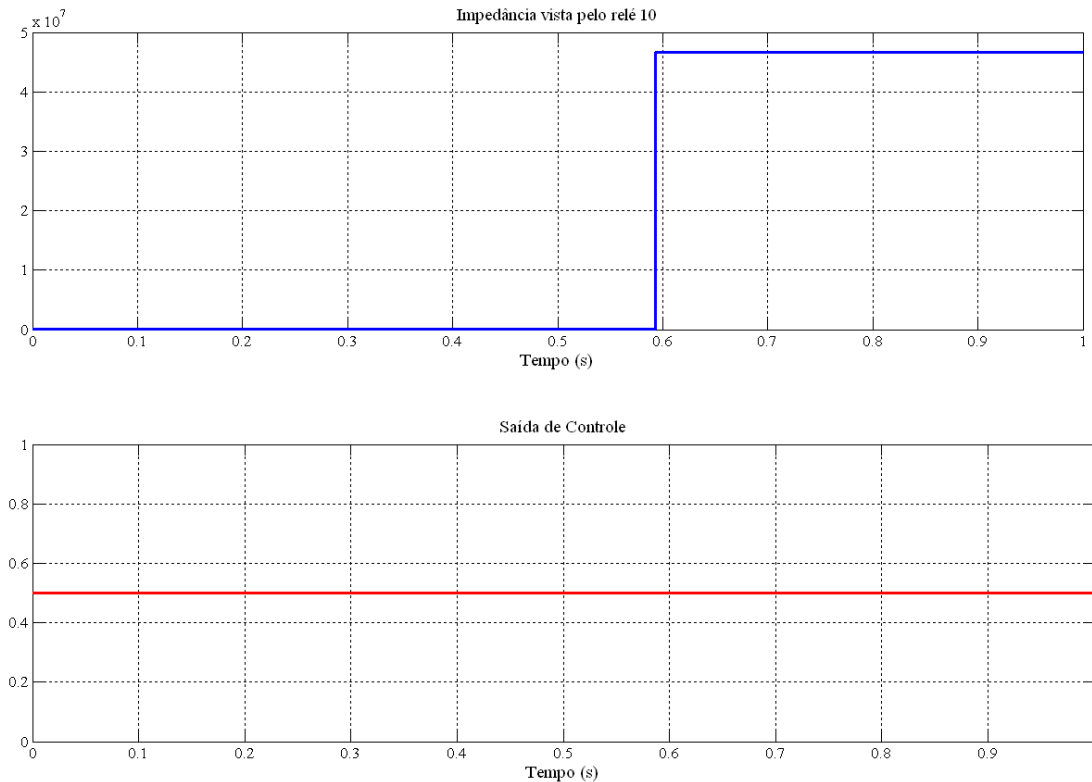
As Figuras 40, 41 e 42 representam respectivamente as saídas de controle e as impedâncias vistas pelos relés 3, 10 e 11.

Figura 40 –(a) Impedância vista pelo relé 3; (b) Saída de controle.



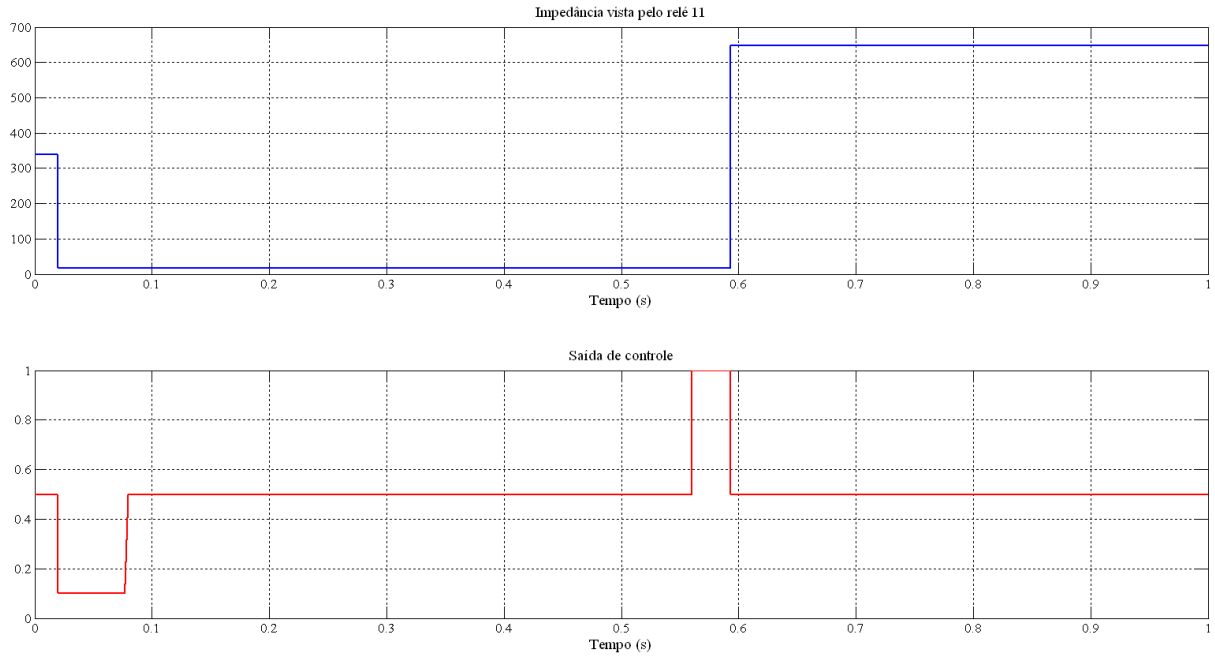
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 –(a) Impedância vista pelo relé 10; (b) Saída de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 –(a) Impedância vista pelo relé 11; (b) Saída de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se pela Figura 40 que com a ausência da linha 2 a proteção principal da linha 3 é feita pelo relé 10, sendo sua retaguarda o relé 11, portanto o relé 3 não protege a linha 3. A Figura 41 indica que a função de distância, proteção principal da linha 3, relé 10, não identifica a falta, cabendo assim ao relé 11 através de sua função de sobrecorrente isolá-la (Figura 42).

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para a solução do problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais e de distância em sistemas malhados. Nas funções de distância utilizam-se duas zonas de proteção, sendo que no cenário com a presença de curto-circuito fase-terra, a primeira zona ajustada na operação instantânea, e a segunda zona ajustada na função temporizada são responsáveis pela proteção principal e os relés de sobrecorrente direcionais são usados como retaguarda. Para faltas entre fases o relé apenas utiliza sua função de distância, sendo que a primeira e segunda zona é a proteção principal e a terceira zona de retaguarda. Essa estrutura é baseada no esquema de transferência de *trip* de sobrealcançe permissivo. A função objetivo na equação (10) modela esse problema matematicamente, com as restrições de coordenação.

Para validar o método proposto foram utilizados dois sistemas testes, de 8 barras ilustrado na Figura 31, e de 39 barras, Figura 32. Nestes sistemas foram simulados no ATP diversos tipos de curtos-circuitos nas linhas de transmissão, e através das correntes falta obtidas pela simulação o algoritmo genético, geraram-se os parâmetros das funções de sobrecorrente (I_{aj} , TMS , *tipo da curva*) e de distância ($TZ2$).

O algoritmo genético foi calibrado empiricamente variando os parâmetros α , β e γ , tamanho da população e o número de gerações, para encontrar os valores que representavam a melhor solução, ou seja, aquela que apresenta menor tempo de coordenação.

Com relação aos resultados obtidos pelo algoritmo genético dedicado, observou-se que nenhuma restrição de coordenação foi violada de modo a prejudicar a atuação dos relés para qualquer tipo de curto-circuito. Além disto, para o sistema teste de 8 barras, o tempo total da coordenação, ou seja o valor da função objetivo foi menor que outros trabalhos da literatura, como em (SADEH;AMINTOJJAR; BASHIR, 2011).

O relé numérico com o controlador nebuloso agregado respondeu corretamente em condições de faltas trifásicas e fase-terra como se pode observar. Através desta ferramenta é possível identificar com precisão o tipo de falta que ocorre no sistema e isolar a linha de transmissão sob contingência. O controlador nebuloso possui a vantagem de auxiliar o relé na tomada de decisão para pequenas alterações de carregamento e topológicas do sistema, tornando a proteção adaptativa.

8.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Analisar e avaliar o comportamento do relé numérico com o controlador em diferentes cenários;
- Inserir dispositivos FACTS nas linhas de transmissão e avaliar o comportamento do relé;
- Comparar a eficiência do relé com e sem o controlador nebuloso diante de diversas situações.

REFERÊNCIAS

- ADU, T. An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 17, n. 3, p. 684 – 690, 2002.
- ANDERSON, P. M. **Power system protection**. [S.l.]: IEEE Press Series on Power Engineering, 1998. 1286p.
- AREVA. **Network protection & automation guide**. Montpellier: Place de la Coupole, 2002. 500p.
- BERNARDES, W. M. S. **Algoritmo enxame de partículas discreto para coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- BRAGA, A. S.; SARAIVA, J. T. Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the Simplex method. In: MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE, 8., 1996, Bari. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1996, v. 3, p. 1535 - 1538.
- CHEN, G. ; PHAM, T. T. **Introduction to fuzzy systems**. New York: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- DAS, B.; REDDY, J. Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection. **Power Delivery. IEEE Transactions on**, Columbus OH, v. 20, n. 2, p. 609 – 616, 2005.
- DECANINI, J.G.M.S. **Deteção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2008.
- ERENTURK, K. A new digital protective relay based on fuzzy logic and value estimation. **Iranian Journal Of Science & Technology Transaction A**, Shiraz, v. 29, n. A2, 2005.
- FERRERO, A.; SANGIOVANNI, S.; ZAPITELLI, E. A fuzzy set approach to fault type identification in digital relaying. **IEEE Trans. Power Delivery**, Columbus OH, v. 10, n. 1, p. 169–175, Jan. 1995.
- FOLKERS, R. **Determine current transformer suitability using EMTP models**. WA USA: Schweitzer Engineering Laboratories, 1999. 10p.
- FUNABASHI, T. et al. **Fault locator simulation using MODELS language**. Energy Management and Power Delivery: IEEE, p. 601–606, 1998.
- HØIDALEN, H. K. et al. Implementation of new features in ATPDraw version 3. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS – IPST, 1., 2003, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: Entergy Corporation, 2003. p. 1-6.

KAWAHARA, K.; SASAKI, H.; SUGIHARA, H. An application of rule based system to the coordination of directional overcurrent relays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 6., 1997, Nottingham. **Proceedings...** Nottingham: [s.n.], 1997. p. 58-61. ISSN 0537-9989.

KIM, C.H. et al. Educational use of EMTP models for the study of a distance relaying algorithm for protecting transmission lines. **Power Systems, IEEE Transactions on**, Columbus OH, v. 15, n. 1, p. 9-15, 2000.

MIGUEL, P. M. **Introdução à simulação de relés de proteção usando a linguagem MODELS do ATP**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011. 376p.

MCNEIL, F. M.; THRO, E. **Fuzzylogic a practical approach**. Boston: Academic Press, 1994. 292p.

NOBLAT, B. M., DUMAS, F., POULAIN, C. **Calculation of short-circuit currents**. Technical Collection. Schneider Electric, 2005.

NOGHABI, A.S.; SADEH, J.; MASHHADI, H.R. Considering different network topologies in optimal overcurrent relays coordination using hybrid GA. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, Edmonton, v. 24, n. 4, p. 1857-1862, 2009.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall 1999. 870 p.

ORDUÑA, E.; GARCÉS, F.; HANDSCHIN, E. Algorithmic-knowledge-based adaptive coordination in transmission protection. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, Edmonton, v. 18, n. 1, p. 61-65, 2003.

PAI, M. A. **Energy function analysis is for power system stability**. Berlin: Kluwer Academic, 1989. 56 p.

PRIKLER L.; HØIDALEN H. K. **ATPDRAW version 5.6 for windows 9x/NT/2000/XP/vista users' manual no. 1.0**. Budapest: [s. n.], 2009.

RAZAVI, F.; ABYANEH, H. A.; AL-DABBAGH, M.; MOHAMMADI, R.; TORKMAN, H. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 8, n. 4, p. 713-720, 2007.

ROCKEFELLER, G. Fault protection with a digital computer. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, Columbus OH, PAS-88, n. 4, p. 438-464, 1969.

SADEH, J.; AMINTOJJAR, V.; BASHIR, M. Coordination of overcurrent and distance relays using hybrid particle swarm optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED POWER SYSTEM AUTOMATION AND PROTECTION, 2011, Beijing. **Proceedings...** Beijing: [s. n.], 2011. p. 1130-1134.

SCHWEIZER, E. O. A review of impedance-based fault locating experience. In: SYSTEM PROTECTION SEMINAR, 16., 1990, Omaha. **Proceedings...** Omaha: [s. n.], 1990. p. 1-31.

SCHWEIZER, E. O. Evaluation and development of transmission line fault locating techniques which use sinusoidal steady-state information, In: ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 9., 1982, Spokane. **Proceedings...** Spokane:[s. n.], 1982. p. 26-28.

TAKAGI, T. et al. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Tokyo, PAS-101, n. 8, p. 2892 - 2898, 1982.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, New York, v.8, n.3, p.338-353, 1965.

ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTES

Neste anexo são apresentados os dados dos sistemas testes de 8 e 39 barras.

SISTEMA DE 8 BARRAS

Sistema ilustrado na Figura 31, composto por 2 geradores, 2 transformadores e 7 linhas de transmissão.

Tabela 12- Características das linhas.

Barramentos	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Y (Ω/km)	L (km)
1 2	0,004	0,05	0,0	100,0
1 3	0,0057	0,0714	0,0	70,0
3 4	0,005	0,0563	0,0	80,0
4 5	0,005	0,045	0,0	100,0
5 6	0,0045	0,0409	0,0	110,0
2 6	0,0044	0,05	0,0	90,0
1 6	0,005	0,05	0,0	100,0

Fonte: (BRAGA; SARAIVA,1996).

Tabela 13 - Informações dos transformadores.

Barramentos	Sn (MVA)	Vp (kV)	Vs (kV)	X (%)
71	150,0	10,0	150,0	4,0
86	150,0	10,0	150,0	4,0

Fonte: (BRAGA; SARAIVA,1996).

Tabela 14 - Informações do gerador.

Barramento	Sn (MVA)	Vn (kV)	Xsub (%)
7	150,0	10,0	15,0
8	150,0	10,0	15,0

Fonte: (BRAGA; SARAIVA,1996).

Tabela 15 - Informações das cargas.

Barramento	P (MW)	Q (MVA _r)
2	40,0	20,0
3	60,0	40,0
4	70,0	40,0
5	70,0	50,0

Fonte: (BRAGA; SARAIVA,1996).

SISTEMA DE 39 BARRAS

Sistema ilustrado na Figura 32, conhecido como sistema de potência de 10 máquinas na Nova Inglaterra. O gerador 1 representa a junção de um amplo número de geradores. Todos os valores representados são em pu em 60 Hz utilizando 100 MVA de base, PAI, M. A, 1989.

Tabela 16–Informações dos geradores.

Nº Unidade	H	Ra	x'd	x'q	xd	xq	T'do	T'qo	xl
1	500	0	0,006	0,008	0,02	0,019	7,0	0,7	0,003
2	30,3	0	0,0697	0,170	0,295	0,282	6,56	1,5	0,035
3	35,8	0	0,0531	0,0876	0,2495	0,237	5,7	1,5	0,0304
4	28,6	0	0,0436	0,166	0,262	0,258	5,69	1,5	0,0295
5	26,0	0	0,132	0,166	0,67	0,62	5,4	0,44	0,054
6	34,8	0	0,05	0,0814	0,254	0,241	7,3	0,4	0,0224
7	26,4	0	0,049	0,186	0,295	0,292	5,66	1,5	0,0322
8	24,3	0	0,057	0,0911	0,290	0,280	6,7	0,41	0,028
9	34,5	0	0,057	0,0587	0,2106	0,205	4,79	1,96	0,0298
10	42,0	0	0,031	0,008	0,1	0,069	10,2	0,0	0,0125

Fonte: (PAI, 1989).

Tabela 17–Informações das linhas e transformadores

Dados das linhas					TAP Transformador	
Da Barra	Para Barra	R	X	B	Magnitude	Ângulo
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	0	0
1	39	0.0010	0.0250	0.7500	0	0
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	0	0
2	25	0.0070	0.0086	0.1460	0	0
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	0	0
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	0	0
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	0	0
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	0	0
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	0	0
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	0	0
6	7	0.0006	0.0092	0.1130	0	0
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	0	0
7	8	0.0004	0.0046	0.0780	0	0
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	0	0
9	39	0.0010	0.0250	1.2000	0	0
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	0	0
10	13	0.0004	0.0043	0.0729	0	0
13	14	0.0009	0.0101	0.1723	0	0
14	15	0.0018	0.0217	0.3660	0	0
15	16	0.0009	0.0094	0.1710	0	0
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	0	0
16	19	0.0016	0.0195	0.3040	0	0
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	0	0
16	24	0.0003	0.0059	0.0680	0	0
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	0	0
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	0	0
21	22	0.0008	0.0140	0.2565	0	0
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	0	0
23	24	0.0022	0.0350	0.3610	0	0

25	26	0.0032	0.0323	0.5130	0.000	0
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	0.000	0
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	0.000	0
26	29	0.0057	0.0625	1.0290	0.000	0
28	29	0.0014	0.0151	0.2490	0.000	0
12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0
12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0
6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.070	0
10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.070	0
19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.070	0
20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.009	0
22	35	0.0000	0.0143	0.0000	1.025	0
23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.000	0
25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.025	0
2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.025	0
29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.025	0
19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.060	0

Fonte: (PAI, 1989).

Tabela 18–Informações das fontes de tensão e das cargas

Barra	Tipo	Tensão (PU)	Carga		Gerador		
			MW	MVar	MW	MVar	Nº unidade
1	PQ	-	0	0	0	0	
2	PQ	-	0	0	0	0	
3	PQ	-	322.0	2.4	0	0	
4	PQ	-	500.0	184.0	0	0	
5	PQ	-	0	0	0	0	
6	PQ	-	0	0	0	0	
7	PQ	-	233.8	84.0	0	0	
8	PQ	-	522.0	176.0	0	0	
9	PQ	-	0	0	0	0	
10	PQ	-	0	0	0	0	

11	PQ	-	0	0	0	0	
12	PQ	-	7.5	88.0	0	0	
13	PQ	-	0	0	0	0	
14	PQ	-	0	0	0	0	
15	PQ	-	320.0	153.0	0	0	
16	PQ	-	329.0	32.3	0	0	
17	PQ	-	0	0	0	0	
18	PQ	-	158.0	30.0	0	0	
19	PQ	-	0	0	0	0	
20	PQ	-	628.0	103.0	0	0	
21	PQ	-	274.0	115.0	0	0	
22	PQ	-	0	0	0	0	
23	PQ	-	247.5	84.6	0	0	
24	PQ	-	308.6	-92.0	0	0	
25	PQ	-	224.0	47.2	0	0	
26	PQ	-	139.0	17.0	0	0	
27	PQ	-	281.0	75.5	0	0	
28	PQ	-	206.0	27.6	0	0	
29	PQ	-	283.5	26.9	0	0	
30	PV	1.0475	0	0	250.0	-	Ger 10
31	PV	0.9820	9.2	4.6	-	-	Ger 02
32	PV	0.9831	0	0	650.0	-	Ger 03
33	PV	0.9972	0	0	623.0	-	Ger 04
34	PV	1.0123	0	0	508.0	-	Ger 05
35	PV	1.0493	0	0	650.0	-	Ger 06
36	PV	1.0635	0	0	560.0	-	Ger 07
37	PV	1.0278	0	0	540.0	-	Ger 08
38	PV	1.0265	0	0	830.0	-	Ger 09
39	PV	1.0300	1104.0	250.0	1000.0	-	Ger 01

Fonte: (PAI, 1989).